

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE CIENCIAS

POSTGRADO DE ECOLOGIA TROPICAL

IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO
O DEFORESTACION SOBRE FENOLOGIA Y PRODUCCION DEL
MAIZ HIBRIDO CENIAP PB-8 EN BARINAS Y TUREN

Tesis de Maestría en Ecología Tropical

Autor: Carlos E. Maytín

Tutor: Profesor Miguel Acevedo

Asesores: Profesores Rigoberto Andressen y Aura Azócar

Marzo de 1991

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Miguel Acevedo por su adecuada tutoría en la presente tesis de maestría en Ecología Tropical y por haberme dado la oportunidad de iniciarme en un campo de investigación tan fascinante como lo es el de las implicaciones agroecológicas de los cambios climáticos. Así mismo, por todo el apoyo logístico recibido a través de su coordinación del Proyecto PAN-EARTH, estudio de caso: Venezuela.

Al profesor Rigoberto Andressen por su constante asesoría en los aspectos climáticos asociados a la tesis y por el apoyo que en general siempre me ha dado en mis estudios de pregrado (Geografía) y postgrado.

Al profesor Jean Hétier (Convenio ULA-ORSTOM) por el constante apoyo para la realización de la fase experimental de campo en el Jardín Botánico de la Ciudad de Barinas.

A la Ingeniero Químico Marilena Zuvia (Convenio ULA-ORSTOM) por su acertada asesoría en aspectos relacionados con el manejo del sistema DSSAT y el modelo CERES-Maiz y además por el apoyo recibido para la realización de la fase experimental de campo en la ciudad de Barinas.

A la profesora Aura Azócar por la asesoría en la realización de la fase experimental de campo y el tratamiento de la información ecofisiológica relativa al cultivo del maíz.

Al profesor Alan Robock de la Universidad de Maryland, por su asesoría en lo relativo a la generación de escenarios de cambios climáticos para Venezuela.

Al profesor Fermin Rada por el suministro y asesoría en el adecuado manejo de los equipos de medición ecofisiológica en la fase experimental de campo.

Al Biólogo Ramón Jaimez (Proyecto PAN-EARTH) por su importante apoyo logístico durante toda la realización de la tesis de maestría.

A Jean Claude Burgaud, por su asesoría en el manejo de la Sonda Neutrónica Sólo 40 y suministro de datos sobre contenido de agua en el suelo del Jardín Botánico de la ciudad de Barinas.

A los Técnicos Superiores Agrícolas Jesús Pérez y Pedro Urbina por su importante apoyo durante la fase experimental de campo en el Jardín Botánico de la Ciudad de Barinas.

A la Fundación Gran Mariscal de Ayacucho sin cuyo apoyo financiero hubiera sido imposible realizar mi tesis de maestría.

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de Los Andes por el apoyo financiero a través del Proyecto de Investigación I-328-90.

Al Consejo de Computación Académica de la Facultad de Economía y su Coordinador Ing. Israel Ramírez, por su apreciable colaboración al permitir usar los equipos de computación e impresión.

A la Dirección del Jardín Botánico de la UNELLEZ en la ciudad de Barinas, por su apoyo en la fase experimental de campo.

A la Sección de Agroclimatología del Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP, Maracay) y en especial al Ing. (MSc) Franky Méndez, por la colaboración prestada en el suministro de datos climáticos de la estación Colonia Turén. Igualmente a los Investigadores del mismo Instituto Dr. Juan Comerma, MSc Ebelyn Bisbal, MSc Rodolfo Delgado, al profesor Stalin Torres y a la Sección de Suelos del CENIAP.

Al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (ciudad de Barinas), por el suministro de información climatológica de la estación Barinas-Aeropuerto.

Al personal del Cuerpo de Bomberos Universitarios de La UNELLEZ en la ciudad de Barinas, por su apoyo para la realización de la fase experimental de campo.

Al ayudante Docente Alan Ruiz, por su constante colaboración respecto al uso de los equipos de computación e impresión del Consejo de Computación Académica de la Facultad de Economía. Por el mismo concepto también agradezco al señor Pedro Quintero.

A los señores Clemente Flores y Luis Dugarte por su esmero y profesionalismo en el dibujo de los gráficos.

En general al Postgrado de Ecología Tropical de la Universidad de los Andes por haberme permitido realizar los estudios correspondientes a la maestría en Ecología Tropical y haber facilitado la obtención de la beca de la Fundación Gran Mariscal de Ayacucho.

C O N T E N I D O

1. I N T R O D U C C I O N.....	pp. 1
1.1. Calentamiento Global (Efecto Invernadero).....	pp. 1
1.2. Factores Adicionales que Inducen Cambios de Clima.....	pp. 3
1.3. Obejetivos Generales y Especificos.....	pp. 6
1.4. Justificación del Cultivo y de las Areas Seleccionadas.....	pp. 7
2. A N T E C E D E N T E S.....	pp. 10
3. M E T O D O L O G I A.....	pp. 34
3.1. El Modelo CERES-Maíz y el Sistema DSSAT.....	pp. 35
3.1.1. Características Generales.....	pp. 35
3.1.2. Validación de Aspectos Fenológicos Productivos del Modelo CERES-Maíz en Venezuela.....	pp. 42
3.1.3. Información de Entrada en el Modelo CERES-Maíz.....	pp. 45
a) Características del Cultivar Seleccionado.....	pp. 45
b) Datos de Suelo y Fase Experimental de Campo.....	pp. 45
b.1) Datos de Suelo por Horizonte.....	pp. 47
b.2) Determinación Experimental del Límite Inferior de Agua Extraible por los Cultivares, Capacidad de Campo y Saturación.....	pp. 48
b.2.1) Límite Inferior de Agua Extraible por los Cultivares.....	pp. 55
b.2.2) Capacidad de Campo y Saturación.....	pp. 57
c) Información sobre Técnicas de Manejo.....	pp. 59

d) Base de Datos Climáticos.....	pp. 61
3.2. Escenarios de Cambios Climáticos.....	pp. 63
3.2.1. Escenarios del Taller PAN-EARTH/CEACT 1990...	pp. 63
3.2.2. Otros Escenarios Evaluados.....	pp. 66
a) Cambios Diferenciales en las Temperaturas Extremas Diarias.....	pp. 66
b) Disminución de Precipitación y Aumentos Térmicos y Radiativos Durante el Período de Floración y Polinización.....	pp. 67
c) Aumento de Precipitación en la Actual Epoca Seca.....	pp. 70
3.3. Síntesis de la Metodología Aplicada.....	pp. 77
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	pp. 80
4.1. Análisis de Sensibilidad.....	pp. 80
4.1.1. Efectos de los Cambios de Precipitación.....	pp. 80
4.2.2. Efectos de los Cambios de Radiación Solar....	pp. 83
4.3.3. Efectos de los Cambios de de Temperatura....	pp. 85
4.2. Variabilidad Climática Actual.....	pp. 97
4.3. Impacto de cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación.....	pp. 103
4.3.1. Incrementos Similares en las Temperaturas Extremas Diarias.....	pp. 103
a) Efecto Invernadero.....	pp. 103
b) Deforestación.....	pp. 108
c) Disminución de Precipitación y Aumento Térmico y Radiativo en el Período de Floración y Polinización.....	pp. 110

4.3.2. Incrementos Diferentes en las Temperaturas	
Extremas Diarias.....	pp. 112
4.3.3. Aumento de Precipitación en los Meses	
de la Actual Epoca Seca.....	pp. 115
C O N C L U S I O N E S.....	pp. 123
R E C O M E N D A C I O N E S.....	pp. 131
B I B L I O G R A F I A.....	pp. 136
A N E X O No. 1.....	pp. 137

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1: Cambios Climáticos para Venezuela por Efecto de Guerra Nuclear (Robock, 1990)

Tabla No. 2: Cambios de Radiación, Temperatura y Precipitación propuestos por Liverman et al. (1986)

Tabla No. 3: Escenarios de Cambios Climáticos del Taller PAN-EARTH/CEAT (1990)

Tabla No. 4: Respuestas (%) de Cultivares de Maíz ante Doble Concentración de CO_2 (Cure y Acock, 1986)

Tabla No. 5: Características de los Suelos del Jardín Botánico de la UNELLEZ en la Ciudad de Barinas y de la Colonia Agrícola de Turén (Hétier et al., 1989; Comerma, Juan, análisis de calicata)

Tabla No. 6: Contenido de Agua (%) en el Suelo del Jardín Botánico de la UNELLEZ en Barinas, en el Límite Inferior (LI), Capacidad de Campo (CC) y Saturación (SAT), Determinados por el Modelo CERES-Maíz y por Experimentos de Campo (Maytin, C. y Acevedo, D., 1990)

Tabla No. 7: Contenido Promedio de Agua (%) en el Límite Inferior para los Híbridos FM6 y Obregón (Delgado, 1988)

Tabla No. 8: Identificación de las Estaciones

Tabla No. 9: Características Pluviométricas, Térmicas y Radiativas de los Años Base en Turén

Tabla No. 10: Características Pluviométricas, Térmicas y Radiativas de los Años Base en Barinas

Tabla No. 11: Cambios Climáticos por Efecto Invernadero para la Época Pluviosa Propuestos en el Taller PAN-EARTH/CEAT (1990)

Tabla No. 12: Cambios de Temperatura ($^{\circ}C$) en un Clima $2 \times CO_2$ Sugeridos para Turén y Barinas por los GCMs GFDL, OSU, GISS y UKMO

Tabla No. 13: Relaciones de Cambio de Precipitación entre el Clima Actual y el Clima Bajo Efecto Invernadero ($2 \times CO_2$) Sugeridos para Turén y Barinas por los GCMs GFDL, OSU, GISS y UKMO

LISTA DE FIGURAS

- Figura No. 1: Localización de las Areas Seleccionadas.
- Figura No. 2: Promedios Diarios de Temperatura entre Mayo y Septiembre en Barinas y Turén.
- Figura No. 3: Comparación de Eventos Fenológicos del Maíz por el Modelo CERES-Maíz en Venezuela (Comerma et al, 1984)
- Figura No. 4: Validación de la Predicción de La Producción en el Modelo CERES-Maíz para Venezuela (Comerma et al, 1984; Zuvia, M., 1990).
- Figura No. 5: Relaciones de Cambio de Precipitación para el Mes de Agosto y Aumentos de Temperatura (°C) en Julio y Octubre por Efecto Invernadero en Barinas y Turén. Modelo UKMO.
- Figura No. 6: Variación de la Posición Latitudinal de las Altas Presiones Subtropicales del Hemisferio Norte Según las Diferencias de Temperatura Polo-Ecuador (Flohn, 1977).
- Figura No. 7.a: Cambios de Presión (mb) por Efecto Invernadero ($2 \times \text{CO}_2$) para el Centro y Norte de Suramérica. Modelo UKMO. Mes de Enero.
- Figura No. 7.b: Cambios de Presión (mb) por Efecto Invernadero ($2 \times \text{CO}_2$) para el Centro y Norte de Suramérica. Modelo UKMO. Mes de Abril.
- Figura No. 8: Metodología para la Evaluación del Impacto de Cambios Climáticos sobre el Cultivo de Maíz.
- Figura No. 9: Producción de PB-8 Según Cambios de Precipitación y Reservas Hídricas al Momento de Sembrar. Barinas (año base 1988).
- Figura No. 10: Producción de PB-8 Según Cambios de Precipitación y Reservas Hídricas al Momento de Sembrar. Turén (año base 1967).
- Figura No. 11: Producción de PB-8 Según Cambios de Precipitación y Reservas Hídricas al Momento de Sembrar. Barinas (año base 1989).
- Figura No. 12: Producción de PB-8 Según Cambios de Precipitación y de Reservas Hídricas al Momento de Sembrar. Turén (año base 1974).
- Figura No. 13: Número y Peso de Granos en el Híbrido PB-8 Según Cambios de Precipitación. Barinas (año base 1988, siembra con el 20% de agua aprovechable).

Figura No. 14: Número y Peso de Granos en el Híbrido PB-8 Según Cambios de Precipitación. Turén (año base 1974, siembra con el 20% de agua aprovechable).

Figura No. 15: Sensibilidad de la Producción del Híbrido PB-8 ante los Cambios Radiativos en Barinas y Turén.

Figura No. 16: Número de Granos por Mazorca del Híbrido PB-8 ante los Cambios Radiativos en Barinas y Turén.

Figura No. 17: Sensibilidad de la Producción del Híbrido PB-8 ante Cambios de la Temperatura Máxima en Turén.

Figura No. 18: Sensibilidad de la Producción del Híbrido PB-8 ante Cambios de la Temperatura Mínima en Barinas y Turén.

Figura No. 19: Tiempo de Llenado, Número y Peso de los Granos del Híbrido PB-8 ante Cambios en la Temperatura Máxima. Barinas (año base 1988).

Figura No. 20: Tiempo de Llenado, Número y Peso de los Granos del Híbrido PB-8 ante Cambios en la Temperatura Máxima. Turén (año base 1967).

Figura No. 21: Tiempo de Llenado, Número y Peso de los Granos del Híbrido PB-8 ante Cambios en la Temperatura Mínima. Barinas (año base 1988).

Figura No. 22: Tiempo de Llenado, Número y Peso de los Granos del Híbrido PB-8 ante Cambios en la Temperatura Mínima. Turén (año base 1967).

Figura No. 23: Tiempo entre Siembra y Algunas Fases Fenológicas Según Cambios de la Temperatura Máxima. Barinas (año base 1988).

Figura No. 24: Tiempo entre Siembra y Algunas Fases Fenológicas Según Cambios de la Temperatura Máxima. Turén (año base 1967).

Figura No. 25: Tiempo entre Siembra y Algunas Fases Fenológicas Según Cambios de la Temperatura Mínima. Barinas (año base 1988).

Figura No. 26: Tiempo entre Siembra y Algunas Fases Fenológicas Según Cambios de la Temperatura Mínima. Turén (año base 1967).

Figura No. 27: Producción del Híbrido PB-8 en Barinas Simulada por el Modelo CERES-Maíz. Variabilidad Climática Actual.

Figura No. 28: Producción del Híbrido PB-8 en Turén Simulada por el Modelo CERES-Maiz. Variabilidad Climática Actual.

Figura No. 29: Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos en el Híbrido PB-8. Barinas. Variabilidad Climática Actual.

Figura No. 30: Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos en el Híbrido PB-8. Turén. Variabilidad Climática Actual.

Figura No. 31: Impacto Productivo de Cambios Climáticos Por Efecto Invernadero o Deforestación sobre el Maíz Híbrido PB-8 en Barinas (cambios similares en temperaturas extremas).

Figura No. 32: Impacto Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación sobre el Maíz Híbrido PB-8 en Turén (cambios similares en temperaturas extremas).

Figura No. 33: Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Barinas (año base 1988)

Figura No. 34: Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Turén (año base 1967).

Figura No. 35: Impacto de Cambios Climáticos Por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Barinas (año base 1989).

Figura No. 36: Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Turén (año base 1981).

Figura No. 37: Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Barinas (año base 1981).

Figura No. 38: Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Turén (año base 1973).

Figura No. 39: Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Turén (año base 1974).

Figura No. 40: Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Tiempo de Llenado, Número y Peso de Granos de PB-8. Turén (año base 1983).

Figura No. 41: Impacto Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación sobre el maíz Híbrido CENIAP PB-8. (cambios similares en temperaturas extremas; siembra con 20% de agua aprovechable).

Figura No. 42: Impacto Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero sobre el Híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y Turén (siembra a capacidad de campo; comparación de efectos de escenarios de sensibilidad media del sistema climático que contemplan aumentos térmicos de 2.5 o 3.59 °C y de +20 o -25% en precipitación para el mes de agosto).

Figura No. 43: Impacto de Cambios en las Temperaturas Extremas Diarias sobre la Producción del Híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y Turén. Siembra a Capacidad de Campo.

Figura No. 44: Impacto de cambios en las Temperaturas Extremas Diarias sobre la Producción del Híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y Turén. Siembra con 20% de Agua Aprovechable.

1.- INTRODUCCION

La estrecha relación que existe entre las condiciones climáticas de un área y su desarrollo agrícola, se refleja para el caso de las zonas intertropicales estacionales en una variabilidad interanual de la producción que depende (asumiendo más o menos fijas ciertas cualidades de los suelos y de las técnicas de manejo) del comportamiento que adopten cada año variables climáticas como precipitación, radiación, temperatura, vientos y humedad (vapor de agua). En consecuencia, un cambio en las condiciones climáticas actuales probablemente genere respuestas en los cultivos que deben ser evaluadas, dada la importancia estratégica que para cualquier país tiene la producción de alimentos. En este sentido, y como se destaca a continuación, parecen existir apreciables posibilidades de que en el curso del próximo siglo, del cual nos separa sólo una década, se produzca un cambio en las condiciones climáticas globales. Esto hace prioritario implementar desde ahora investigaciones que evalúen los posibles efectos de esos cambios sobre los principales cultivos que se desarrollan en nuestro país.

1.1. Calentamiento Global (Efecto Invernadero)

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1989) cada año aumenta la concentración atmosférica de gases como el dióxido de carbono, el metano y los clorofluorocarbonados (CFC), los cuales, por sus

propiedades radiativas de absorción del calor proveniente de continentes y océanos, generarían un proceso de calentamiento global en la atmósfera (efecto invernadero).

Hansen et al. (1988) han planteado que ya se está produciendo el efecto invernadero, aunque un análisis crítico realizado por Solow y James (1989) en relación a las pruebas presentadas por los primeros, revela que se ignoró el hecho de que las series climáticas utilizadas presentan tendencias difícilmente atribuibles al dióxido de carbono, agregándose por otra parte el error de tomar como base de comparación al promedio del período climático de la serie, ya que si existe una tendencia lo correcto es comparar con el valor esperado de las temperaturas, y en este caso los resultados de Solow y James muestran que los supuestos años record de temperaturas y sus diferencias con los valores esperados de acuerdo a las tendencias, caen dentro de los rangos ya presentes en el clima actual o pasado, ya que a partir de la segunda mitad del siglo 20 y hasta 1935 hubo un número mayor de años (en relación a períodos de 10 años) con anomalías térmicas positivas al comparar con la década del 80 (6 vs. 4).

Independientemente de la veracidad de las conclusiones de Hansen et al., lo cierto es que para las próximas décadas se espera en términos absolutos que las temperaturas promedios globales se incrementen. En este sentido, se ha calculado en base a modelos de circulación general de la atmósfera (GCMs), que las temperaturas

globales podrían incrementarse entre 1.5 y 5 °C cuando se alcancen niveles duplicados de CO₂ atmosférico respecto a las concentraciones actuales, esperándose que a causa de ese calentamiento se produzcan variaciones en los patrones espaciales y temporales de la circulación general de la atmósfera, que se reflejarían como cambios en los regímenes de vientos, nubosidad (radiación), precipitación y demanda evapotranspirativa de la atmósfera y por una intensificación del ciclo hidrológico acompañada de una mayor frecuencia y magnitud de la variabilidad y de los extremos climáticos (Hansen, 1989).

1.2. Factores Adicionales que Inducen Cambios de Clima

También pueden originarse cambios climáticos por causas diferentes al incremento de gases de invernadero en la atmósfera, tales como el efecto de los aerosoles volcánicos, cambios en los parámetros solares, el proceso de deforestación en las regiones boscosas intertropicales y en especial de las ecuatoriales, la destrucción de la capa de ozono y hasta una posible guerra donde se detonen bombas nucleares:

-En el caso de las emisiones de grandes erupciones volcánicas, éstas producen un enfriamiento en los niveles bajos de la tropósfera que de acuerdo a Robock (1979) pueden persistir durante varias décadas a causa de la inercia térmica característica del sistema climático, estimándose (Robock, 1990) que parte de los cambios

globales de clima observados en los últimos 100 años se deben al efecto de dichas emisiones.

-La influencia de la variación de los parámetros solares ha sido propuesta por investigadores como Agee (1980), quien encontró una clara asociación entre el ciclo de explosiones solares de 80-90 años (ciclo de Gleissberg) y el comportamiento de las temperaturas del hemisferio norte desde 1890, las cuales se han caracterizado por un incremento promedio cercano a 19 C entre 1890 y 1940, para luego iniciarse una fase de enfriamiento que se estima no ha sido más notoria debido al efecto contrario que supuestamente estaría ejerciendo el dióxido de carbono. De ser correcta la asociación planteada, se debería tomar en cuenta que precisamente estamos ya en la fase ascendente del ciclo de Gleissberg con el máximo cercano al año 2030, lo que conjugado con el aumento de gases invernadero y una falta de actividad volcánica podría reforzar la tendencia de calentamiento atmosférico.

-A causa del proceso de deforestación de los bosques amazónicos y en general de los bosques intertropicales, se espera un clima más cálido y seco, estimándose (Shukla 1990, citado por Robock, 1990) que para áreas cercanas a Venezuela las temperaturas deben aumentar entre 1 y 1.5 9C, mientras que la precipitación anual podría disminuir entre un 25 y 30%.

-Los gases CFC ejercen un efecto destructivo en el ozono atmosférico, lo que favorece una mayor entrada de radiación

ultravioleta a la superficie de continentes y océanos. Además, ya se señaló que también contribuyen al calentamiento global junto al dióxido de carbono y el metano. Una disminución de la capa de ozono se podría traducir en un enfriamiento de ciertos niveles de la estratosfera donde este gas absorbe los rayos ultravioletas provenientes del sol. Este enfriamiento, combinado con el calentamiento de la troposfera debido al efecto invernadero, resulta de acuerdo a principios termodinámicos conocidos en una condición favorable a la inestabilidad de la tropósfera.

-A causa de una guerra nuclear se espera que por efecto de la gran cantidad de humo y hollin generado, disminuyan drásticamente los niveles de radiación, ocasionando que las temperaturas resultantes sean más bajas ("invierno nuclear"); esto a su vez favorecería una menor cantidad de precipitación, al limitar los procesos previos de evaporación de agua hacia la atmósfera. En este sentido, Robock (1990, op. cit.) ha propuesto para Venezuela los los escenarios de cambios climático de la tabla No. 1 (basados en el modelo OSU; Ghan et al., 1988):

Tabla No. 1: Cambios Climáticos para Venezuela por Efecto de Una Guerra Nuclear

Cantidad de Humo	Epoca del Año	Temperatura Máx.	Temperatura Mín.	Precipitación (%)	Radiación (%)
50 GT	Seca	-59C	-39C	-25	-25
	Pluviosa	-39C	-29C	-25	-25
150 GT	Seca	-109C	-59C	-50	-50
	Pluviosa	-59C	-39C	-50	-50

Se puede concluir entonces que existen reales posibilidades de que ocurran cambios climáticos a nivel global y en consecuencia posiblemente afectando al territorio venezolano, los cuales podrían tener diversos impactos de acuerdo al tipo de sistema afectado. En el caso de los ecosistemas, y entre éstos los AGROECOSISTEMAS, ya en nuestro país se ha resaltado la necesidad de evaluar dicho impacto a través de la implementación de investigaciones realizadas por equipos interdisciplinarios de científicos (Acevedo et al., compiladores 1989). Proyectos como PAN-EARTH (dentro del cual se enmarca la presente tesis de maestría) y El Hombre y la Biosfera, y más recientemente por el interés del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables y varias Universidades como la ULA, UCV, LUZ y la UDO, reflejan el creciente deseo de implementar procesos de investigación que permitan a nuestro país poder evaluar de manera consistente los posibles efectos de cambios climáticos a producirse en Venezuela; de esta manera, se podrán implementar estrategias que permitan adaptarnos mejor a dichos cambios.

1.3. Objetivos

Basado en lo anteriormente expuesto, la presente investigación tiene como **objetivo general** evaluar los posibles impactos de cambios climáticos sobre el cultivo del maíz (*Zea mays* L.) en Venezuela. Como **objetivo específico**, se busca evaluar los efectos de cambios

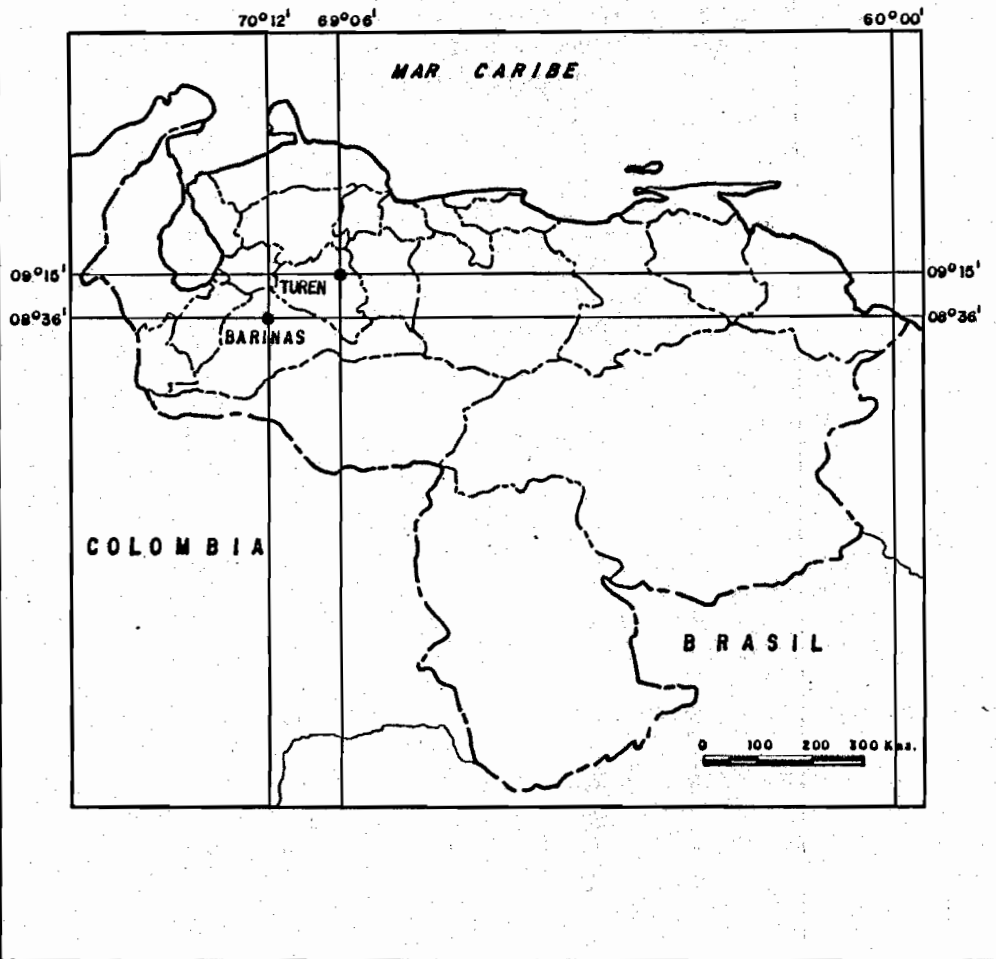
climáticos asociados al efecto invernadero y al proceso de deforestación sobre aspectos fenológicos y productivos del maíz híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y la Colonia Turén (figura 1), a través del modelo de simulación de tipo biofísico denominado CERES-Maíz (Jones y Kiniry, 1966).

1.4. Justificación del Cultivo y de las Áreas Seleccionadas

De acuerdo al Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP, 1984), el maíz es el principal cereal cultivado en Venezuela en cuanto a extensión areal, estimándose que cada año se siembran unas 500.000 hectáreas. Datos más recientes (OCEI, 1985) indican que para el período entre los años 1984 y 1985 se dedicaron al cultivo del maíz unas 721.031 hectáreas a nivel nacional, lo que nos sugiere un incremento respecto a las cifras aportadas por el FONAIAP.

Del total nacional de tierras cultivadas, es el estado Guárico el que más aporta con unas 203.933 hectáreas, seguido por el estado Portuguesa con 103.983, el estado Bolívar con 49.805 y el estado Barinas en el cuarto lugar con 48.371 hectáreas, lo que nos deja ver la importancia que tiene el cultivo del maíz en los estados Portuguesa y Barinas. Por otra parte, y en el caso específico de la Colonia Agrícola de Turén, es conocido que ésta ha sido desde inicios de la década de los años cincuenta un sector de gran desarrollo agrícola debido a la calidad de sus suelos, aunque la explotación continúa de los mismos

FIGURA N° 1
LOCALIDADES SELECCIONADAS: COLONIA TUREN Y CIUDAD DE BARINAS



durante varias décadas y por efecto del gran peso de las maquinarias que se utilizan para la preparación de la tierra, se han producido problemas de compactación que limitan los rendimientos (Comerma, 1989). Otro criterio de selección de la Colonia Agrícola de Turén como área de estudio, fue el que constituye uno de los sectores donde el FONAIAP tiene estaciones agroexperimentales, con lo cual los resultados generados podrán ser utilizados por los investigadores de dicha institución y en general servir para la implementación de estrategias que, como ya se señaló, nos permitan una mejor adaptación a los cambios climáticos que podrían producirse en relativamente poco tiempo.

En el caso de la ciudad de Barinas, su selección como área de estudio obedeció a que en sus alrededores se desarrollan suelos de Serie Barinas (Zinc y Stagno, 1966), los que a pesar de su baja fertilidad natural, presentan excelentes propiedades físicas que complementadas con las enmiendas adecuadas para corregir las limitantes de tipo químico, constituyen un recurso muy útil para el desarrollo de las actividades agrícolas. Otro criterio que determinó tal selección, estuvo asociado a las facilidades de contar con terrenos en el Jardín Botánico de la UNELLEZ, pertenecientes a la misma Serie Barinas, en donde se desarrollaban parcelas experimentales por parte del Convenio ULA-ORSTOM, lo que permitió realizar una fase experimental de campo para investigar aspectos de interés.

2.- ANTECEDENTES

A continuación se comentan los resultados de algunas referencias bibliográficas asociadas a la evaluación de los impactos de cambios climáticos en el cultivo del maíz, la mayoría de las cuales se asocian a investigaciones realizadas en latitudes medias y altas, dado que sólo recientemente este tipo de estudio se ha comenzado a implementar en países de latitudes intertropicales y no existe todavía en el nuestro resultados publicados de investigaciones detalladas sobre tal temática.

Esta revisión bibliográfica incluye también algunos comentarios acerca de referencias que no tuvieron como objetivo específico la evaluación de impactos de cambios climáticos en los cultivos, pero que sí aportan conclusiones valiosas para la comprensión de las posibles respuestas de estos últimos ante dichos cambios. Por otra parte, si bien en nuestra investigación no se evaluó el efecto directo que puede tener el incremento de CO_2 atmosférico en el cultivo de maíz, se comentan algunas referencias asociadas a tal temática, ya que de esta forma podemos tener una idea acerca del grado de error de los resultados generados, al no incluir los efectos directos asociados al incremento de CO_2 .

De acuerdo a Stanley et. al. (1968), estudios sobre las influencias de las variables climáticas en la producción de maíz basados en técnicas estadísticas avanzadas, se han realizado por lo menos desde la segunda década del presente siglo (véase por ejemplo a Wallace, 1920). Sin embargo, es desde el inicio de la década de los años cincuenta cuando la UNESCO, a través de su Programa de las Zonas Áridas, promueve el análisis del impacto de los cambios climáticos en la agricultura.

Posteriormente, a sugerencia y en coordinación con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la UNESCO organizó en 1961 la primera reunión internacional acerca del problema de los cambios climáticos, incluyendo lo relativo al efecto de dichos cambios en las actividades humanas, entre ellas las actividades agrícolas. Ninguno de los trabajos presentados en esa reunión científica incluye los efectos sobre el cultivo de maíz; no obstante, se llegó a la importante conclusión de que resultaba prioritario evaluar en forma detallada los efectos que tienen una amplia gama de variaciones climáticas en las características biológicas y económicas de los agroecosistemas. Entre tales variaciones destacan:

- a) Cambios mayores asociados a secuencias de eventos glaciales e interglaciales;
- b) Cambios menores que persisten en periodos de 100 a 300 años;

c) Variaciones o tendencias experimentadas entre 10 y 50 años;

d) Cambios inducidos por las actividades humanas, con período de ocurrencia asociados a los tipos b y c.

Por otra parte, también se hizo énfasis en el hecho de que el mayor interés de las evaluaciones debería estar centrado en los cambios que ocurren en períodos de 10 a 50 años, ya que son los que tienen a menudo los efectos más importantes para una buena planificación de las actividades agrícolas, ya explican gran parte de la variabilidad de la producción de los cultivos, sobre todo cuando se logra mantener niveles tecnológicos más o menos constantes.

Gram (1985), en un estudio sobre la sensibilidad de la producción agrícola ante los cambios de clima a nivel global, señala que el maíz es un cultivo prioritario para la evaluación de sus respuestas productivas ante dichos cambios, a causa de su gran extensión areal a nivel mundial (el tercero en importancia después del trigo y el arroz, con unas 134 millones de hectáreas cultivadas cada año, lo que representa cerca de un 14.5% del área total cultivada en el mundo) y a causa de su importancia como fuente de alimentos en las regiones donde se produce. Por otra parte, las mayores áreas de riesgo se localizarían en dos sectores: los intertrópicos semiáridos y estacionales, por su alta variabilidad interanual de la precipitación y tomándose en cuenta que los cambios de clima pueden

incrementar esa variabilidad; las zonas de latitudes medias y altas, donde un aumento de 1 °C significaría una expansión hacia el norte del área cultivada con maíz a costa de las actuales zonas productoras de trigo.

Según Katz (1977), los primeros intentos sistemáticos de medir el impacto de los cambios climáticos en la agricultura se desarrollan sólo a partir de la década de los sesenta, cuando Thompson (1967), presenta un modelo estadístico que asocia las variaciones de la producción de los cereales en Estados Unidos a los posibles efectos de cambios climáticos inadvertidos causados por el vuelo de aviones supersónicos.

Neild et al. (1979), presentaron algunos resultados sobre el efecto de cambios térmicos en el cultivo del maíz, estableciendo que para la región donde se cultiva maíz en Norteamérica 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. Sin embargo, los incrementos térmicos tenderían a provocar un mayor riesgo de heladas al inicio de la estación de crecimiento, lo que haría inferir erróneamente que se ha producido una fase de enfriamiento. 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, para evitar el riesgo de las heladas en las primeras etapas del ciclo del cultivo. Así mismo, lograron determinar que para cambios térmicos de magnitud similar pero de sentido contrario, las fases de enfriamiento tienen mayor efecto, ya que la contracción de la estación de crecimiento por esta causa es mayor que la expansión asociada a las fases de calentamiento, sugiriendo además que una disminución de las temperaturas en verano sería favorable para lograr mayores rendimientos en el maíz.

En el mismo año de 1979, Bach concluye que para el sur del área donde se cultiva maíz en los Estados Unidos el mejor tipo de cambio climático sería aquel que combine disminución térmica con aumento de precipitación, ya que encontró que por cada grado de aumento en las temperaturas se produce una reducción de producción del 11%, mientras que una disminución de la precipitación del 10% significa una reducción de producción de 1.5%. Como puede observarse, los efectos térmicos son más marcados que los de la precipitación.

Los resultados reseñados anteriormente, concuerdan con los de Stanley et. al. (op. cit.), en el sentido de que para áreas de latitudes medias y altas el factor temperatura juega un papel determinante como elemento causal de la dinámica fenológica y productiva del maíz, habiéndose encontrado que los niveles térmicos durante el mes de agosto son los que mayormente determinan los

rendimientos finales en los EE.UU ($r = -0.69$), seguido por la acumulación de calor (grados días) durante los meses de julio y agosto ($r = -0.61$). Los efectos de la falta de agua y prácticas tecnológicas como fertilización nitrogenada, fecha y densidad de plantado, parecen jugar un papel menos importante en la determinación de los rendimientos finales de los cultivos de maíz. Oram (1985) ha llegado a conclusiones similares, destacando que en general para la agricultura de latitudes medias y altas los efectos de las tendencias térmicas son los más cruciales en la determinación de los rendimientos finales, mientras que para latitudes intertropicales es el factor hídrico el más importante, excepto a elevadas altitudes, donde el factor temperatura pasa a ser el más importante.

Desde 1971 Peter et al. habían mostrado que el aumento en las temperaturas mínimas reduce la producción por hectáreas en los cultivos de maíz, a causa de sus efectos sobre las tasas respiratorias que, como se sabe, consumen parte de lo producido por la fotosíntesis impidiendo un llenado de los granos en forma más efectiva.

Duncan et. al (1973) separan los efectos de la temperatura sobre la fotosíntesis de los cultivos en dos clases: la primera asociada al efecto directo de las temperaturas foliares sobre las tasas de fotosíntesis por unidad de superficie, estableciendo que hay poca producción fotosintética debajo de 10 °C. y que las tasas se

aproximan a un máximo cercano a los 33 °C., después de lo cual se nota una disminución de manera lineal. La otra forma de efecto de las temperaturas sobre los niveles de fotosíntesis, sería a través de su influencia en la velocidad de desarrollo fenológico, ya que la duración de las fases varía de acuerdo a los cambios térmicos, lo que hace que dichas fases puedan desarrollarse en diferentes condiciones microclimáticas que afectarán también de manera diferencial el desarrollo del cultivo; por ejemplo, un desarrollo floral y polinización más temprana a causa de un incremento térmico, puede significar que el cultivo desarrolle esos procesos cuando los niveles de radiación o de agua en el suelo no sean los más adecuados o viceversa.

La sensibilidad de los cultivos de maíz ante las variables térmicas también ha sido destacada por Palmer (1973), quien señala el hecho de que si bien dicho cultivo a nivel general se desarrolla en un amplio rango latitudinal y altitudinal (55N-50S, hasta los 2800-3000 m.s.n.m.), cuando se trata de variedades o híbridos específicos tal amplitud desaparece. En este sentido, se señala que el cultivo del maíz presenta poca capacidad de adaptación a cambios de altura (cambios térmicos) manteniéndose la latitud constante. Además, destaca que cuando variedades o híbridos tropicales se cultivan en latitudes medias o altas, se alarga demasiado el desarrollo vegetativo, el cual a menudo es exuberante, pero fallando o retardándose demasiado el

proceso de floración, lo que no permite lograr un llenado de los granos y su madurez lo suficientemente rápido para que se pueda evitar así el riesgo que representan las heladas hacia el final del ciclo del cultivo. Por su parte, para el caso de las variedades o híbridos de latitudes extratropicales que se hacen crecer en bajas latitudes, el autor citado reporta problemas de baja producción asociados a un acortamiento de la fase que va entre el inicio del llenado de los granos y la madurez fisiológica, debido al exceso de grados días de calor acumulados en corto tiempo.

Se debe aclarar que en estos casos donde hay cambios latitudinales marcados, no sólo la temperatura sino también la sensibilidad a cambios en la duración del día (sensibilidad al fotoperíodo) constituye un factor de importancia para explicar las respuestas observadas en el cultivo del maíz.

Duncan et al. (1968) evaluaron los efectos de varios cambios de temperatura (de 15 a 36 °C., $\Delta T = 3$ °C.) en 22 razas de maíz que crecen en diferentes rangos altitudinales y entre las que se encuentran algunas que se desarrollan en los intertrópicos a baja altitud. Los resultados más resaltantes de tal investigación son los siguientes:

- A altas temperaturas (>30 °C) las mayores tasas de fotosíntesis neta corresponden a las variedades o híbridos de baja altitud, con un óptimo que por lo general se sitúa cercano a los 33 °C., ya que a 36 grados se nota lo que parece ser la tendencia al inicio de una disminución de la

fotosíntesis neta;

- Sólo ciertos híbridos modernos mostraron altas tasas de fotosíntesis en todos los rangos de variación de la temperatura, característica de gran valor adaptativo para aminorar los efectos de cambios climáticos que signifiquen aumentos de temperatura;

- El Teosinte, uno de los probables antecesores silvestres del maíz domesticado, mostró los niveles más bajos de producción neta a altas temperaturas, mientras que la variedad Tuxpeño, una de las líneas genéticas del híbrido venezolano PB-8, seleccionado para estudio en la presente tesis, mostró tasas de fotosíntesis neta de 56 y 54 Mg de CO_2 por dm^2 de área foliar y por hora, para las temperaturas de 33 y 36 $^{\circ}\text{C}$ respectivamente (óptimo a 33 $^{\circ}\text{C}$), aunque menores que las reportadas para el híbrido OH45xK4, que a 36 $^{\circ}\text{C}$. mostró tasas de fotosíntesis neta de 60 Mg $\text{CO}_2/\text{dm}^2/\text{hora}$;

- El número de hojas se incrementa al aumentar la temperatura, al tiempo que el inicio de la afloración se adelanta;

- A nivel general, las mayores diferencias entre razas de maíz se producen entre elementos que crecen a diferentes rangos altitudinales, lo que concuerda con la ya señalada sensibilidad de los cultivares de maíz a la temperatura. Welhausen (1957) ya había concluido que la variación de altitud, por efecto de los cambios térmicos que induce, es el principal factor segregante de

las diferencias metabólicas en los cultivos de maíz que crecen en diferentes rangos altitudinales en América Central y América del Sur, desde 0 a 3000 m.s.n.m.

Liverman et al. (1986) evaluaron cambios climáticos que incluyen variaciones en la radiación solar, temperaturas extremas diarias y precipitación, tal como se muestra en el cuadro siguiente:

Tabla No. 2: Cambios de Radiación, Temperatura y Precipitación propuestos por Liverman et al. (1986)

Radiación (%)	Temperatura (°C)	Precipitación (%)
+50	+5.0	+50
+25	+2.5	+25
-25	-2.5	-25
-50	-5.0	-50

En base a los datos de la tabla 2 se obtuvieron 124 combinaciones posibles de cambios en las variables climáticas, los cuales fueron simulados en sus efectos sobre la fenología y productividad del maíz, a través del modelo YIELD (Hayes et al. 1982) y bajo dos condiciones de manejo hídrico: riego y cultivos bajo precipitación (secano). Los resultados más importantes fueron:

- Los incrementos térmicos por si solos causan una disminución de producción, aunque si se combinan con menor radiación el efecto negativo es mayor. Las reducciones con aumentos térmicos de 5 grados centígrados está entre -79 y -85% en cultivos bajo riego;

- Para los cultivos sin riego las mayores reducciones de producción se dan en los escenarios de alta temperatura y radiación combinado con falta de agua;

- Los mayores cambios de producción se producen cuando se simulan altos niveles de radiación combinado con el cambio de las otras dos variables, ya que a bajo niveles de radiación las diferencias tienden a minimizarse, inclusive cuando se comparan cultivos regados o no;

- Un incremento de temperatura si bien causa reducción de producción, permite cultivar más de una vez, ya que se acorta el tiempo de cada ciclo individual. De esta manera, un incremento de 2.5 °C permite un ciclo adicional, mientras que un incremento de 5 °C permite otro. Se debe destacar el interesante comportamiento productivo de cada ciclo sucesivo, ya que se logra un aumento de producción debido a que las condiciones microclimáticas mejoran al disminuir las temperaturas al pasarse de un ciclo al siguiente, siendo esto más notable bajo escenarios de cambio que impliquen alta radiación, ya que un clima nuboso y de poca radiación a pesar de que permite las tres cosechas si el incremento térmico es de +5 °C, genera aumentos de producción sucesivos que no son significativos;

- El mejor tipo de cambio climático sería aquel que combine una disminución de las temperaturas prevaletentes en la Gran Planicie con incremento de radiación para los cultivos regados, agregándose mayor precipitación para los

cultivos no regados. Estos resultados concuerdan con los ya reseñados en Bach y Neild et al. (op. cit.);

- Las reducciones de producción por efecto de aumentos térmicos son mayores que los aumentos que se logran al disminuir las temperaturas (-79 a -85% Vs. +30 a +50%);

- Por último, los escenarios de cambio climático que proponen aumentos de radiación en un 50%, generan respuestas productivas que implican mayor producción que las condiciones bases (datos climáticos sin modificación), y aún a pesar de los incrementos térmicos. Esto parece indicar que en la Gran Planicie de norteamérica, a pesar de ser un lugar semiárido, los niveles radiativos actuales son subóptimos para el cultivo del maíz, lo que quizás esté asociado a causas latitudinales.

Wilks (1988) basado en los escenarios de cambio climático sugeridos por el GCM OSU (Oregon State University), y utilizando el modelo biofísico de simulación CORNF (Staper y Arkin, 1980), analizó el impacto que esos escenarios de cambio podrían generar en los aspectos fenológicos y productivos en la zona donde se cultiva maíz en EE.UU. Sus principales resultados fueron los siguientes:

- Para el oeste y centro de Kansas, se nota una disminución de producción a causa de una combinación de incremento térmico (+5 °C) con menor precipitación (aumenta la probabilidad de un mayor número de días sin precipitación durante los meses de verano, sobre todo julio, afectando los procesos de floración y polinización);

- Para el mismo sector anteriormente señalado, se logra mayor producción si se midifican las fechas de sembrado de manera tal que los procesos de floración y polinización se corran hasta mediados de agosto, aunque de todas maneras subsisten problemas por falta de agua que de ser solucionados implicarían mejores incrementos de producción respecto a las fechas de siembra inicialmente seleccionadas;

- Para el norte y sur de Dakota (la Región del Trigo de Primavera), se nota un incremento de producción debido al aumento de las precipitaciones en un área que en la actualidad sufre de poco suministro de agua a los cultivos, combinado con el hecho de que las temperaturas por ser hoy en día subóptimas para el cultivo del maíz, llegan a niveles más adecuados al incrementarse. Sin embargo, se destaca que en algunos sectores los incrementos de producción no parecen ser suficientes como para que sea rentable cultivar el maíz, aunque también se señala que debido a que el cultivo más común en el área (trigo de primavera) presenta tendencia a la disminución de la productividad bajo los mismos escenarios de cambios climáticos, se podría producir en el futuro un desplazamiento del trigo por el maíz;

- En la región donde se cultiva maíz (oeste y centro de Iowa) se presentan dos tipos de respuestas productivas: una que implica un aumento en la producción, localizada hacia el sector noreste, lo que se logra por efecto de la evasión

de las altas temperaturas de julio al sembrarse más tarde que lo de costumbre en el área, mientras que para el resto del área se nota una disminución de producción, a causa de la combinación de incrementos térmicos y menor número de días con precipitación.

En base a los resultados anteriores, Wilks concluye que a nivel general los escenarios de cambios climáticos propuestos por el modelo OSU, generarían cambios en los patrones de distribución espacial de las áreas actualmente cultivadas con maíz o trigo, produciéndose una tendencia de desplazamiento hacia el norte por parte del maíz en sectores donde se predice aumentos de producción, a costa de las áreas tradicionales del trigo de primavera que, como se señaló, muestra una tendencia a la disminución de la producción bajo los mismos escenarios de cambios climáticos.

Smith et al. (1989) llegaron a conclusiones más o menos similares que las de Wilks (1988) y Oram (1985), sobre un desplazamiento hacia el norte de las áreas cultivadas de maíz a causa de los aumentos térmicos, pero para el área de Ontario en Canadá. Sus resultados, basados en escenarios de cambios climáticos propuestos por el modelo GISS, indican que el impacto sobre el maíz es de considerable magnitud, ya que en las áreas más norteñas donde actualmente no se puede desarrollar el cultivo a causa de las bajas temperaturas prevaecientes, el incremento térmico esperado, cercano a 1.9 grados

centígrados, haría posible el desarrollo del maíz con producciones de más de 6000 Kg/ha, lo que resultaría bastante rentable. 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 significarían que en un 70% del territorio se podrá cultivar el maíz.

Un primer intento de evaluar los 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, por parte del estudio de caso Venezuela del Proyecto PAN-EARTH y el FONAIAP (PAN-EARTH PROJECT, 1989). Se evaluó 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 la base de datos 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.

Una evaluación más completa sobre las respuestas productivas del maíz a causa de cambios climáticos asociados al efecto invernadero, 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 (PAN-EARTH/CEAT, 1990). Los escenarios de cambio climático y los resultados de su impacto productivo en el híbrido venezolano Obregón, se sintetizan en la tabla No. 3 (escenarios para la época lluviosa: abril a noviembre):

Tabla No. 3: Escenarios de Cambios Climáticos del Taller PAN-EARTH/CEAT (1990)

T. Máx.	T. Min.	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%

En la tabla No. 3 se puede observar que cualquiera de los tres escenarios de cambios climáticos considerados causan una disminución de producción. 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 producción son la temperatura y la radiación. Un incremento térmico de +3.5 °C, asumiendo que los aumentos de precipitación no afectan los niveles

productivos, causan una reducción de 25% en la producción, mientras que si se agrega menor radiación solar (-20%), las reducciones de producción alcanzarían hasta un 40%, lo que parece ser bastante significativo en un país como el nuestro, donde los promedios de producción son bastante bajos (1500 a 2000 Kg/ha).

Hasta ahora sólo se han reseñado investigaciones que no toman en cuenta el efecto directo de un incremento de los niveles de CO_2 en la fisiología de los cultivos. En este sentido, Rosenberg (1981) fue uno de los primeros en resaltar la importancia que para la evaluación real de los efectos de cambios climáticos futuros, tiene la consideración de las respuestas de los cultivos al incremento del CO_2 atmosférico. Este investigador señala que sin incluir otros factores climáticos, un incremento de CO_2 debería significar un aumento general de la productividad agrícola, pero sobre todo en plantas con mecanismo fotosintético C_3 , debido a que su punto de compensación de CO_2 es mucho más alto que el de las plantas tipo C_4 (50 ppm vs. 10ppm). Además, Rosenberg recalca que un efecto adicional beneficioso sobre las plantas C_3 sería el asociado a una disminución de las tasas de fotorespiración, a causa de que este proceso es dependiente de la competencia entre el CO_2 y el O_2 por los sitios enzimáticos donde se producen las principales reacciones de dicho proceso, tal como lo estableció Cholett en 1977 (citado por Rosenberg, 1981).

Ya desde 1961 Moss et al. habían demostrado que un incremento en los niveles de CO_2 atmosférico desde 200 a 400 ppm, tiene poco efecto sobre la tasas de fotosíntesis en el cultivo del maíz. Aunque también se debe señalar el más marcado efecto sobre las tasas de transpiración debido al cierre estomático. En este sentido, Rosenberg (op cit), destaca el hecho de que bajo un incremento de CO_2 se nota tanto en las plantas C_3 como en las C_4 una mejora en la eficiencia del uso de agua, aunque por mecanismos diferentes, ya que en el caso de las plantas C_3 esta mejora se logra por un aumento de los niveles de fotosíntesis sin variar mucho los niveles de transpiración, mientras que en las plantas C_4 el aumento en la eficiencia del uso de agua se logra por una notable disminución de las tasas de transpiración sin variar mucho las de fotosíntesis. En los dos casos, pero en especial para el mecanismo tipo C_4 , este aumento en la eficiencia del uso de agua resulta en una ventaja adicional, sobre todo para escenarios de cambio climático que impliquen una disminución de las disponibilidades hídricas, como serían los asociados a la deforestación de los bosques intertropicales.

Peart et al. (1989) han destacado que no existe en la actualidad consenso total en relación a las respuestas de los cultivos a los efectos combinados de una variación en los niveles de CO_2 (incremento) y otras variables atmosféricas como la temperatura, radiación y precipitación.

Van Keulen (1981, citado por Peart et al. 1989) plantea que el factor clave en las respuestas de los cultivos ante el incremento del CO_2 atmosférico es el control estomático, debiéndose separar entre efectos a corto plazo y a más largo plazo:

- Un efecto inmediato es que bajo altos niveles de CO_2 la resistencia estomática se incrementa y las plantas tienden a perder menos agua. Sin embargo, el decrecimiento anticipado del uso del agua es moderado por el incremento en la temperatura foliar, debido al menor enfriamiento por la reducción de las tasas de transpiración, lo que a su vez causaría un incremento de la presión de vapor de agua en las hojas;

- El incremento de los niveles de CO_2 atmosférico aumenta los gradientes de difusión de dicho gas, lo que implicaría un aumento de fotosíntesis, a menos que el cierre estomático sea muy severo, lo que depende de si el cultivo es de mecanismo fotosintético tipo C_3 o C_4 . En este sentido, las plantas C_4 se han notado mucho más sensibles que las C_3 ante un incremento de los niveles de CO_2 , sobre todo si no hay adecuada iluminación, ya que en este caso el cierre estomático y el consecuente aumento de la resistencia a la difusión de gases atmosféricos se hace crítico (Downes, 1970; Akita et al., 1972; Rosenberg, 1981 y 1982). Este resultado es de gran importancia a la hora de considerar los posibles efectos de escenarios de cambios climáticos que combinen mayores niveles de CO_2 y nubosidad

(menor radiación), tal como se espera para los intertrópicos según ciertas propuestas asociadas a cambios climáticos por efecto invernadero que serán detalladas más adelante;

- A largo plazo, el aumento de fotosíntesis bajo niveles de radiación adecuados e incremento de CO_2 , debe favorecer las tasas de producción de biomasa, variando el almacenaje de almidón y el peso específico de las hojas. Por otra parte, las hojas deberían crecer más rápido aumentando su capacidad de captar radiación solar, lo que provocaría tasas de transpiración mayores que las que se producen si sólo se considera el cierre estomático a corto plazo.

Cure y Acock (1986) realizaron una extensa revisión bibliográfica acerca de investigaciones en que se evaluaron las respuestas del maíz ante una concentración doble de CO_2 . Los principales resultados se muestran en la tabla No. 4

Tabla No. 4:
Respuestas (%) de Cultivares de Maíz
ante Doble Concentración de CO_2

Tasa neta de Intercambio de Carbono a Corto plazo	+26, + o - 9
Igual que lo anterior pero ya aclimatado	+4, + o - 13
Conductancia	-37, + o - 7
Transpiración	-26, + o - 6
Producción	+29, + o -64

Los resultados de la tabla No. 4 muestran que si bien la respuesta inicial de las tasas netas de intercambio de carbono son realmente significativas, se puede notar como disminuyen cuando se produce la aclimatación (después de una semana de estar expuesto a las 680 ppm. de CO_2). Se observa también que la disminución porcentual de la transpiración es menor que la de conductancia estomática, lo que se asoció al hecho de que se produce un aumento del área foliar, lo que a su vez implica una mayor captación de energía. Por último, se nota un aumento de producción (bastante similar al de biomasa) que resulta algo significativo, por lo menos si se compara con las disminuciones de producción que se reportaron anteriormente para el híbrido Obregón. No obstante, hay que tomar en cuenta que en aquel caso se variaron los niveles térmicos y radiativos hacia niveles críticos por sus efectos negativos en la producción, aunque también se debe destacar que Cure y Acock señalan que a altas temperaturas se observó una mayor respuesta de los cultivos al incremento de los niveles de CO_2 .

Por otra parte, resulta bastante alta la variabilidad de las desviaciones que pueden encontrarse en relación a las respuestas productivas (+ o - 64%), lo que es de importancia ya que esa variabilidad se asocia a las diferencias de sensibilidad de los cultivares evaluados ante el incremento del CO_2 atmosférico; es decir, que a pesar del carácter C_4 del maíz, pueden existir híbridos o

variedades que responden significativamente ante dicho incremento, lo que obliga a evaluar con experimentos si el cultivar seleccionado para estudio de efectos de cambios climáticos corresponde a un tipo de alta sensibilidad.

Un estudio de evaluación de los efectos directos e indirectos de incrementos de CO_2 atmosférico en el cultivo del maíz, a través del modelo de simulación CERES-Maíz, fue realizado por Peart et al. (1989, op. cit.). El modelo CERES-Maíz, que es el que se va a utilizar en la presente tesis, fue modificado para que simulara los efectos directos del CO_2 ; es decir, para que incrementara los niveles de fotosíntesis diarias al tiempo que la transpiración disminuye a causa del cierre estomático. Los principales resultados fueron los siguientes:

- El cultivo del maíz es poco sensible a los efectos de un incremento de los niveles de CO_2 (se usó doble concentración respecto a los niveles actuales, aproximadamente unos 625 ppmv). Esto se evidenció al no presentarse diferencias significativas entre las simulaciones basadas en escenarios de cambios climáticos que sólo tomaron en cuenta los efectos indirectos, con aquellas en que se aumentaron los niveles de CO_2 , aunque se notó cierto aumento de producción para este último caso, pero muy leve como para aminorar los efectos negativos de los incrementos térmicos combinados con disminución de las precipitaciones (no se cambió la radiación solar);

- Los mayores efectos negativos desde el punto de vista productivo se asociaron a tasas de respiración incrementadas y al acortamiento del tiempo de llenado de los granos a causa de los incrementos térmicos, sobre todo en las áreas de los EE.UU actualmente más cálidas (sur de los EE.UU);

- Se notó un aumento en la eficiencia del uso de agua, aunque se produjo una disminución en algunas áreas.

Otro estudio donde se evaluaron los efectos directos del incremento de CO_2 atmosférico combinados con los efectos propiamente climáticos (efectos directos + indirectos), sobre la productividad del cultivo del maíz, fue realizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1989). Se utilizaron escenarios de cambios climáticos basados en las simulaciones de los modelos GISS y GFDL, encontrándose que las diferencias entre los efectos indirectos y aquellos que incluyen la influencia del incremento de CO_2 no pasan de 6%, lo que apoya de nuevo la idea de que el cultivo del maíz no es muy influenciado desde el punto de vista productivo por el aumento de la concentración de CO_2 atmosférico. En general se encontró que para todos los sectores estudiados los cambios climáticos propuestos causarían una disminución de la producción, cuyo mayor impacto alcanzaría hasta un 41% de reducción (para la región de la Costa Sur en Los Angeles) sólo tomando en cuenta los efectos directos, mientras que esa cifra baja a un 37% al incluir el efecto

benéfico del incremento de CO_2 .

Se puede concluir en relación a los posibles efectos directos de un incremento en la concentración de CO_2 en la atmósfera, que el cultivo del maíz por su carácter de planta con metabolismo fotosintético C_4 , en ciertos casos no parece ser muy influenciado en sus niveles productivos, sobre todo cuando se produce una aclimatación a las altas concentraciones de CO_2 . Sin embargo, ya se destacó que la revisión bibliográfica de Cure y Acock muestra que ciertos híbridos y/o variedades de maíz pueden tener una respuesta productiva significativa ante los incrementos del CO_2 atmosférico, aunque en nuestra investigación no se contó ni con tiempo ni con otros medios para evaluar si el híbrido seleccionado pertenece a tal categoría de cultivos sensibles. No obstante, los investigadores citados también señalan que a nivel general los cultivos de maíz no son afectados por el incremento del CO_2 atmosférico, por lo cual asumimos que el grado de error que podemos cometer al ignorar los posibles efectos de tal incremento, no afectan de manera determinante nuestros resultados. En todo caso, las diferencias no pasarían de un 6 a 8% si nos basamos en los resultados aportados por las investigaciones de la EPA y Peart et al.

3.- METODOLOGIA

La evaluación del impacto de cambios climáticos en los cultivos supone al menos la disposición de tres elementos básicos: a) escenarios de cambios climáticos que sinteticen las posibles condiciones futuras del clima en un área determinada, b) un medio que permita evaluar el impacto de esas nuevas condiciones climáticas en los cultivos de interés, c) definición del tipo de sistema a ser impactado, ya que de sus características particulares depende una buena selección del medio que se utilice para evaluar el impacto de los cambios climáticos en dicho sistema; a su vez, este medio define qué tipo de información climática es necesaria (incluyendo su grado de detalle) para la generación de los escenarios de cambios climáticos (Robock, 1989).

A continuación se explican las principales características del medio que se utilizó para evaluar el posible impacto de los cambios climáticos en el cultivo de maíz, para luego referirnos a los métodos de generación de dichos escenarios. La definición del sistema ya se ha realizado en parte en la revisión bibliográfica (características generales de los cultivares de maíz incluyendo estudios acerca de su sensibilidad ante los cambios climáticos) completándose en esta sección otros aspectos de interés.

3.1. El Modelo CERES-Maíz y el Sistema DSSAT

3.1.1. Características generales

El principal instrumento metodológico utilizado en el presente trabajo para evaluar el posible impacto de los cambios climáticos en el cultivo de maíz, lo constituye un modelo de simulación de tipo biofísico denominado CERES-Maíz (Jones y Kiniry, 1986), el cual ha sido progresivamente desarrollado desde hace más de 20 años por el esfuerzo de investigación agroecológica en los Estados Unidos, bajo la dirección del Doctor J. T. Ritchie (Grassland, Soil and Water Research Laboratory of the United States Department of Agriculture). El modelo CERES-Maíz fue puesto a la disposición de la presente investigación por parte de la Coordinación del Proyecto PAN-EARTH en nuestro país (estudio de caso Venezuela).

El modelo CERES-Maíz en la versión que se dispuso se integra a un sistema denominado DSSAT (Decision Support System for Agrothechnology Transfer), el cual incluye otros modelos de cultivo (trigo, soya, mani, etc.). El sistema DSSAT constituye una de las principales herramientas del proyecto internacional IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrothechnology Transfer) para la transferencia de tecnología agrícola de un sitio de origen a otro por analogías. En Venezuela dicho proyecto se encuentra representado por el Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP).

Las funciones principales del sistema DSSAT son las siguientes:

- Ayudar a introducir, organizar y almacenar datos sobre cultivos, clima, suelo y técnicas de manejo;
- Recuperar y mostrar (gráficos) los datos anteriores;
- Ayudar a calibrar y validar los modelos de cultivo que incluye dicho sistema.

El modelo CERES-Maiz 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;

- En general, desarrollo de hojas, tallos, raíces y órganos reproductivos (flores masculinas y femeninas).

El modelo CERES-Maiz, aparte de los procesos descritos, simula la asimilación, transformación y distribución de nitrógeno, aunque en el presente trabajo se va a asumir que este macronutriente no es limitante (se asume fertilización óptima); es decir, se trabajó con la

versión que permite simular sólo los efectos del genotipo, clima y propiedades físicas del suelo sobre el crecimiento y producción del cultivo. La justificación para este procedimiento se basa en dos aspectos básicos: en primer lugar la validación de la versión nitrógeno para Venezuela hasta ahora no ha producido buenos resultados (Delgado, 1988); por otra parte, al omitir los efectos del nitrógeno se le da más peso al estudio de los efectos directos del clima, objetivo central de nuestra investigación. Se puede agregar que la mayoría de las investigaciones sobre efectos de cambios climáticos en el cultivo del maíz en las que se ha utilizado el modelo CERES-Maíz, se han realizado con la versión que no toma en cuenta los efectos del nitrógeno, por lo cual nuestros resultados serán más comparables.

En el anexo No. 1 se sintetizan los principales algoritmos que utiliza el modelo CERES-Maíz para simular el crecimiento, fenología y producción del cultivo; aspectos que son de interés para la evaluación del posible impacto de cambios climáticos.

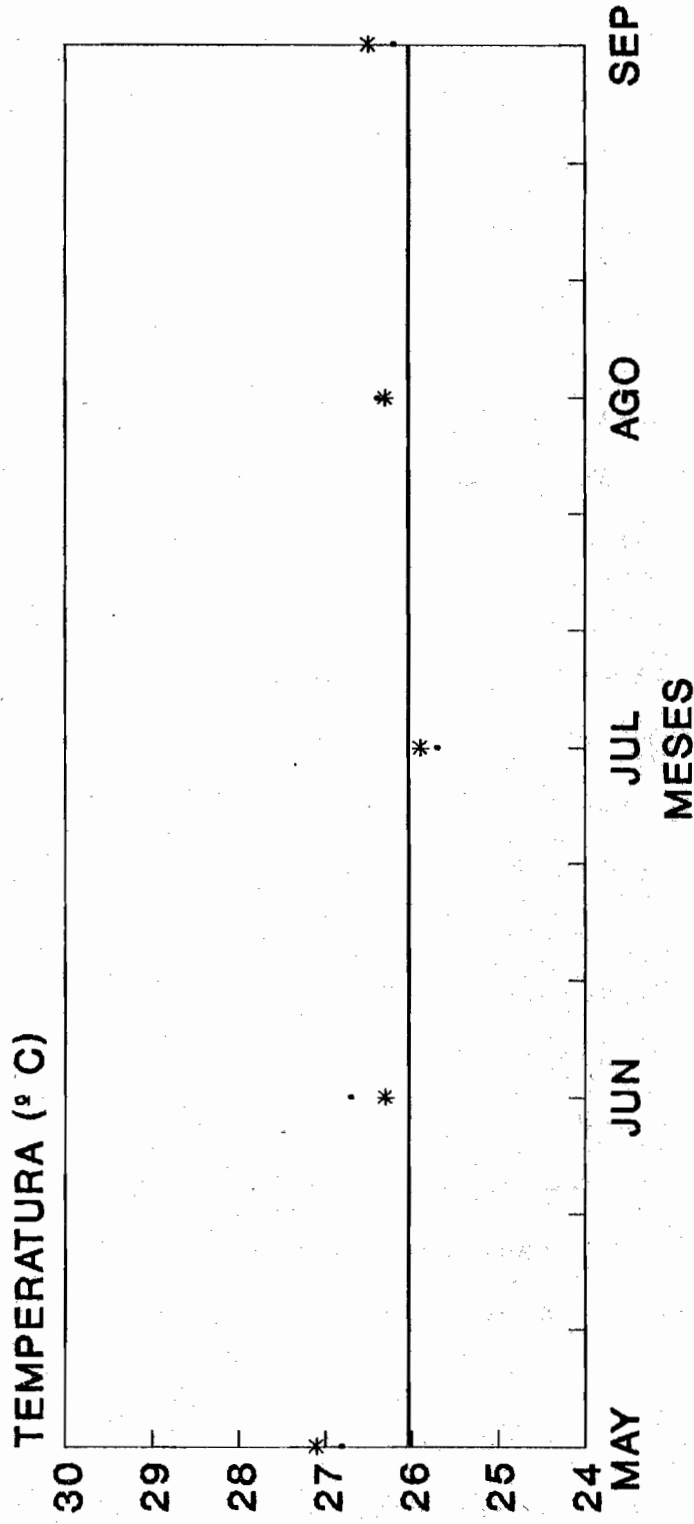
Una explicación más detallada de los fundamentos empíricos y teóricos del modelo escapa a los objetivos del presente trabajo; para esto remitimos al lector al manual de Jones y Kiniry (op. cit.). Sin embargo, se destacan a continuación algunos aspectos (hipótesis predictivas) de acuerdo a los algoritmos del modelo y el posible impacto de los cambios climáticos.

En general, se puede asumir que si las condiciones de los cambios climáticos son tales que las temperaturas extremas diarias se incrementan (como se espera para cambios climáticos por efecto invernadero y/o deforestación) la duración entre las fases fenológicas de los cultivares de maíz debe disminuir de acuerdo al concepto tradicional de velocidad de desarrollo y grados días acumulados (Ritchie y Hanway, 1982).

En especial resulta de interés analizar los efectos del acortamiento de la fase de llenado de granos que, como se señaló en la revisión bibliográfica, se ha utilizado para explicar en parte las disminuciones de producción observadas en áreas ya cálidas, al evaluarse escenarios de cambios climáticos que impliquen aumento térmico. Por otro lado, un acortamiento del periodo entre polinización y comienzo de llenado de granos se debería reflejar en un menor número de granos, ya que el modelo hace depender esta característica de la fotosíntesis neta acumulada durante dicho periodo.

El modelo CERES-Maíz asume que la temperatura media diaria óptima para un adecuado balance entre producción bruta y consumo por respiración es 26°C. En este sentido, las temperaturas promedios diarias del clima actual en Barinas y Turén son en la época tradicional de cultivo (mayo a septiembre) a menudo más altas que la citada (véase la figura No. 2). Esto quiere decir que si se incrementan los promedios térmicos actuales el efecto

FIG. 2 TEMPERATURA PROMEDIO DIARIA EN LOS MESES DE MAYO, JUNIO, JULIO, AGOSTO Y SEPTIEMBRE EN TUREN Y BARINAS.



LOCALIDAD
 · BARINAS * TUREN

FUENTE: MARNR, DIVISION DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA.

negativo sobre la producción debiera ser mayor.

En específico, según el modelo los incrementos térmicos diarios promedios superiores a 26°C aumentan las tasas respiratorias a niveles en que no se compensa el aumento de las tasas de fotosíntesis bruta, a lo que se debe agregar que las temperaturas máximas en el clima actual de Barinas y Turén están ya muy cercanas al óptimo tradicional para fotosíntesis en cultivos C₄ (33-34 °C). Si se aumentan las temperaturas máximas actuales por efectos de cambios climáticos, se promoverá en consecuencia un desbalance entre producción bruta y consumo por respiración.

A lo anterior se agrega que las temperaturas mínimas del clima actual (22-23 °C) están entre 4 y 6 °C por encima de lo que se considera óptimo desde el punto de vista productivo en maíces intertropicales (15-18 °C; Benacchio, 1983), aunque se debe destacar que el modelo CERES-Maíz pondera los efectos de las temperaturas mínimas sobre la respiración como menos determinantes al comparar con los de las temperaturas máximas (25% vs. 75%, anexo No. 1).

Una menor tasa neta de producción de materia seca a causa del incremento térmico implicará una menor superficie fotosintetizante (hojas más pequeñas). Esto a su vez se combinará con el acortamiento ya citado de la fase entre polinización y comienzo de llenado de los granos (lo que contribuye también al menor número de granos) y del posterior período de llenado de los granos, resultando así

un conjunto de procesos que tienden todos consistentemente a generar condiciones favorables a una reducción de los niveles productivos óptimos.

c) En cuanto a los efectos del elemento radiación, se tiene que de acuerdo a los niveles iniciales que sirvan como marco de referencia para evaluar el efecto de sus cambios, se producirán respuestas en el cultivo: una disminución de los niveles de radiación a valores críticos se reflejará en un menor desarrollo foliar, lo que combinado con las mismas entradas energéticas reducidas, favorecerá un menor número de granos y menores tasas de llenado. Los incrementos de radiación serán provechosos si el clima de referencia es de bajos niveles de radiación, aunque se deben tomar en cuenta los efectos de una disminución del aprovisionamiento hídrico si el incremento de la demanda evapotranspirativa de la atmósfera (por efecto del aumento de la radiación) no está bien compensado por dicho aprovisionamiento.

d) Para el caso del elemento precipitación se tiene que de acuerdo a la cercanía del contenido de agua en el suelo del llamado límite inferior de agua extraíble por los cultivos el modelo evaluará el grado de estrés hídrico por falta de agua. Sin embargo, si el estrés térmico es de mayor magnitud que los hídricos (los dos tipos varían entre 0 y 1, como puede ser visto en el anexo No. 1) el modelo sólo tomará en cuenta el estrés de tipo térmico. Ya que en Barinas y Turén los niveles actuales de

precipitación parecen ser supraóptimos para un cultivo como el maíz, la disminución de la precipitación asociada a un escenario de sequía tendría que ser muy fuerte para que las disminuciones de producción se evaluaran mediante el estrés hídrico. Por el lado de los escenarios de aumento de pluviosidad, el modelo CERES-Maíz no tiene capacidad de evaluar los problemas asociados a excesos de agua. Sin embargo, es bastante conocida la alta sensibilidad de los cultivos de maíz a condiciones de anegamiento, sobre todo durante las primeras fases de desarrollo y al final del proceso de maduración de los granos (Norman, 1984).

3.1.2. Validación de los Aspectos Fenológicos y Productivos del Modelo CERES-Maíz en Venezuela

En la figura 3 se observan los resultados del proceso de validación de los aspectos fenológicos del modelo CERES-Maíz en Venezuela, para la ocurrencia de la polinización y la madurez fisiológica, notándose como la precisión es bastante buena, lo que indica que no es necesario calibrar el modelo para mejorar la predicción de los dos procesos señalados.

En cuanto al proceso de validación de las predicciones sobre producción, la figura No. 4 muestra como para Turén y Barinas los resultados son bastante aceptables; 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 de agua.

FIGURA N° 3 COMPARACION DE EVENTOS FENOLOGICOS DEL MAIZ POR EL MODELO CERES-MAIZ EN VENEZUELA.

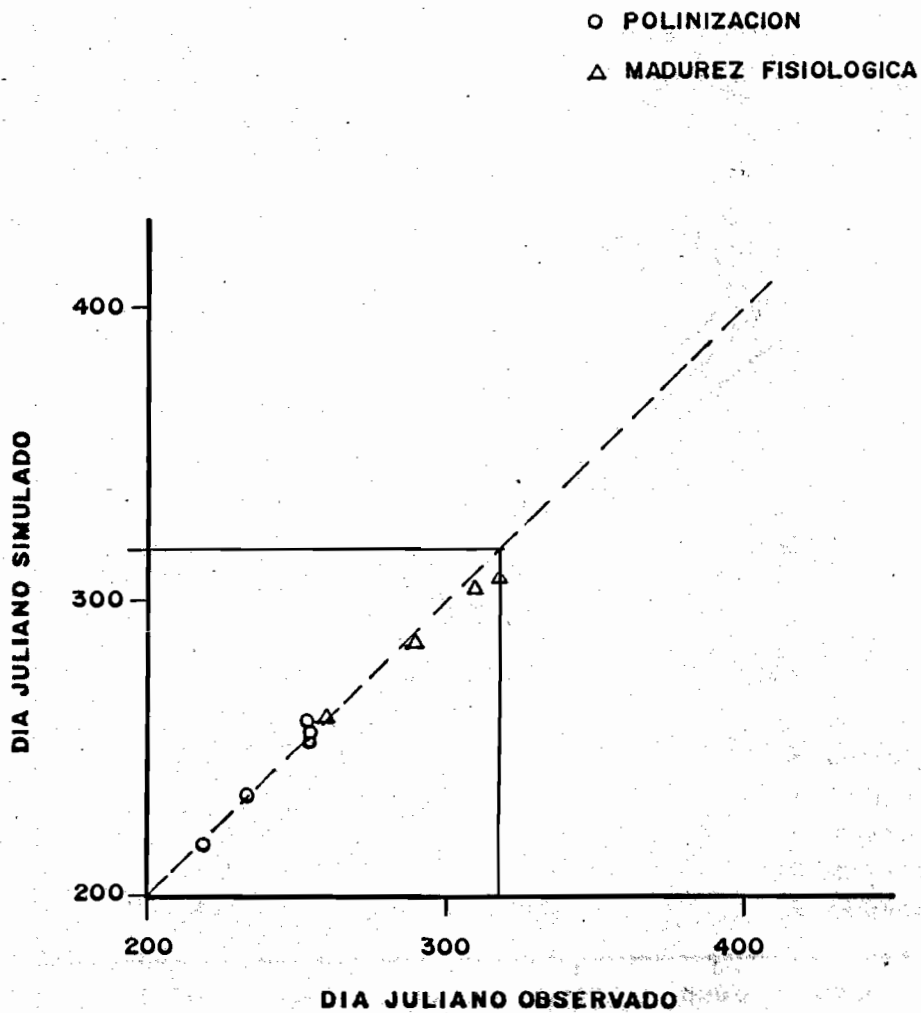
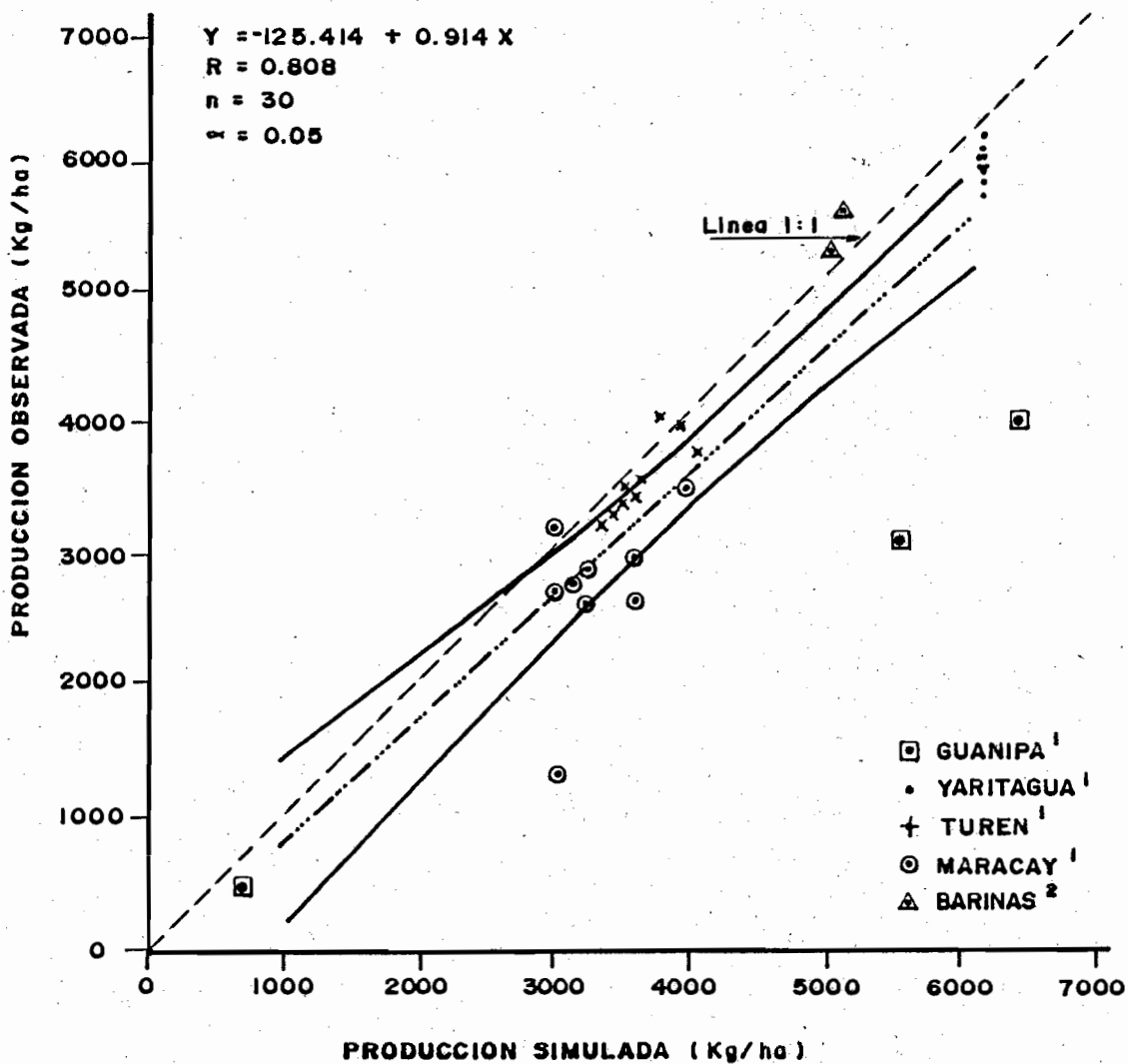


FIGURA N° 4 COMPARACION DE LAS PRODUCCIONES DE MAIZ SIMULADAS Y OBSERVADAS POR EL MODELO CERES - MAIZ EN VENEZUELA



FUENTES:

- 1: COMERMA ET AL. (1984)
 2: ZUVIA (1990)

3.1.3. Información de Entrada en el Modelo CERES-Maíz

Cuatro tipos básicos de información se necesitaron para utilizar el modelo CERES-Maíz: a) características del cultivar (coeficientes genéticos), b) características de suelos, c) técnicas de manejo y d) información sobre variables atmosféricas.

a) Características del Cultivar Seleccionado (coeficientes genéticos y rendimiento productivo)

El cultivar seleccionado en el presente estudio es un híbrido denominado CENIAP PB-8, desarrollado por investigadores del FONAIAP-Región Central (1982).

El modelo CERES-Maíz requiere que se le suministre información acerca de cinco (5) coeficientes genéticos, tres (3) relacionados con los procesos de desarrollo y dos (2) asociados a los aspectos productivos (definidos en el anexo No. 1). Originalmente se pensó utilizar los coeficientes genéticos que determinó Marrero (1987) pero las simulaciones de producción con esos coeficientes utilizando como base de datos climáticos la del año 1967 en Turén (año promedio), resultaron demasiado altas al comparar con el promedio de rendimiento experimental del híbrido PB-8 en Venezuela, que está cercano a los 5400 Kg/ha. Se probó entonces con los coeficientes que vienen con el sistema DSSAT versión 2.1, los cuales resultan de determinaciones de campo realizadas por investigaciones del FONAIAP; en este caso la concordancia fue más aceptable por lo que se decidió utilizarlos.

En nuestra investigación no se pudo contar con determinaciones propias de los coeficientes genéticos, pero dado el carácter de aplicabilidad general de estos coeficientes una vez obtenidos y la razonable concordancia de las simulaciones con los coeficientes que ya venían con el sistema DSSAT, se piensa que el procedimiento de selección descrito es adecuado.

Los cinco (5) coeficientes genéticos que se utilizaron en nuestra investigación son los siguientes:

- Coeficiente P1 = 300 grados días;
- Coeficiente P2 = 0.52/horas
- Coeficiente P5 = 920 grados días;
- Coeficiente G2 = 400 gramos/mazorca
- Coeficiente G3 = 7 miligramos/día.

Otras características de interés en relación al híbrido CENIAP PB-8 se dan a continuación.

- por ser de porte bajo (con el menor tamaño promedio entre los híbridos utilizados en el país) se muestra resistente al volcamiento por efecto de fuertes vientos, su tamaño promedio medido en ensayos regionales (Ramírez y Malaspina, 1987) es igual a 1.95 m. Además, la mazorca superior (produce dos) se localiza en promedio a 1.04 m. de altura.

- las evaluaciones regionales del híbrido CENIAP PB-8 han dado rendimientos variables según las localidades, consiguiéndose el mayor rendimiento en Yaritagua, estado Yaracuy (año 1983): 8276 Kg/ha.; como

vemos, un rendimiento bastante superior al promedio nacional que oscila entre 1500 y 2000 Kg/ha. Otros ensayos experimentales se han llevado a cabo con un rendimiento también superior a los 2000 Kg/ha., (Ramírez y Malaspina, op. cit., pp. 22):

- CEC, Maracay estado Aragua: 5806 Kg/ha;
- Agua Blanca, estado Portuguesa: 2635 Kg/ha.;
- Hato Rincón de Los Toros, San José de Tiznados, estado Guárico: 5048 Kg/ha;
- Los Samanes, estado Guárico: 4767 Kg/ha;
- Monte Oscuro, Calabozo, edo. Guarico: 5990 Kg/ha;
- Borburata, estado Barinas: 4575 Kg/ha;
- La Rinconada, estado Apure: 6419 Kg/ha;
- Monay, estado Trujillo: 3880 Kg/ha.

De acuerdo a los reportes técnicos de FONAIAP (1984) el híbrido CENIAP PB-8 sería a nivel promedio (resultados experimentales) el de mayor rendimiento en el país. Esto constituyó un criterio de interés para fines de evaluación de PB-8 en cuanto a respuestas fenológicas y productivas ante posibles cambios de clima.

b) Datos de Suelo y Fase Experimental de Campo

b.1. Datos de Suelo por Horizontes:

- Grosor (cm);
- Densidad aparente (gr/cm³)
- Contenido de materia orgánica (%);
- pH (en agua);
- Textura (% de arena, limo y arcilla)
- Contenido inicial de agua (%);
- Saturación de Aluminio (%);
- Color y albedo
- Permeabilidad;
- Tipo de drenaje;

En la tabla No. 5 se sintetizan las principales características de los suelos modales seleccionados en Barinas y Turén.

Tabla No. 5: Características de los Suelos Barinas y Turén
Suelos del Jardín Botánico de la UNELLEZ en Barinas

Prof. cm	Textura(%)			pH H ₂ O	dens. gr/cm ³	C. Org. %	Sat Al %
	Are	Lm	Arc				
0-20	69	12	18	5.6	1.7	0.7	0
20-30	61	6	33	5.5	1.57	0.6	0
30-60	53	23	24	5.9	1.53	0.5	0
60-90	51	21	28	6.3	1.59	0.3	0
90-105	51	9	40	6.4	1.56	0.2	0

Clasificación Oxíc Tropustalf; pendiente < 1%; albedo aprox. = 0.13; permeabilidad y drenaje moderados. Datos tomados de Hétier et al. (1989).

Suelo de la Colonia Agrícola de Turén

0-10	55	36	9	8.2	1.69	0.75	0
10-20	62	29	9	8.3	1.75	0.74	0
20-50	81	14	5	8.5	1.50	0.56	0
50-90	47	41	12	8.5	1.45	0.55	0
90-160	26	60	14	8.3	1.51	0.48	0

Clasificación: Fluventic Haplustolls; pendiente < 1%; permeabilidad y drenaje buenos, aunque con capa compactada de 10 a 20 cm. de profundidad que causa problemas para la penetración de las raíces (Resultados aportados por el Dr. Juan Comerma, FONAIAP). Albedo aproximado = 0.13

b.2. Límite Inferior de Agua Extraíble por los Cultivares, Capacidad de Campo y Saturación.

El modelo CERES-Maíz con los datos de suelo calcula tres variables muy importantes para la simulación

tanto de procesos y características del suelo mismo como para determinar los efectos de dichos procesos y características en los cultivares:

- 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 de dicho horizonte;

- 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, y que se calcula en base a los mismos datos que las dos variables anteriores (aunque con algoritmos diferentes en cada caso).

Se debe destacar que sólo para Barinas se pudo contar con datos reales de los tres límites hídricos anteriormente mencionados, lo que permitió realizar un proceso de calibración en este aspecto de sumo interés en nuestras latitudes, donde se sabe que el factor hídrico es uno de los que más influye sobre el rendimiento de los cultivos. En este sentido, los resultados de Barinas son más confiables que los de Turén, ya que en esta última se utilizaron los estimados del modelo.

Resultados aportados por Comerma et al. (1985) para suelos de Maracay con la misma clasificación que los utilizados en Turén (aunque con limitantes diferentes) y de acuerdo a nuestros propios resultados obtenidos en Barinas (tabla No. 6), sugieren que el modelo CERES-Maíz subestima los contenidos reales de agua en el suelo.

Tabla No. 6

Contenido de Agua (%) en el Suelo del Jardín Botánico de la UNELLEZ en Barinas, en el Límite Inferior (LI), Capacidad de Campo (CC) y Saturación (SAT), determinados por el Modelo CERES-Maíz (CM) y por Experimentos de Campo

Prof.	LI-CM	LI-Campo	CC-CM	CC-Campo	SAT-CM	SAT-Campo
0-20	11.6	15.0	23.0	27.0	32.9	41.2
20-30	18.3	20.8	29.4	31.6	34.1	39.0
30-60	14.3	20.5	26.2	34.7	34.7	36.4
60-90	16.1	23.5	32.6	34.7	34.9	37.7
90-105	21.38	23.0	33.6	36.0	34.5	40.1

Profundidades en centímetros.

Los resultados de la tabla 6 indican que las estimaciones del modelo siempre están por debajo de los resultados de campo, y en el caso del límite inferior de agua extraíble por las raíces de los cultivares, las subestimaciones están en el orden del 22% para el primer horizonte.

Lo anterior significa que si un agricultor se basara en el modelo para determinar el momento de siembra, podría pensar que el suelo está a un 50% de agua

aprovechable (nivel aceptado internacionalmente como adecuado para el ciclo del cultivo), cuando en realidad el nivel sería de 20%. Esto sin duda constituye un riesgo de retraso de germinación o pérdida de lo invertido por muerte de los cultivares si no se presenta una cantidad suficiente de precipitaciones en las primeras etapas de desarrollo. En general el modelo sugeriría que la época de siembra es recomendable cuando el suelo aún está cercano al límite inferior de agua extraíble por los cultivares (50% de agua aprovechable basándonos en el modelo, equivaldría a sembrar con el suelo a 17,5% de humedad, como vemos muy cercano al 15% que es el límite inferior real para el primer horizonte).

Se puede agregar que el límite inferior de agua extraíble por los cultivares depende no sólo de las propiedades del suelo (como asume el modelo) sino también del tipo de cultivar, tal como se muestra en la tabla No. 7 (determinaciones hechas para un mismo tipo de suelo).

Tabla No. 7

Contenido Promedio de Humedad (%) del Límite Inferior para los Híbridos FM6 y Obregón (Delgado, 1988, cuadro 11)							
Prof. (cm)	0-10	10-30	30-70	70-100	100-130	130-160	160-200
H. FM6	14.78	7.64	7.10	9.34	11.69	12.91	24.61
H. Obreg.	15.49	6.28	5.50	8.65	7.22	7.42	9.68

Una subestimación del límite inferior de agua extraíble por los cultivares, podría significar a su vez una

subestimación de los efectos de la falta de agua, ya que tales efectos el modelo los evalúa de acuerdo a la cercanía del contenido de agua en el suelo a dicho límite. En este sentido, Liu et al. (1989) en Brasil encontraron sobrestimaciones de producción cercanas al 22% respecto a la realidad, ya que en campo las producciones eran menores precisamente a causa de stress hídrico (no detectado por el modelo) durante el proceso de germinación y las primeras fases de desarrollo de los cultivares.

Una determinación errónea del límite inferior de agua extraíble por los cultivares también podría reflejarse negativamente en la determinación de la reserva de agua útil para transpiración de los cultivares, ya que como se sabe, esta reserva es igual a la diferencia entre los contenidos de agua en el suelo a capacidad de campo y el límite inferior de agua extraíble por los cultivares. Sin embargo, para Barinas la diferencia entre valores simulados y observados de agua aprovechable son parecidas, resultado similar al de Comerma et al. para Maracay (1985, op.cit.).

En relación a la capacidad de campo, Delgado (op. cit.) indica que la causa principal para que las estimaciones del modelo sean por lo general superiores a la realidad, es que el algoritmo utilizado se aplica mejor a suelos de características uniformes, lo que no sucede en áreas aluviales como las llaneras (y en Maracay, donde el autor citado hizo sus determinaciones),

ya que la dinámica deposicional que implicó la formación de estos suelos favorece la estratificación del perfil, lo que limita el desplazamiento del agua en el mismo, determinando de esta manera que cada horizonte tienda a retener más agua de la que retendría si no presentara tal estratificación.

En general, los autores del modelo CERES-Maiz (Jones y Kiniry, op. cit.) señalan que los algoritmos que se utilizan para el cálculo de los tres límites hídricos a que hemos hecho referencia pueden no dar buenos estimados en suelos de las regiones tropicales debido al tipo de arcilla predominante (caolinita) y los diferentes contenidos de materia orgánica que los caracterizan al compararse con los suelos de latitudes medias (para los cuales fue desarrollado el citado algoritmo), los cuales a menudo presentan arcilla del tipo vermiculita y mayor contenido de materia orgánica.

Se debe señalar, sin embargo, que no se descartan posibles errores de medición en las características de los suelos de las cuales depende la determinación de los tres límites hídricos señalados por parte del modelo, sobre todo en el caso de las texturas, ya que en el caso de las determinaciones de laboratorio para los suelos del Jardín Botánico de la UNELLEZ, Hétier (comunicación personal) sugiere que pueden existir algunos errores. Por otra parte, para el caso del límite inferior de agua extraíble por el cultivar, se debe resaltar que sólo se realizó un experimento de campo, necesitándose otras experiencias para

verificar el grado de exactitud de las determinaciones. Problemas de tiempo y presupuesto impidieron contar con más experimentos de campo. No obstante, debido a que las subestimaciones del modelo en los parámetros hídricos mencionados son consistentes en los tres límites, y habiendo sucedido tal subestimación tanto en Barinas como en Maracay, lo más probable es que puedan existir problemas con los algoritmos del modelo cuando se aplican a suelos de las regiones intertropicales.

Podemos concluir que el modelo CERES-Maíz en cuanto a la simulación de los principales parámetros asociados a la dinámica de extracción de agua por los cultivos, debe ser verificado y de ser necesario calibrado antes de realizar estudios de aplicación, ya que el factor hídrico, como ya se señaló, es de vital importancia en nuestras latitudes, considerándose además que nuestra investigación pretendía evaluar el impacto de cambios climáticos que implican variaciones de la precipitación e inclusive de las temperaturas, las cuales afectan fenómenos como la demanda evapotranspirativa de la atmósfera, de reconocido efecto sobre la dinámica hídrica en cualquier agroecosistema.

La preocupación por un mejor conocimiento de las características de los suelos tropicales en relación a las entradas de información para utilizar los modelos agroecológicos de simulación, quedó bien establecida en las conclusiones del Taller sobre entrenamiento, calibración, validación y aplicación del modelo CERES-Maíz realizado en

el año 1989 en Maracay (PAN EARTH PROJECT, 1989). En este sentido, estimamos que los resultados de la fase de campo realizada en el marco de la presente investigación, constituyen un aporte fundamental para una mejor aplicabilidad del modelo CERES-Maíz a la planificación de las actividades agrícolas, por lo menos en el área de Barinas (suelos de la Serie Barinas).

Habiendo hecho las justificaciones necesarias para la realización de un proceso de ajuste de algunos aspectos hídricos en el modelo CERES-Maíz, se describen ahora los experimentos realizados para tal fin.

b.2.1. Determinación del Límite Inferior de Agua Extraíble por los Cultivares

Se sembró una parcela de 100 metros cuadrados (tamaño mínimo recomendado por los reportes técnicos del Proyecto IBSNAT, 1987) con un espaciamiento de hileras de 0.8 m. y de 25 cm. entre las semillas colocadas en una misma hilera (densidad de 4 plantas/m²). Se aseguró mediante riego que los cultivares no sufrieran falta de agua hasta que el 50% de las plantas tuvieran el cuello de la sexta hoja bien visible, para luego cortar el suministro hídrico (método sugerido por Comerma y Bisbal, comunicación personal). Se marcó la cuarta hoja para no perder el conteo en caso de caída de las 3 primeras hojas, lo cual es un proceso que a menudo ocurre en los cultivares de maíz.

A diferencia del método propuesto por Jones y Kiniry

(op. cit.), en relación a cubrir el suelo un plástico para evitar la evaporación directa de los horizontes superficiales, en nuestro experimento se dejó el suelo sin cubrir, ya que se consideró que así se evitaban posibles modificaciones en el edafoclima y microclima en general que pudieran afectar el normal desarrollo de los cultivos de maíz. Se puede agregar que debido a que se dispuso de una Sonda Neutrónica (sonda SOLO-40) para rápidas y eficientes mediciones del contenido de humedad en los horizontes explorados por las raíces, se evitó el problema de variaciones en el contenido de humedad del suelo en el momento de determinar el límite inferior de agua extraíble por las plantas de maíz; además, se consideró que las posibles variaciones de humedad cuando se hicieran tales mediciones deberían de ser muy bajas, ya que se supone que el suelo está bastante seco por efecto de la suspensión en el suministro de agua y el propio consumo previo de los cultivos en la parcela.

Para la determinación del momento en que las plantas no estuvieran extrayendo agua, se aplicó la técnica del Pulso de Calor utilizando un dispositivo construido en el Laboratorio de Instrumentación del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes. Este aparato consta básicamente de una fuente que suministra un pulso (graduado en el tiempo) de calor a una aguja que se inserta en el xilema de la planta en estudio. Por encima y por debajo de dicha

aguja se colocaron a una distancia de 1.5 cm (variable según las necesidades) termocuplas que detectaron el pulso de calor cuando existía un flujo ascendente de agua en la planta.

b.2.2. Determinación de la Capacidad de Campo y la Saturación

La experiencia de campo en este caso formó parte del Seminario-Taller sobre Dinámica de Agua en el Suelo del Postgrado de Ecología Tropical de la U.L.A. (año 1990), cuyo coordinador es el profesor J. Hétier (ORSTOM). Además, se contó con la participación (coautor) del Biólogo Dimas Acevedo, estudiante de dicho postgrado.

Se procedió a la instalación de un tubo de aluminio hasta 2.35 m. de profundidad para el desplazamiento del sensor de la Sonda Neutrónica, alrededor del cual se enterraron dos anillos metálicos concéntricos de 1 y 5 metros cuadrados respectivamente hasta 12 cm. de profundidad y sobresaliendo de la superficie unos 10 cm. (infiltrómetro con anillo amortiguador externo)

Posteriormente se suministró agua al anillo exterior y luego al interno para así evitar desplazamientos laterales del agua suministrada este último. Se dejó llegar el nivel del agua en los anillos hasta unos 5 cm. de profundidad y se mantuvo así hasta que se logró llevar el suelo a la saturación, lo que se detectó a través de los registros de humedad con la Sonda Neutrónica al no variar humedad del suelo a

pesar de seguirse suministrando agua.

El siguiente paso fue tapar la superficie del suelo y en general el infiltrómetro con plástico, para impedir la pérdida de agua al evaporarse a partir de los horizontes superficiales y evitar que el suelo volviera a recibir agua de eventuales precipitaciones. Se dejó que el suelo drenara libremente el exceso de agua durante un tiempo suficiente como para que alcanzara su capacidad de campo, la que se determinó de manera similar al nivel de saturación; es decir, cuando se estabilizaron las variaciones de humedad en el perfil.

Los valores capacidad de campo y saturación obtenidos experimentalmente, se compararon con los que resultan de aplicar un método gráfico que consiste en dibujar en un papel semilogarítmico la relación entre el contenido relativo de humedad (eje y, log.) y el tiempo (eje x, aritmético), para luego prolongar hasta el eje de las ordenadas la pendiente asociada a la recta que caracteriza el período de estabilización en las variaciones hídricas del suelo. El logaritmo que se intercepta en el eje de las ordenadas al prolongar la recta hasta dicho eje, se convirtió en su antilogaritmo, el cual corresponde entonces al contenido volumétrico de agua a capacidad de campo; a cada horizonte del suelo le corresponde su recta particular. En general, la concordancia fue buena, por lo que se asumió que las determinaciones de campo fueron realizadas correctamente.

c) Información sobre Técnicas de Manejo.

El modelo CERES-Maíz requiere los siguientes datos acerca de las técnicas de manejo que aplica el agricultor (se asume que se mantienen constantes en el futuro):

- día de siembra;
- profundidad (cm) de sembrado;
- espaciamiento (cm) de las hileras;
- densidad de plantado (plantas/m²);
- nivel inicial de agua en el suelo (%);

Dado que se está asumiendo que no se presentan problemas de falta de nitrógeno para el desarrollo de los cultivares, no es necesario indicar niveles iniciales de dicho elemento en el suelo ni programa de fertilización. No se simuló la aplicación de riego.

En el caso de la selección de las fechas de siembra se debe señalar que dependieron de la dinámica hídrica que caracterizó a cada uno de los años utilizados como base de datos climáticos, ya que siempre se seleccionó un día que asegurara un adecuado nivel de agua en el suelo al momento de la siembra o por lo menos un día después, evitando así posibles problemas de germinación. De todas maneras, y como medio de evaluar los riesgos a los cuales se podrían enfrentar los agricultores, se analizaron los efectos de sembrar con dos niveles de agua en el suelo; en específico, capacidad de campo y 20%, considerándose que comenzar a sembrar con el suelo a su máxima capacidad de retención simula una estrategia de manejo que implica la utilización de riego presiembrado, lo

que es de interés para comparar con los resultados de comenzar a sembrar con el suelo al 20% de su agua aprovechable y así evaluar los riesgos por parte del agricultor.

Lo anterior se hizo sólo para años considerados como intermedios entre condiciones pluviosas o secas y para aquellos años representativos de condiciones secas, ya que en los años pluviosos siempre se asumió que el suelo al momento de sembrar estaba a capacidad de campo. Tal procedimiento estuvo apoyado también en un análisis previo del balance hídrico simulado para los primeros 10 cm. de suelo por el modelo CERES-Maíz, en cada uno de los años tomados como base de datos climáticos.

No se simuló el efecto de comenzar con el suelo en el límite inferior de agua extraíble por los cultivares, ya que se considera que los agricultores no proceden de esta manera: por lo general, la siembra se decide cuando el suelo ya ha recibido cierta cantidad de agua como para asegurar un desarrollo normal del proceso germinativo (el agricultor espera que se presente cierta cantidad de precipitaciones antes de proceder a sembrar). El que posteriormente no se de un buen nivel de precipitaciones para un adecuado desarrollo de los cultivares, es algo que el agricultor no puede determinar y constituye uno de los riesgos que debe afrontar.

En cuanto a la densidad de siembra, se asumió que era de 40.000 plantas/ha., ya que las determinaciones de campo

en la ciudad de Barinas por parte del Proyecto ULA-ORSTOM se realizaron a esa densidad. La profundidad de sembrado se asumió = 5 cm., práctica común en los Llanos Occidentales;

d) Base de Datos Climáticos

El modelo CERES-Maíz requiere de datos diarios de radiación solar (cal/cm²/min., o su equivalente en mega Joules/m²), temperaturas máximas y mínimas (°C) y precipitación (mm). Los datos de identificación de las dos estaciones climatológicas utilizadas se dan en la tabla 8.

Tabla No. 8 : Identificación de las Estaciones

Estación	Tipo	Estado	Altura	Latitud	Longitud
Turén	C1	Portuguesa	275 msnm	9° 15' 49" N	69° 06' 14" W
Barinas	C1	Barinas	189 msnm	8° 36' 00" N	70° 15' 0" W

C1: estación climatológica principal.

En las tablas 9 y 10 se muestran las características de los diferentes años base seleccionados en Turén y Barinas.

Tabla No. 9: Características Pluviométricas, Térmicas y Radiativas de los Años Base en Turén.

Años Base	Prec.(mm.) Abril-Sept.	TMáx (°C)	TMin (°C)	Radiación (cal/cm ² /día)	Observación
1967	1214.7	31.20	21.88	465.6	Promedio
1973	1378.6	31.58	22.40	453.0	Cálido
1974	883.8	30.86	21.96	450.2	Seco
1981	1596.0	28.74	22.06	295.8	Pluv.-BRad.
1983	1566.2	29.56	22.38	496.4	Pluv.-ARad.

Pluv. = pluvioso, BRad = baja radiación, ARad = alta radiación; datos de temperatura y radiación son promedios para el período mayo-septiembre (período de cultivo)

Tabla No. 10: Características Pluviométricas, Térmicas y Radiativas de los Años Base en Barinas

Años Base	Prec.(mm.) Abril-Sept.	TMáx (°C)	TMín (°C)	Radiación (cal/cm ² /día)	Observación
1981	1510.9	30.06	21.86	395.0	Pluv.-ARad.
1988	1422.0	31.32	22.36	353.6	Promedio
1989	911.6	30.85	22.85	342.6	Seco

El criterio principal para considerar un año base como promedio, lluvioso o seco fue el del monto de precipitación entre los meses de abril a septiembre. El año 1973 se considera cálido en Turén a causa de presentar las temperaturas extremas mayores de todos los años base seleccionados, mientras que los años de 1981 y 1983 en dicha localidad se seleccionaron por presentar comportamiento radiativo diferente a pesar de ser bastante lluviosos. Esto nos permite tomar en cuenta algunos de los principales tipos de condiciones agroclimáticas que se presentan en el clima actual de la Colonia Agrícola de Turén, lo que fue señalado como útil para fines de evaluación por el Dr. Juan Comerma del FONAIAP (comunicación personal).

En el caso de la selección de años base en Barinas se puede ver que el año lluvioso y el año seco presentan comportamiento radiativo contrario a lo esperado, lo que se tomó en cuenta para fines de análisis de resultados.

En el caso de Barinas no se pudo contar con otros años de mejor calidad para las evaluaciones, debido a problemas

de acceso a los datos en el Ministerio del Ambiente, ya que los registros de radiación no se consiguen fácilmente y en definitiva hubo que aceptar los datos disponibles.

3.2. Escenarios de Cambios Climáticos

3.2.1. Escenarios del Taller PAN-EARTH/CEAT 1990

En relación a los escenarios de cambios climáticos, se basaron preferentemente en los desarrollados durante el Taller Internacional sobre Variabilidad del Clima y Cambios Climáticos en Venezuela y la Región del Caribe (PAN-EARTH PROJECT, 1990), aunque se agregaron algunos escenarios no contemplados en dicho taller y que se explicarán más adelante.

La metodología básica que se siguió en el mencionado taller resulta de una combinación del uso de las salidas de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs) y el Juicio de Expertos Climatólogos sobre el clima venezolano y en general del norte de suramérica, tal como lo sugieren las propuestas metodológicas de Ackerman y Cropper (1988) y Robock (1990). En el primer caso destacan los siguientes procedimientos:

- 1) Evaluar el grado de exactitud de los GCMs en simular el clima actual para el área que se esté estudiando (realizado por Andressen y Jaimez, 1990)

- 2) Ver cuáles son los patrones de cambio propuesto por los GCMs y si concuerdan entre ellos;

- 3) Seleccionar los modelos a utilizar y decidir sobre la conveniencia de aplicar un promedio de sus resultados;

4) Evaluar hasta qué punto se puede utilizar la variabilidad actual del clima para generar escenarios de cambio climático;

5) Llevar los datos de los GCMs a nivel local (proceso de escalado espacial) y convertirlos en datos diarios (escalado temporal, tal como lo requiere el modelo CERES-Maíz).

Se debe destacar que Robock (op. cit.) ha planteado que la metodología propuesta por Ackerman y Cropper impide generar escenarios de cambios climáticos cuando los GCMs no simulan bien el clima actual, sugiriendo que se analicen los patrones generales de cambio propuestos por los modelos, los cuales pueden presentar coincidencias útiles a pesar de que a nivel regional no simulen bien el clima actual:

-la tendencia de aumento térmico por efecto invernadero es consistente en la mayoría de los modelos, a pesar de que algunos no simulan bien el clima térmico actual;

-lo mismo puede decirse del elemento precipitación, ya que los modelos para efecto invernadero sugieren que a nivel general habrá un incremento de la pluviosidad en los intertrópicos.

La solución planteada por Robock fue aplicada en el taller citado, aunque los escenarios propuestos se basaron preferentemente en los resultados sugeridos por el modelo UKMO (Wilson y Mitchell, 1987), ya que según las evaluaciones realizadas por Andressen y

Jaimez (op. cit), este modelo es el que mejor simula para Venezuela el clima termo-pluviométrico actual. Los escenarios de cambios climáticos (efecto invernadero: doble concentración atmosférica de CO₂) del taller citado que fueron evaluados en la presente investigación se se muestran en la tabla No. 11.

Tabla No. 11 : Cambios Climáticos por Efecto Invernadero.

Sensibilidad del Sistema Climático	Estación	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

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; 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.

Una modificación que se introdujo respecto al

elemento precipitación, es que en el taller citado se sugirió que la selección de los días en que debe agregarse precipitación (días sin precipitación previa) se haga en forma aleatoria; sin embargo, en nuestra investigación tal selección se hizo tomando un día que no presentara precipitación pero que pasara a formar parte de una secuencia previa de días en que ya se había producido precipitación. Este planteamiento metodológico trata de tomar en cuenta que en nuestras latitudes lo más común es que se presenten eventos de pluviosidad en varios días seguidos y no en forma aislada, lo que resulta en ciertos casos si se seleccionan los días aleatoriamente.

En el taller citado también se propuso evaluar un escenario de cambio climático asociado al proceso de deforestación (DEF), para los que se contempló aumento de 19 °C en las temperaturas extremas diarias, reducción de 25% en las precipitaciones (días seleccionados) y aumento de radiación solar en un 10% aplicado uniformemente a todos los días de la base de datos climáticos.

.2.2. Otros Escenarios Evaluados.

a) Cambios Diferenciales en las Temperaturas Extremas Diarias

En los escenarios de la tabla No. 11 se sugiere que los incrementos térmicos para la época pluviosa son de igual magnitud en las máximas y en las mínimas, lo que en cierta forma no toma en cuenta que el incremento de nubosidad y la consecuente disminución de

radiación solar favorece un proceso de retroalimentación que aminora el aumento en las temperaturas máximas, al tiempo que favorece el incremento de las mínimas al ejercer un efecto adicional al del CO₂, todo lo que promueve un mayor aumento en las temperaturas mínimas respecto al aumento de las máximas. Este planteamiento se basa en una propuesta de Rind et al. (1989) en base a resultados sugeridos por el modelo GISS.

En específico, se evaluaron los efectos de un incremento diferencial entre mínimas y máximas térmicas de la manera siguiente:

-Para los escenarios asociados a una sensibilidad media del sistema climático ante el incremento del CO₂, se aumentó la temperatura máxima en 2 °C y la mínima en 3 °C; obsérvese que el promedio de estos incrementos es similar al aumento propuesto para los escenarios de la misma sensibilidad en el cuadro anteriormente citado, lo que se hizo para tener un mejor nivel de comparación.

-Para los escenarios asociados a una sensibilidad alta del sistema climático los incrementos propuestos fueron de 3 °C en las temperaturas máximas y 4 °C en las mínimas, cuyo promedio aritmético es de 3.5 °C, similar a la de la de los escenarios de la misma sensibilidad en la tabla 9.

b) Disminución de Precipitación Y Aumentos Térmicos y Radiativos Durante el Período de Floración y Polinización

Se evaluó también un escenario de cambio climático basado en el modelo UKMO, el cual sugiere que durante

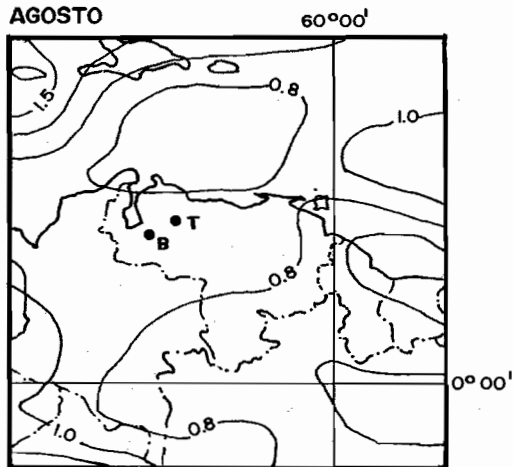
el mes de agosto podría producirse en áreas cercanas a Barinas y Turén una disminución de las precipitaciones de 20% (fig. 5), coincidiendo con el período tradicional en que los cultivares de maíz en Barinas y Turén desarrollan sus procesos de floración femenina y polinización (tomando como base que se siembre hacia la tercera o cuarta semana del mes de mayo lo que es bastante común en Barinas y Turén), los cuales, como se sabe, son muy sensibles a la falta de agua (Duncan, 1975). Esta disminución de precipitación en agosto se combinó con incrementos térmicos de 3.50 C, tal como lo sugiere el mismo modelo UKMO para los meses de julio y octubre (fig. 5): En este último caso asumimos que agosto, situado entre julio y octubre, tiene un comportamiento similar a estos dos meses, más aún si se toma en cuenta que al mismo tiempo el modelo UKMO propone una disminución de precipitación, lo que por lo general se asocia a condiciones radiativas más intensas por la menor nubosidad asociada a los periodos secos, favoreciendo así un mayor incremento térmico).

En síntesis, el escenario evaluado contempla cambios similares a los propuestos en la tabla No. 9 para una sensibilidad media del sistema climático en los meses de abril a julio y en septiembre y octubre; en cambio, para el mes de agosto, se disminuyó la precipitación (días seleccionados) en un 25% (aumento de radiación del 10%) al tiempo que se incrementa la temperatura en 3.5 0C en todos los días (similar al escenarios asociado a la sensibilidad

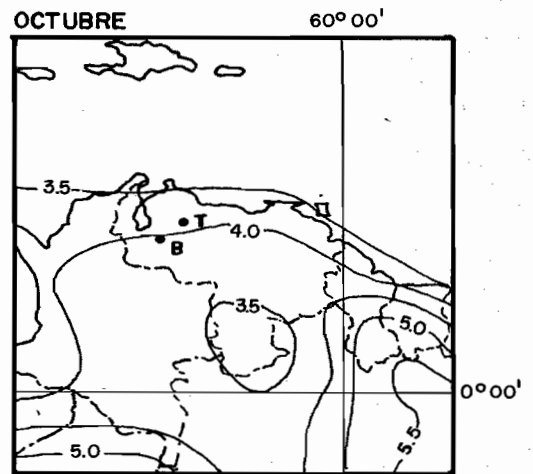
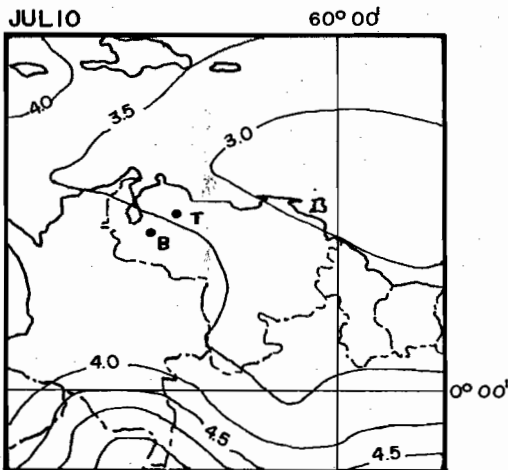
FIGURA Nº 5

RELACION DE CAMBIO DE PRECIPITACION EN AGOSTO Y AUMENTO DE TEMPERATURA (°C) EN JULIO Y OCTUBRE POR EFECTO INVERNADERO EN BARINAS Y TUREN. MODELO UKMO.

CAMBIO DE PRECIPITACION



AUMENTO DE TEMPERATURA



0 500 1.000 kms.



B=BARINAS

T=TUREN

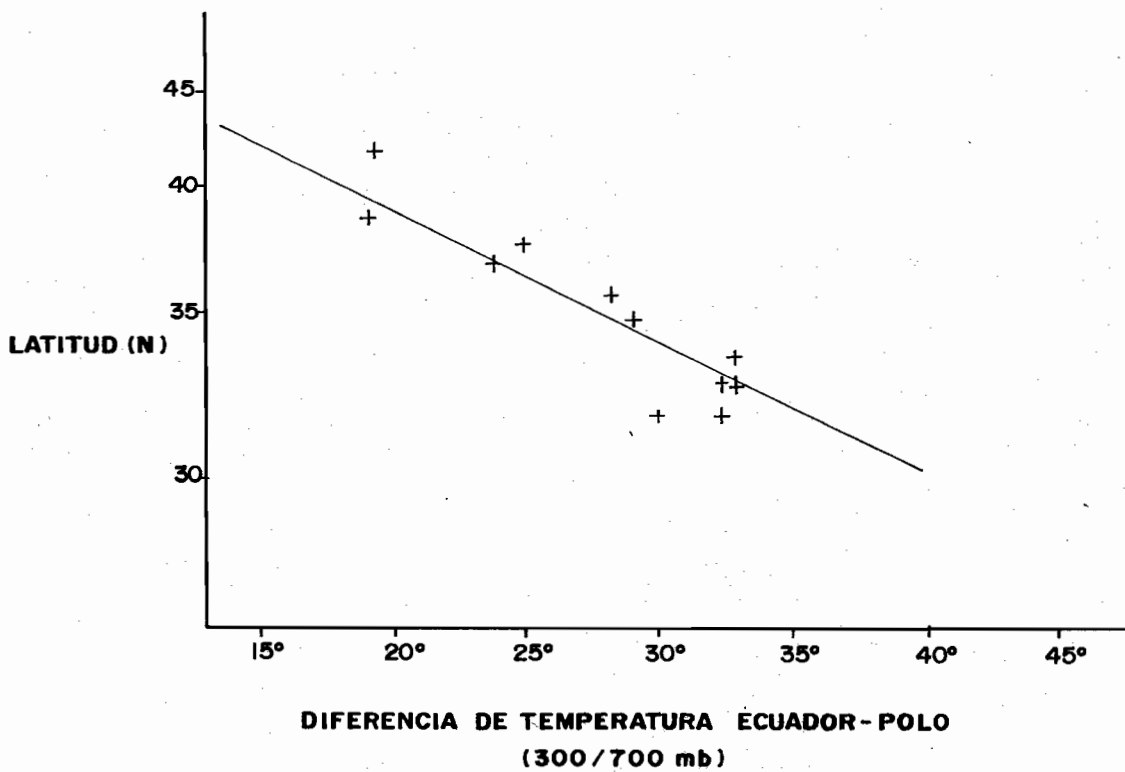
alta del sistema climático). Esto se hizo sólo para los años base promedios (1967 en Turén y 1988 en Barinas).

c) Aumento de Precipitación en la Actual Época Seca.

Un último tipo de escenario de cambio climático que se analizó es el que propone una época seca más pluviosa que en la actualidad, a causa de una posición de la convergencia intertropical más al norte de lo habitual durante el invierno astronómico del hemisferio norte, debido a que los resultados de la mayoría de los GCM sugieren que en un mundo $2 \times \text{CO}_2$ los gradientes térmicos latitudinales (polo-ecuador) disminuyen por efecto del mayor incremento térmico propuesto para las áreas de latitudes medias y altas en relación a las de latitudes bajas. Este tipo de escenario de cambio climático está basado en una propuesta hecha por Flohn (1977), la cual toma como referencia un modelo teórico de Smagorinsky (1963) que ha sido comprobado experimentalmente y que asocia la posición de las celdas de altas presiones subtropicales a los gradientes térmicos polo-ecuador, tal como puede ser observado en la figura 6.

El escenario de cambio climático anteriormente citado es consistente con un corrimiento hacia el norte de las bandas bioclimáticas a causa del mayor calentamiento del hemisferio respectivo, al comparar con el hemisferio sur, el cual es más oceánico y en consecuencia con mayor inercia térmica; además, simulaciones realizadas por Stouffer et al (1988, citado por Robock, 1990; no se indica el GCM

FIG. N° : 6 VARIACION DE LA POSICION LATITUDINAL DE LAS ALTAS PRESIONES SUBTROPICALES DEL HEMIFERIO NORTE SEGUN LAS DIFERENCIAS DE TEMPERATURAS POLO-ECUADOR.¹



FUENTE : FLOHN (1977)

1 NO INCLUYE AREA MONZONICA DEL OCEANO INDICO

utilizado) sugieren que el hemisferio sur podría tender a enfriarse en un mundo $2xCO_2$, lo que también contribuiría a que las altas presiones subtropicales del hemisferio sur se corrieran hacia el norte de su posición habitual. Esto favorece a su vez el desplazamiento en el mismo sentido de la zona de convergencia intertropical.

Se puede agregar que un análisis de los resultados del modelo UKMET para los meses de enero y abril (época seca y transición a la pluviosa respectivamente), sugiere también una localización más al norte de lo habitual de la zona de convergencia intertropical en un mundo $2 \times CO_2$, tal como puede ser observado en las figuras 7.a y 7.b.

Un análisis de las figuras citadas muestra como las presiones atmosféricas se incrementan al sur de los 5 grados de latitud sur, al tiempo que sobre el territorio venezolano se nota una disminución de presión. Esto es consistente con un corrimiento hacia el norte por parte de las celdas de altas presiones en los hemisferios respectivos, lo que a su vez significa una posición más al norte de la zona de convergencia intertropical, ya que ésta se localiza entre dichas celdas. No obstante, también debe destacarse que en la tabla No. 11 que se mostró anteriormente el modelo UKMO no propone un aumento de precipitación en el mes de enero, único para el que se dispuso de datos para la época seca. Sólo el modelo GFDL propone incrementos de precipitación para el mes citado en Barinas (+20%) y Turén (+10%).

FIG. N°: 7 CAMBIOS DE PRESION (mb) EN ENERO Y ABRIL POR EFECTO INVERNADERO (2 x CO₂) PARA EL CENTRO Y NORTE DEL CONTINENTE SURAMERICANO. MODELO UKMO.

FIG. N°: 7.a ENERO

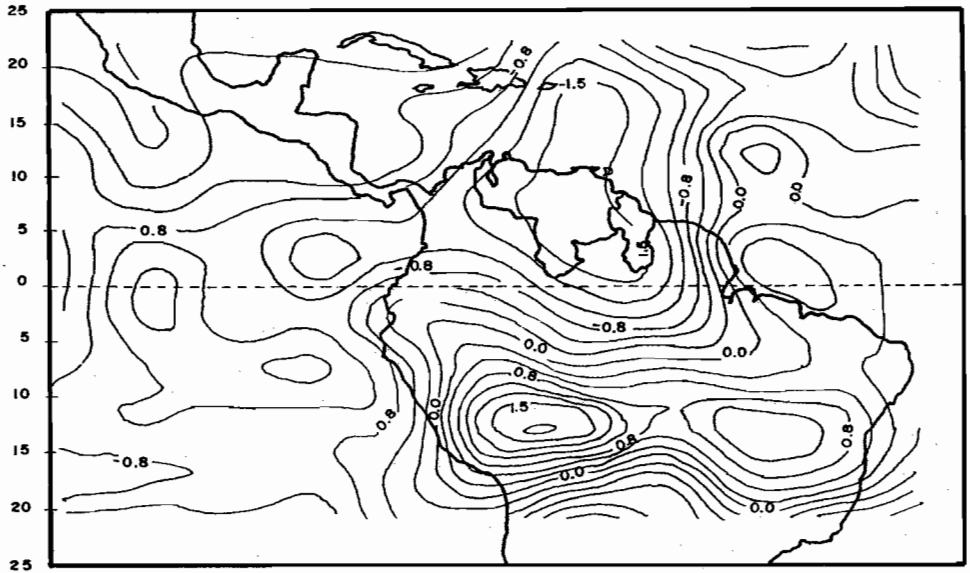
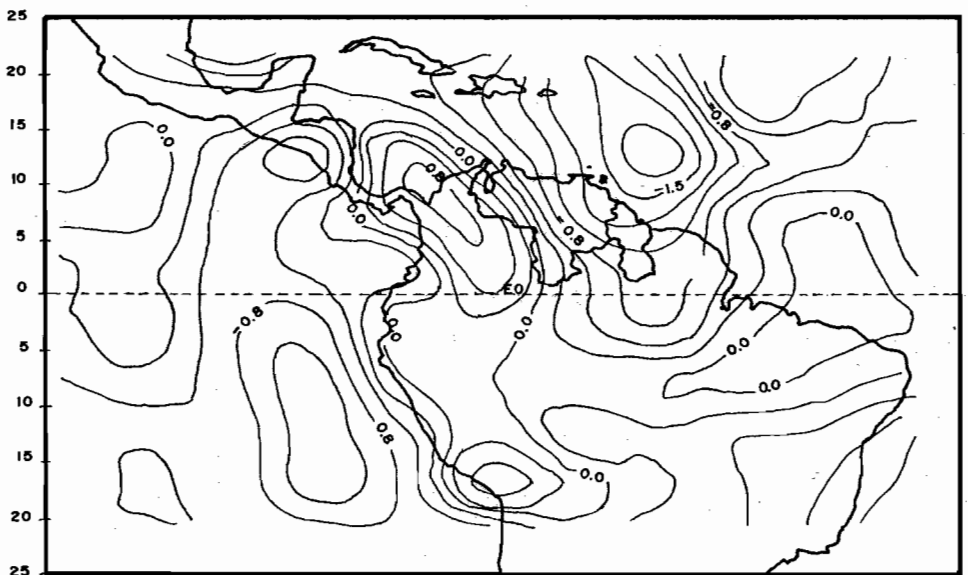


FIG. N°: 7.b ABRIL



Otro aspecto que debe destacarse es que en el taller del mes de abril se planteó que las precipitaciones van a aumentar por el efecto invernadero, lo que significa en base a la dinámica actual del comienzo de la época de precipitaciones en años pluviosos, que se espera que tal época comience entonces más temprano (apoyado por los resultados del análisis de los años del clima actual con precipitaciones anuales por encima del promedio).

Lo anterior quiere decir que si se asume que las precipitaciones en el futuro van a aumentar, por lo menos los meses de finales de la época seca (febrero-marzo) pudieran ser más pluviosos. En este sentido, se trató de averiguar el aumento de precipitación que sería necesario en los meses de febrero, marzo y abril para que la preparación de tierras se diera en el mes de marzo y la siembra durante el mes de abril y sin necesidad de riego adicional (en la actualidad los meses típicos de preparación de tierra y sembrado son abril y mayo respectivamente).

Se debe aclarar en relación al escenario de cambio climático planteado anteriormente, que de ninguna manera se está proponiendo que sea conveniente trasladar la época tradicional de cultivo al mes de abril, ya que de acuerdo a lo señalado por el profesor Rigoberto Andressen (comunicación personal) este tipo de estrategia pudiera generar problemas de planificación agrícola; sin embargo, de producirse un cambio climático como el citado, los

agricultores podrían verse obligados a realizar tal traslado temporal de la época de preparación de tierra y siembra, ya que hay que considerar que la preparación de tierras en la actualidad durante el mes de abril es una respuesta a la necesidad de realizar dichas labores en condiciones no excesivas de humedad en el suelo. En consecuencia, si en el futuro el mes de marzo pasa a tener las características que presenta actualmente el mes de abril, los agricultores probablemente prepararán la tierra en el mes de marzo y sembrarán en abril.

En general, para el estudio de las propuestas de escenarios de cambios climáticos en Barinas y Turén, se utilizaron las salidas cartográficas de los GCMs UKMO, GISS, GFDL y OSU, las cuales son mapas (suministrados por el prof. Alan. Robock de la Universidad de Maryland, USA) que incluyen al continente suramericano y muestran isolíneas de cambio de temperatura y relaciones de cambio de precipitación para condiciones de $2 \times \text{CO}_2$. Si bien los mapas utilizados presentan escalas bastante pequeñas, su densidad de isolíneas permitió realizar un proceso de interpolación para calcular los valores de cambio en Barinas y Turén, los cuales fueron analizados en conjunto para ver las tendencias generales sugeridas por los GCM y poder decidir qué cambios aplicar a la base de datos climáticos sin modificar.

Los cambios de precipitación y temperatura propuestos por UKMO, GFDL, GISS y OSU para Barinas y Turén se

sintetizan en las tablas 12 y 13

Tabla No. 12

Cambios de Temperaturas (°C) en un Clima 2xCO₂ Sugeridos para Barinas y Turén por los Modelos GFDL, OSU, GISS y UKMO

MODELO	T U R E N				B A R I N A S			
	ENE.	ABR.	JUL.	OCT.	ENE.	ABR.	JUL.	OCT.
GFDL	1.99	2.33	2.39	2.43	2.05	2.25	2.30	2.43
OSU	2.34	2.53	2.21	2.15	2.32	2.51	2.27	2.22
GISS	2.90	3.00	3.00	3.51	2.80	3.20	3.00	3.46
UKMO	5.00	3.25	3.45	3.88	5.50	2.20	3.60	4.00

Obsérvese como los modelos GISS, UKMO y GFDL sugieren mayores incrementos térmicos en los meses de julio y octubre respecto al mes de abril.

Tabla No. 13

Relaciones de Cambio de Precipitación entre el Clima Actual y el Clima bajo Efecto Invernadero (2xCO₂) Sugeridos para Barinas y Turén por GFDL, OSU, GISS y UKMO.

AREA	T U R E N				B A R I N A S			
	GFDL	OSU	GISS	UKMO	GFDL	OSU	GISS	UKMO
ENE.	1.1	0.8	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0
ABR.	1.0	.95	.85	1.15	1.35	1.0	.75	1.1
MAY.	0.9	1.0	1.2	1.0	1.0	1.1	1.2	1.0
JUN.	1.25	1.35	1.25	1.2	1.25	1.35	1.35	1.15
JUL.	1.0	1.15	1.05	1.3	1.0	1.15	1.2	1.25
AGT.	.95	1.5	1.0	0.85	1.0	1.5	1.0	0.9
SEP.	1.25	1.0	1.0	1.05	1.25	1.0	1.0	0.95
OCT.	0.85	1.2	0.8	0.9	1.0	1.25	0.9	0.95

Obsérvese como en el mes de agosto el modelo UKMO sugiere disminución de precipitación tanto en Barinas como en Turén (-10 y -15% respectivamente).

3.3. Síntesis de la Metodología Aplicada

-Se identificó la actividad que va a ser impactada por efecto de los cambios climáticos: cultivo de maíz con el híbrido CENIAP PB-8;

-Se identificaron las localidades donde se realizan las actividades agrícolas a ser impactadas: Barinas y Turén;

-Se dispuso de un medio con el cual se estableció la relación entre los parámetros climáticos y el cultivo: modelo biofísico de simulación CERES-Maíz;

-Se identificaron los parámetros climáticos y su grado de detalle: radiación solar global, temperaturas máximas y mínimas y precipitación, a nivel diario, tal como lo requiere el modelo CERES-Maíz;

-Se usaron las salidas de los GCMs combinadas con el juicio de expertos climatólogos sobre el clima actual y probable clima futuro en el área de estudio, para producir una serie de escenarios de cambios climáticos: Taller sobre Variabilidad Climática y Cambios de Clima en Venezuela y la Región del Caribe 1990, más algunos modestos aportes por parte del suscrito.

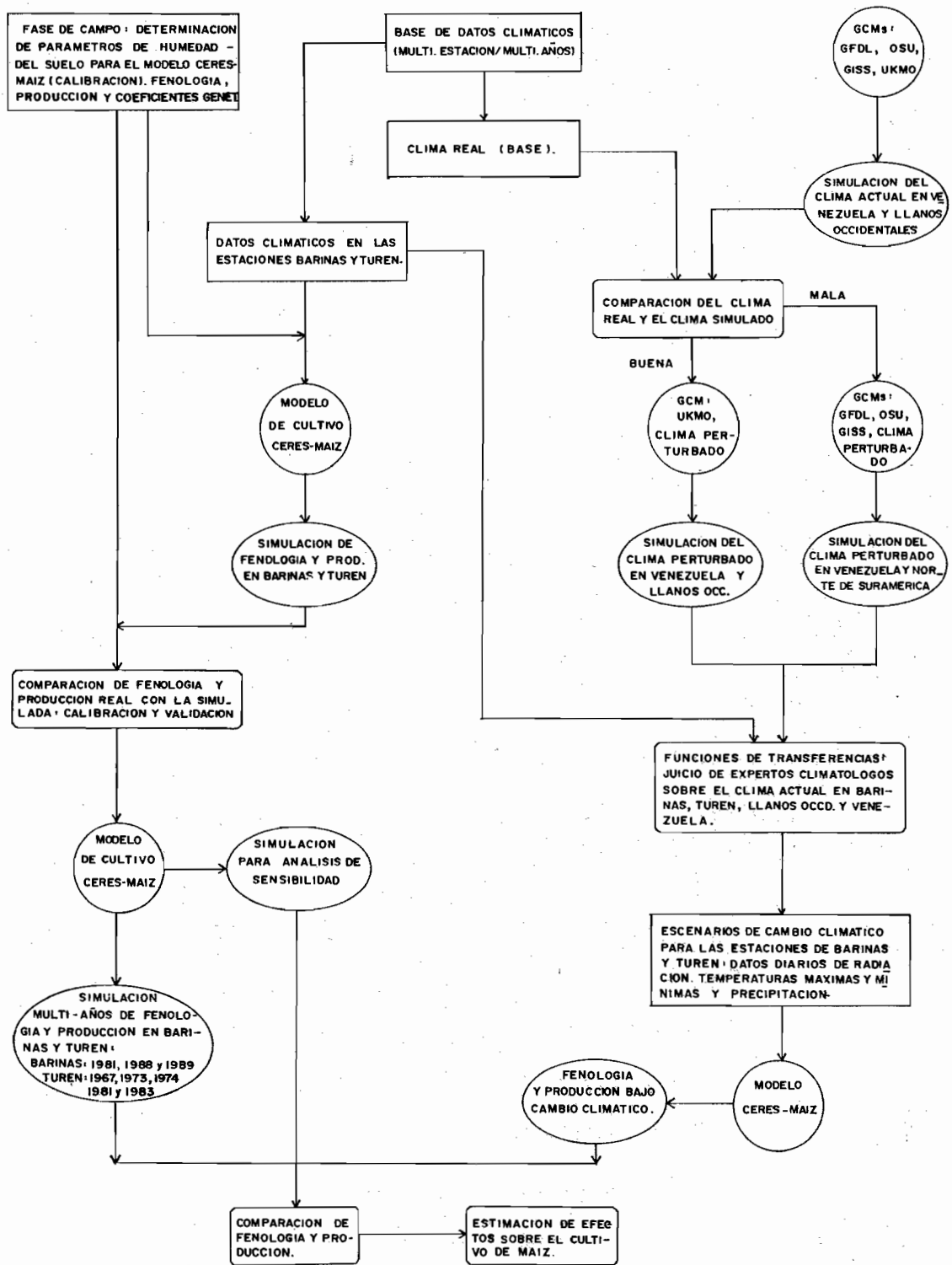
En el esquema metodológico anterior se agrega lo relativo a la fase de campo (calibración de aspectos hídricos en el modelo CERES-Maíz), la validación (aportado por otros investigadores) y el necesario análisis de sensibilidad previo a la interpretación de los resultados.

Para una mejor comprensión del esquema metodológico seguido véase la figura No. 8.

Por último se debe agregar que el análisis de sensibilidad realizado se aplicó preferentemente a los años bases promedios (Turén 1967 y Barinas 1988), aunque en el caso de Turén, debido a que el año de 1967 presenta saturación del elemento radiación desde el punto de vista productivo, se hizo un análisis de sensibilidad también para el año de 1981, el cual presentó un bajo nivel de radiación y en consecuencia sí se mostró mayor sensibilidad en este aspecto. En general, los análisis de sensibilidad son un paso necesario en la metodología de utilización y aplicación de los modelos, ya que permiten averiguar el peso relativo de parámetros individuales (para nuestro caso sobre todo los de tipo climático) en la determinación de las respuestas del sistema que se esté estudiando.

FIGURA N° : 8 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.



4.- RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Análisis de Sensibilidad (gráficos asociados en las páginas 91 a 96).

4.1.1. Efectos de los Cambios de Precipitación

En las figuras 9 y 10 se muestran para los años promedio los efectos de la variación del elemento precipitación sobre la producción, asumiéndose dos niveles de agua aprovechable en el suelo al momento de la siembra (capacidad de campo y 20%). Tanto para Barinas como para Turén no se observan respuestas importantes ni ante los incrementos ni ante la disminución de precipitación hasta +50% y -50% respectivamente. Sólo en el caso de Barinas se nota cierta reducción de producción en -50% (pero < 2%).

Lo anterior se explica por que en los años base el nivel de pluviosidad es realmente alto para un cultivo como el maíz, ya que se sabe que con unos 500 a 900 mm. de precipitación bien distribuidos es suficiente. En este sentido, en los años de 1967 y 1988 precipitaron entre mayo y septiembre 1151 y 1109 mm. para Turén y Barinas respectivamente.

Un análisis similar pero para años de menor pluviosidad que los anteriores (Turén 1974 y Barinas 1989; figuras 11 y 12) muestra que si se simulan efectos negativos de la falta de agua cuando se siembra al 20% del agua aprovechable en el suelo, con reducciones de producción más marcadas en Barinas: en el orden del 30% para disminuciones de

precipitación de 40%, mientras que para -50% de precipitación las reducciones de producción son cercanas al 64%.

Para el caso de Turén se nota como a partir de una disminución del 20% en las precipitaciones se producen reducciones de producción en el orden de 6%. Para -30% de precipitación las reducciones de producción están cercanas a 10%, mientras que para -40 y -50% de precipitación las reducciones de producción son de 15 y 43%.

Si se toma en cuenta que en Barinas el clima fue más lluvioso que en Turén para los dos años base que estamos analizando (915.3 mm. y 871 mm. entre mayo y septiembre para Barinas y Turén respectivamente), se concluye que el mayor efecto del stress hídrico simulado para Barinas pudiera deberse a que los parámetros de agua en el suelo en esta localidad son más altos, lo que trae como consecuencia una mejor detección de dicho efecto.

En las figuras 13 y 14 se muestran los principales componentes de la producción afectados por el problema de la reducción de la disponibilidad hídrica. Se observa que en el caso de Barinas (fig. 13) el componente más afectado es el peso de los granos, que comienza a disminuir a partir de una reducción de precipitación de -40%, lo que explica la reducción de producción a partir de este mismo nivel observada en la figura 11. En Turén se nota (fig. 14) que a diferencia de Barinas el componente más afectado por la falta de agua es el número de granos.

La diferencia entre Barinas y Turén se debe a que en el primer caso los efectos de la falta de agua se produjeron sobre todo en la fase de llenado de los granos, mientras que en Turén el déficit hídrico afectó el período previo a la polinización y desde ésta hasta el comienzo del llenado de los granos. La falta de agua en el período previo a la polinización trajo como consecuencia un menor desarrollo foliar, lo que implicó niveles menores de fotosíntesis durante el período crítico que va entre la polinización y el comienzo del llenado de los granos: si se toma en cuenta que el modelo hace depender el número de granos por mazorca de la fotosíntesis neta acumulada en este último período (anexo No. 1), se explica entonces el efecto de la falta de agua en la determinación del número de granos por mazorca.

Comparando las estrategias de comenzar a sembrar con el suelo a capacidad de campo (lo que implica riego presiembra) o con 20% del agua aprovechable, se nota en las figuras anteriormente comentadas lo favorable que podría ser para los agricultores regar antes de sembrar, ya que si los niveles de precipitación durante el ciclo de desarrollo del cultivo bajan hasta en un 50% el modelo predice que no habrán reducciones de producción.

A nivel general se observa también en las figuras 9 a 14 que el aumento de precipitación no ejerce efecto en la producción, incluyendo el caso de los años secos, los que según el modelo CERES-Maíz no serían

representativos en realidad de condiciones de falta de agua. Como se verá cuando se discuta lo relativo al clima actual, 1974 en Turén a pesar de ser el más seco de todos los años base seleccionados fue el de mayor producción simulada.

4.1.2. Efectos de los Cambios de Radiación Solar

En las figura 15 se muestra el efecto de los cambios de radiación solar en la producción del híbrido PB-8, observándose como para Turén (año base promedio: 1967) el modelo interpreta condiciones de saturación radiativa, ya que la producción no aumenta con los aumentos de radiación solar e inclusive no disminuye para reducciones de radiación de -15%. En cambio para Barinas si se nota un efecto tanto de los incrementos radiativos como de las disminuciones, lográndose la saturación cuando los aumentos llegan al 15% (falta de radiación en un 15%), mientras que a partir de disminuciones de radiación solar de sólo el 5% se produce una baja en la producción de 4%. Para el caso de reducciones de 30% en la radiación la disminución de producción alcanza el 29.5%.

En Turén sólo a partir de disminuciones de radiación de 20% se notan reducciones de producción (exceso de radiación en un 20%). Las disminuciones de producción para el caso extremo de baja de radiación en un 30% es de aproximadamente 15%.

La poca sensibilidad observada en Turén ante los cambios radiativos se debe a que el año de 1967 más bien

presentó exceso de radiación, tal como se señaló anteriormente. Para un año de baja radiación como 1981 si se nota un efecto de los cambios radiativos en la producción, tal como se puede apreciar en la figura 15, donde se presentan incrementos de producción ante cualquier aumento de radiación y viceversa. Los aumentos para incrementos radiativos de 30% están en el orden de un 27.5%, mientras que las reducciones de producción para una disminución de radiación de 30% son cercanas al 31%.

Los efectos de la disminución de la radiación solar se notaron sobre todo en la determinación del número de granos por mazorca, tal como se puede observar en la figura 16, debiéndose destacar que el año 1988 en Barinas fue de mayor nivel radiativo que el de 1981 en Turén, lo que explica tanto el menor número de granos simulados en Turén como su mayor sensibilidad ante los aumentos radiativos.

En la figura No. 16 también se puede observar que para niveles de aumentos de radiación de 15% en Barinas se logra la saturación en cuanto al número de granos por mazorca, lo que quiere decir que en el año promedio de esta localidad todavía falta un 15% de radiación solar para lograr el número potencial de granos por mazorca del híbrido PB-8.

Para el caso específico de Turén la figura 16 muestra dos aspectos básicos:

- En las condiciones del año 1967 ya se produce

el número potencial de granos por mazorca (400) y en consecuencia no se nota el efecto de aumentar la radiación solar;

- Por otra parte, aún para disminuciones de 15% en la radiación solar en 1967 no se produce un menor número de granos por mazorca; así mismo, las diferencias de radiación solar en los años base de 1967 y 1981 explican las diferencias en el número de granos por mazorca simulados, ya que para el año de 1981 aún con aumentos de radiación de 30% todavía no se alcanza el potencial de PB-8 que, como se señaló, es de 400 granos por mazorca, aunque se nota que para este nivel radiativo ya se está cerca de dicho potencial. Esto nos da una idea de lo subóptimo que fue un año tan nuboso y lluvioso, como 1981 en Turén para lograr mejores rendimientos.

No se notaron efectos de los cambios de radiación solar en la duración de los eventos fenológicos, ya que éstos dependen básicamente de la acumulación de grados días o a factores asociados a la sensibilidad al fotoperíodo.

4.1.3. Efectos de los Cambios de Temperatura

Los efectos de los cambios individuales de las temperaturas máximas y mínimas diarias, se analizaron tanto para la producción como para algunos eventos fenológicos de interés (fin de la fase juvenil, polinización, fase de llenado de granos y la madurez fisiológica).

En la figura 17 se puede observar el efecto de aumentos y disminuciones en la temperatura máxima diaria sobre la producción de los años base promedios en Barinas y Turén. En los dos casos se nota que los mayores aumentos de la máxima diaria (+3.5 °C) causan una reducción de producción en el orden de 12% y 20,2 % para Turén y Barinas respectivamente. En el caso de disminución térmica el comportamiento es algo diferente en las dos localidades, ya que en Turén se nota un aumento continuo de producción pero en Barinas al aumento inicial logrado al disminuir la temperatura máxima en 0.5 °C, le sigue una disminución de producción cuando se baja la temperatura en un grado, tampoco notándose un efecto muy marcado en los siguientes niveles sucesivos de disminución térmica.

El comportamiento anteriormente citado se debió a que la modificación de la temperatura hizo que el desarrollo de los eventos fenológicos se desplazara en el tiempo respecto a la base de datos climáticos sin modificar, lo que a su trajo como consecuencia que ciertas fases claves para determinar la producción como la que se desarrolla entre la polinización y el comienzo del llenado de los granos (donde como se señaló se determina el número de granos por mazorca), se simulara bajo condiciones radiativas y térmicas menos favorables, sobre todo en relación al elemento radiación.

En Turén su mayor incidencia de radiación solar a

nivel general hace menos crítico el desplazamiento de las fases fenológicas en sus efectos sobre la determinación de los rendimientos finales.

La figura 18 muestra el comportamiento productivo observado para el caso de cambios en las temperaturas mínimas. Comparando con el efecto de las máximas se nota menor acción reductiva de los niveles de producción, lo que se explica porque el modelo CERES-Maíz pondera como ya se señaló efecto de los estres térmicos sobre la producción asumiendo que el 75% del efecto negativo lo ejerce la temperatura máxima y el 25% la mínima. Las mayores disminuciones de producción se dan otra vez en Barinas, pero ahora sólo alcanzan un 12,35 % para aumentos térmicos de 3.59 C. En Turén este mismo incremento en la temperatura mínima sólo reduce la producción base del año 1967 en 4.7%.

Las reducciones de producción señaladas anteriormente se pueden entender mejor por el efecto que los incrementos térmicos ejercen sobre el número de granos por mazorca, el tiempo de llenado y las tasas de llenado (estas dos últimas características determinan el peso final de los granos).

En las fig. 19 y 20 se muestra el efecto de los cambios en la temperaturas máxima en Barinas y Turén, notándose que el aumento térmico causa en Barinas un disminución del tiempo de llenado, del número de granos y por lo tanto del peso final de los granos. Los incrementos de mayor magnitud disminuyen el tiempo de llenado en 4 días y

el número de granos desde 363 (clima base) hasta 331, mientras que el peso de los granos se reduce de 287 mg. a 251 mg.

En Turén se observa que los incrementos térmicos sólo afectan la duración de la fase de llenado y el peso final de los granos, ya que el número de granos por mazorca se mantiene en el potencial de 400, lo que es consecuencia de que el año base de 1967 presentó, como ya se señaló, un exceso de radiación desde el punto de vista productivo, no así en el caso de Barinas en 1988.

Las disminuciones térmicas ejercen lógicamente un efecto contrario al citado anteriormente, observándose que en Barinas aumenta el período de llenado, el número de granos y el peso de los granos. Sin embargo, las mayores disminuciones de temperatura máxima en Barinas no son suficientes para llevar el número de granos por mazorca a su potencial de 400, lo que se explica por el efecto de los niveles bases de radiación solar, ya que son subóptimos en de 15% de acuerdo a lo que se observó en la figura 16.

Obsérvese como para el caso de Turén (fig. 20) las disminuciones de las temperaturas máximas no incrementan el número de granos por mazorca, ya que en el clima base se da el potencial de 400 debido al alto nivel radiativo.

Analizando ahora los efectos de los cambios en la temperatura mínima, se observa en las figuras 21 y 22 que la disminución del tiempo de llenado es bastante similar al que se obtuvo con los cambios de la

temperatura máxima, lo que se explica por que el modelo no hace diferencias entre los dos tipos de temperatura para el cálculo de los eventos fenológicos. En cambio, para el caso del número de granos por mazorca y el peso final de los granos si se observa efecto, aunque comparando con el impacto de los cambios en la temperatura máxima se observa que el de la mínima es menor, lo que se asocia a la ya señalada ponderación que hace el modelo CERES-Maíz destacando más el impacto de las temperaturas máximas sobre los niveles productivos.

En cuanto al efecto de la variación térmica sobre la duración de los eventos fenológicos, se tiene que independientemente de los cambios térmicos aplicados, la germinación siempre que exista un nivel mínimo de agua en el suelo (por los menos 5%, lo que para la realidad parece muy bajo) se da en un día, mientras que la emergencia se produce 3 días después (a 4 días de la siembra).

En las figuras 23 a 26 se pueden observar los efectos de los cambios en las temperaturas máximas y mínimas diarias sobre el final de la fase juvenil, la polinización y la madurez fisiológica.

La figura 23 muestra como en Barinas la fase juvenil se adelanta un día aún para incrementos de 30 C y se retrasa también un día para disminuciones térmicas de la misma magnitud. Mayor efecto se observa sobre el comienzo de la polinización y la madurez fisiológica, ya que éstas se

adelantan 5 y 8 días respectivamente para los incrementos de 30 C, mientras que se atrasan 3 y 8 días para disminuciones térmicas de la misma magnitud.

En Turén (fig. 24) se produce un comportamiento más o menos similar al de Barinas, aunque el retraso de la madurez fisiológica para disminuciones térmicas de 30 C es ahora de 10 días.

En relación a los efectos de los cambios en la temperatura mínima, se observa en la figura 25 que las diferencias al comparar con los efectos de la máxima no pasan de un día, mientras que en Turén (fig. 26) estas diferencias tampoco son notables, ya que es de sólo dos días para el caso de la madurez fisiológica (incremento de 2 90).

Podemos concluir que el aumento térmico acorta la aparición de los eventos fenológicos mientras que la disminución térmica los alarga, lo que está dentro de lo esperado según los conceptos tradicionales de duración de esos eventos en función de los cambios de acumulación de grados días de acuerdo a la variación térmica. Aunque se debe destacar que para el caso de la fase entre el final del período vegetativo (V6) y la inducción floral no se simularon efectos de los cambios térmicos, durando siempre 5 días. Esto se explica por que la duración de esta fase fenológica depende del fotoperíodo y no de los cambios térmicos.

FIG. 9 PRODUCCION DE PB-8 SEGUN CAMBIOS DE PRECIPITACION Y RESERVAS HIDRICAS AL MOMENTO DE SEMBRAR BARRINAS (AÑO BASE 1958)

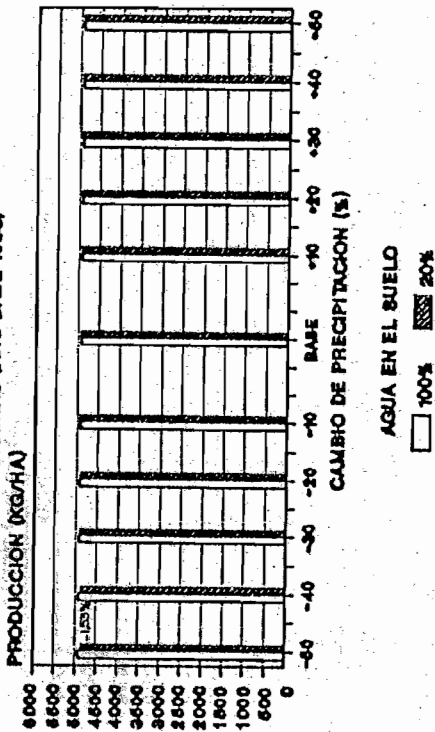


FIG. 10 PRODUCCION DE PB-8 SEGUN CAMBIOS DE PRECIPITACION Y DE RESERVAS HIDRICAS AL MOMENTO DE SEMBRAR TUREN (AÑO BASE 1967)

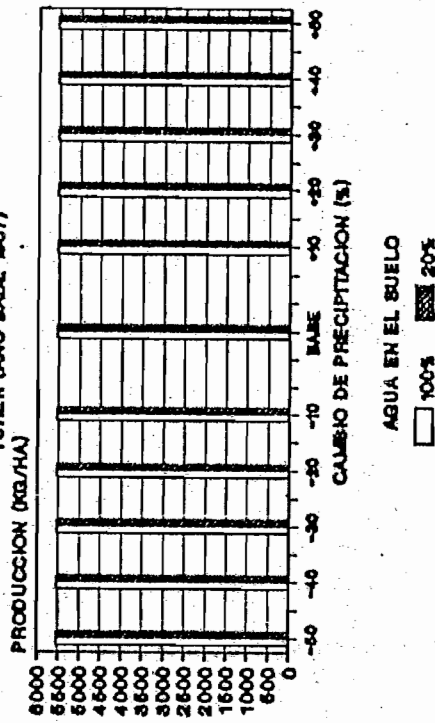


FIG. 11 PRODUCCION DE PB-8 SEGUN CAMBIOS DE PRECIPITACION Y DE RESERVAS HIDRICAS AL MOMENTO DE SEMBRAR BARRINAS (AÑO BASE 1958)

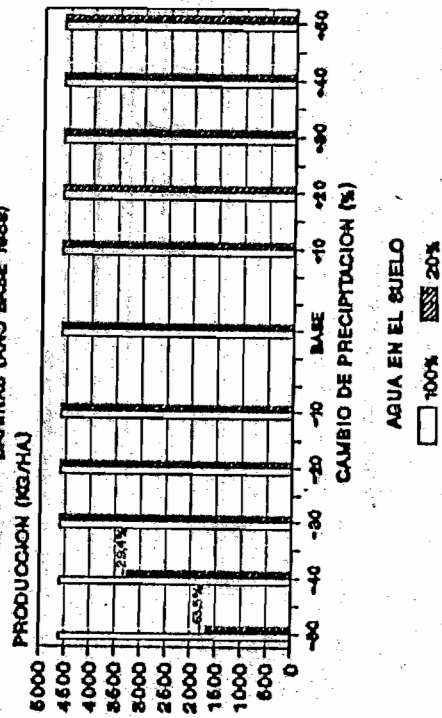


FIG. 12 PRODUCCION DE PB-8 SEGUN CAMBIOS DE PRECIPITACION Y DE RESERVAS HIDRICAS AL MOMENTO DE SEMBRAR TUREN (AÑO BASE 1974)

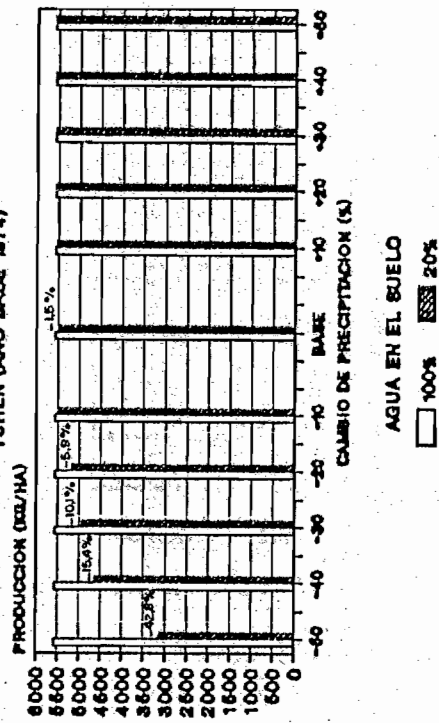


FIG. 13 NUMERO Y PESO DE GRANOS EN EL HIBRIDO PB-8 SEGUN CAMBIOS DE PRECIPITACION BARINAS (ARO BASE 1988)

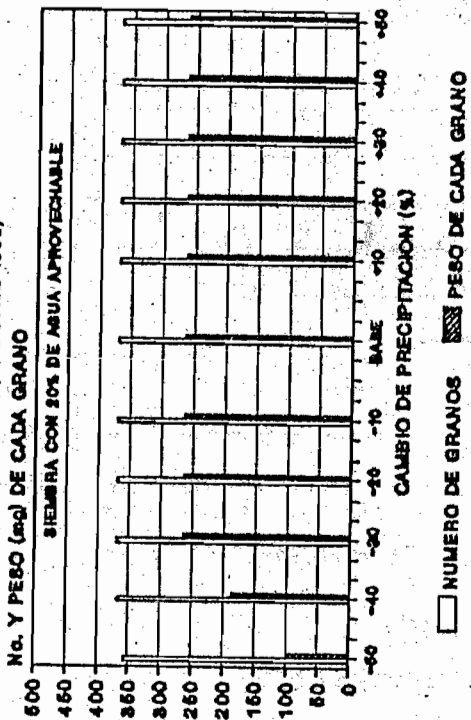


FIG. 14 NUMERO Y PESO DE GRANOS EN EL HIBRIDO PB-8 SEGUN CAMBIOS DE PRECIPITACION TUREN (ARO BASE 1974)

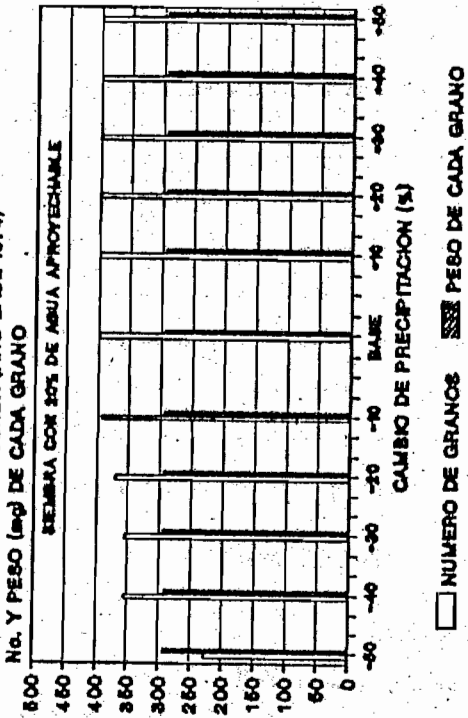


FIG. 15 SENSIBILIDAD DE LA PRODUCCION DEL HIBRIDO PB-8 ANTE LOS CAMBIOS RADIATIVOS EN BARINAS Y TUREN

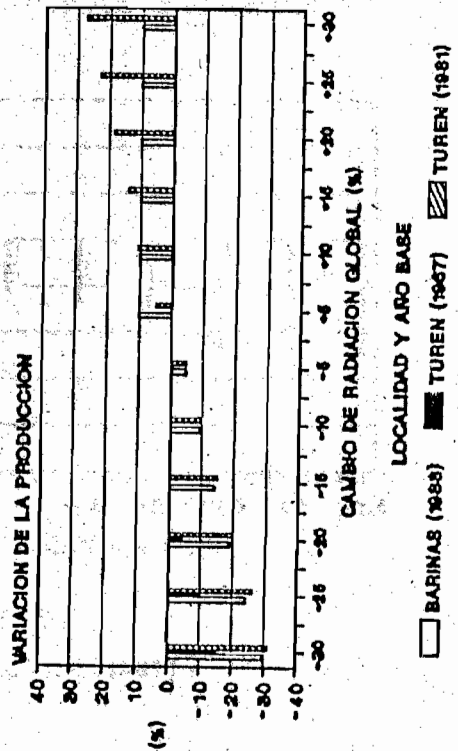


FIG. 16 NUMERO DE GRANOS POR MAZORCA DEL HIBRIDO PB-8 ANTE LOS CAMBIOS RADIATIVOS EN BARINAS Y TUREN

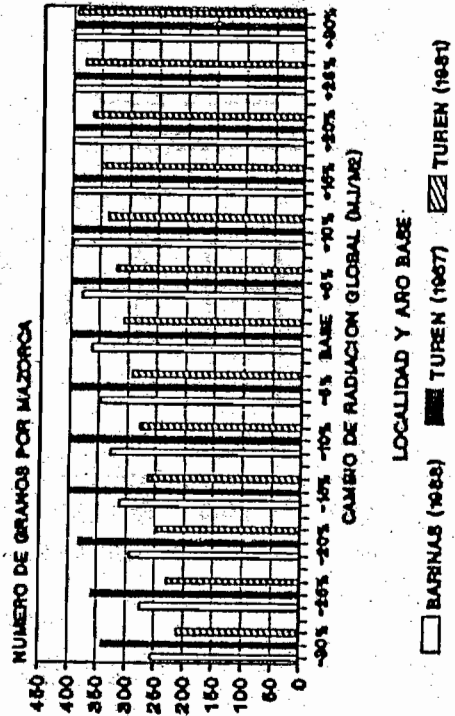


FIG. 17 SENSIBILIDAD DE LA PRODUCCION DEL HIBRIDO PB-8 ANTE CAMBIOS DE LA TEMPERATURA MAXIMA EN BARINAS Y TUREN

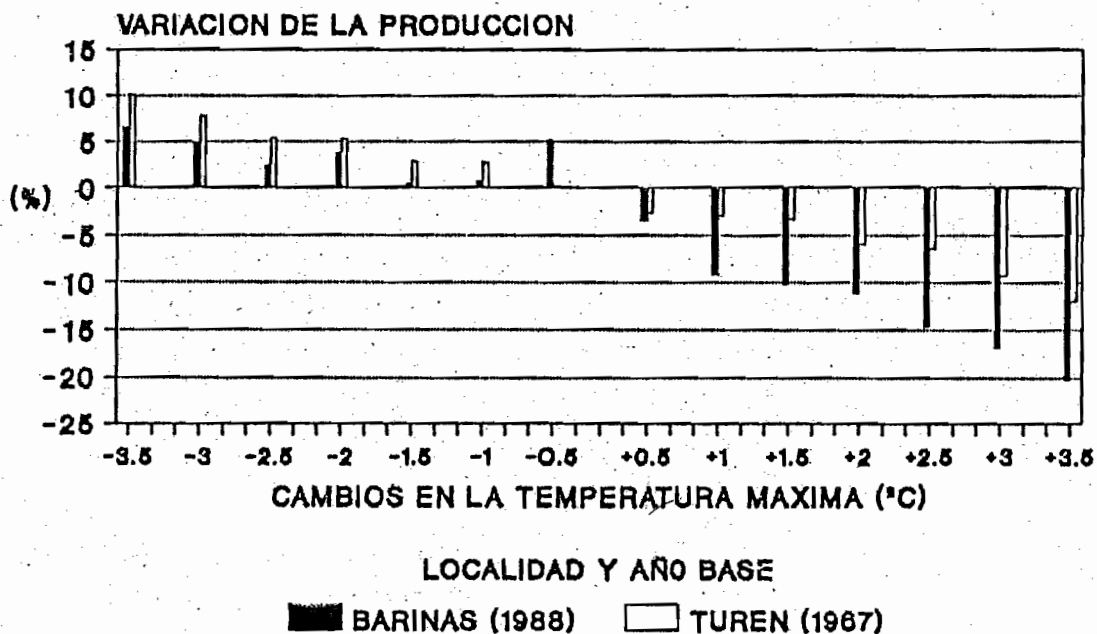


FIG. 18 SENSIBILIDAD DE LA PRODUCCION DEL HIBRIDO PB-8 ANTE CAMBIOS DE LA TEMPERATURA MINIMA EN BARINAS Y TUREN

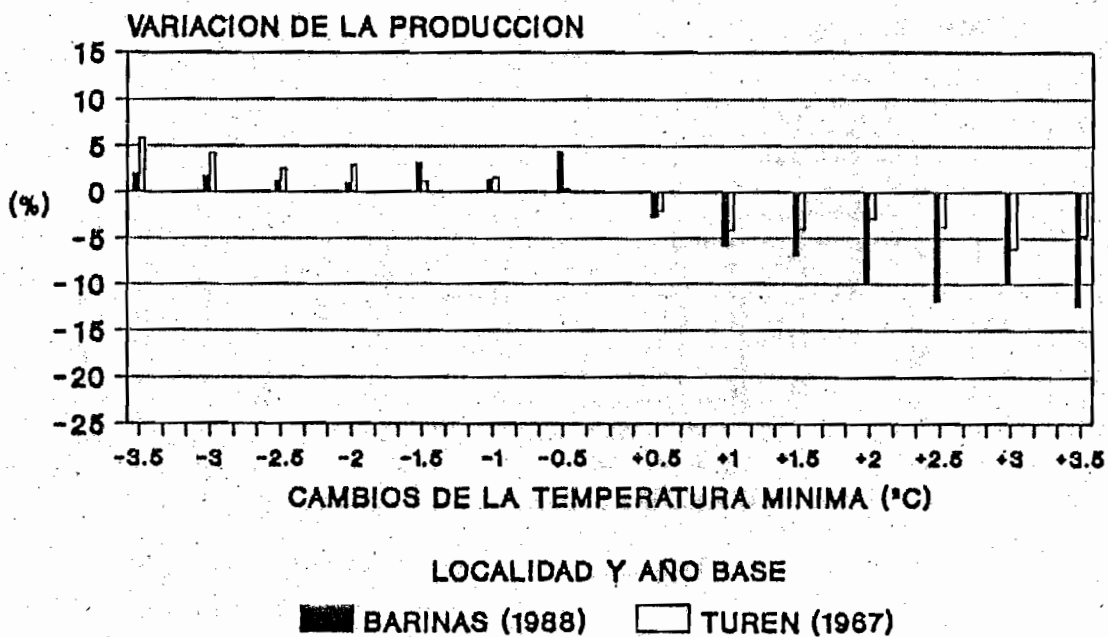


FIG. 19 TIEMPO DE LLENADO, NUMERO Y PESO DE LOS GRANOS DEL HIBRIDO PB-8 ANTE CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MAXIMA BARINAS (AÑO BASE 1988)

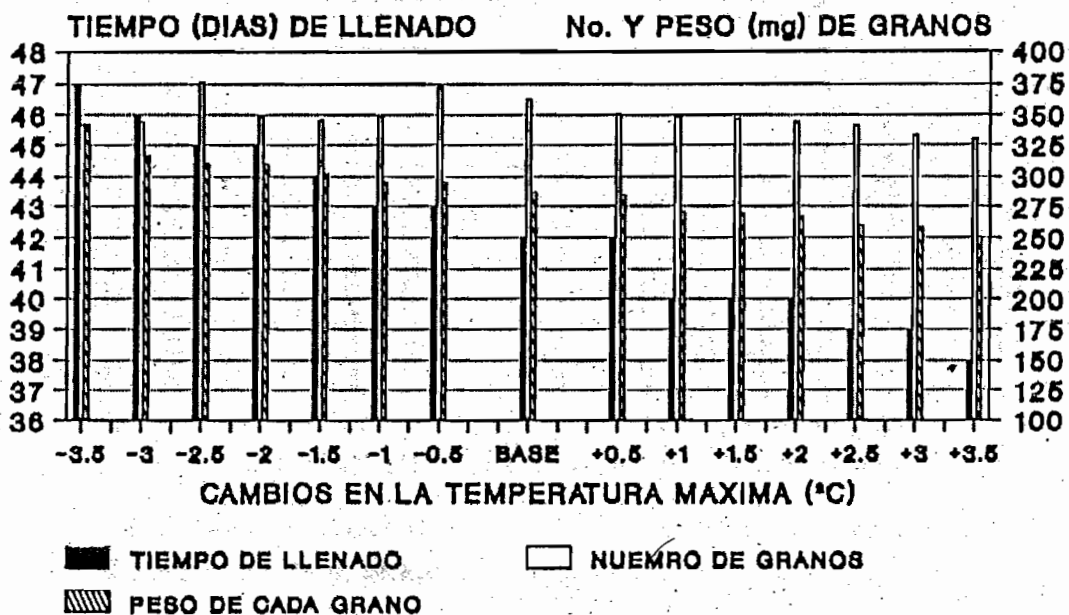


FIG. 20 TIEMPO DE LLENADO, NUMERO Y PESO DE LOS GRANOS DEL HIBRIDO PB-8 ANTE CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MAXIMA TUREN (AÑO BASE 1967)

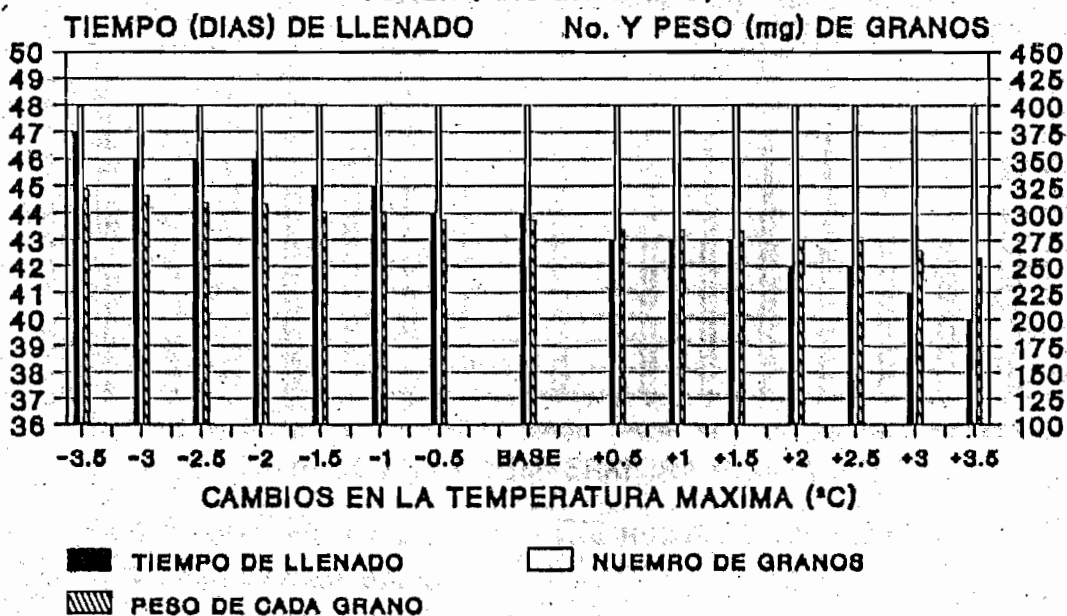


FIG. 21 TIEMPO DE LLENADO, NUMERO Y PESO DE LOS GRANOS DEL HIBRIDO PB-8 ANTE CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MINIMA BARINAS (AÑO BASE 1988)

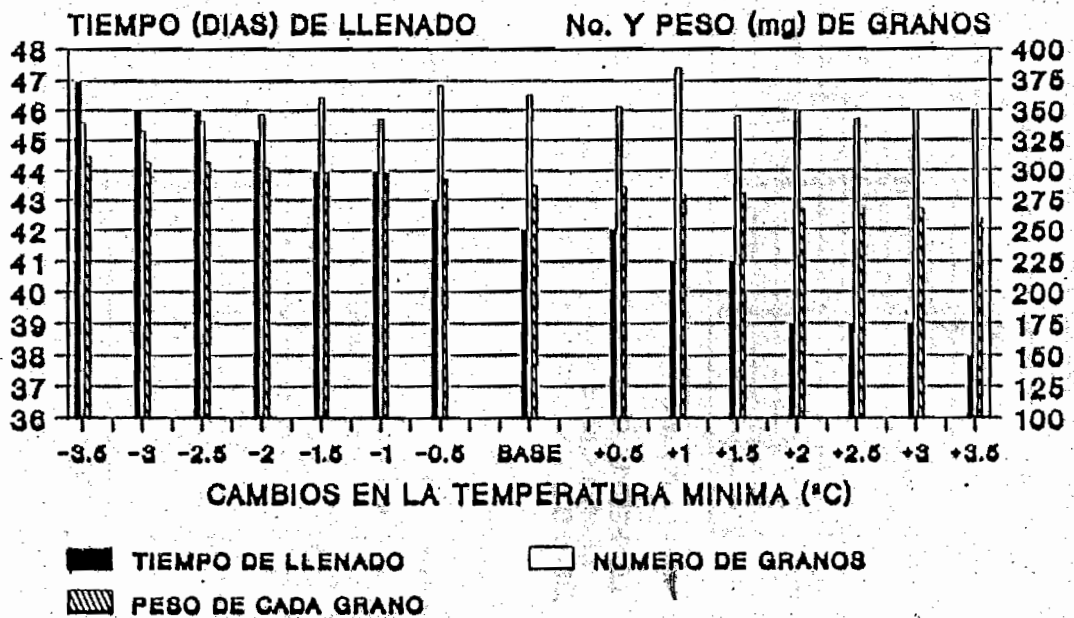


FIG. 22 TIEMPO DE LLENADO, NUMERO Y PESO DE LOS GRANOS DEL HIBRIDO PB-8 ANTE CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MINIMA TUREN (AÑO BASE 1987)

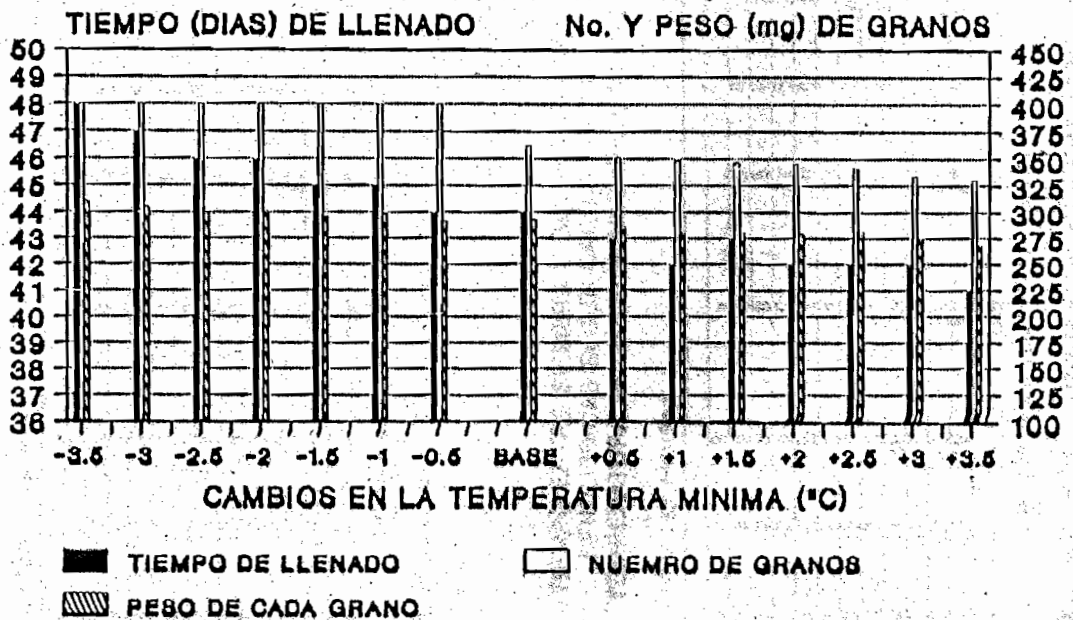


FIG. 23 TIEMPO ENTRE SIEMBRA Y ALGUNAS FASES FENOLOGICAS SEGUN CAMBIOS DE LA TEMPERATURA MAXIMA. BARINAS (BASE 1988)

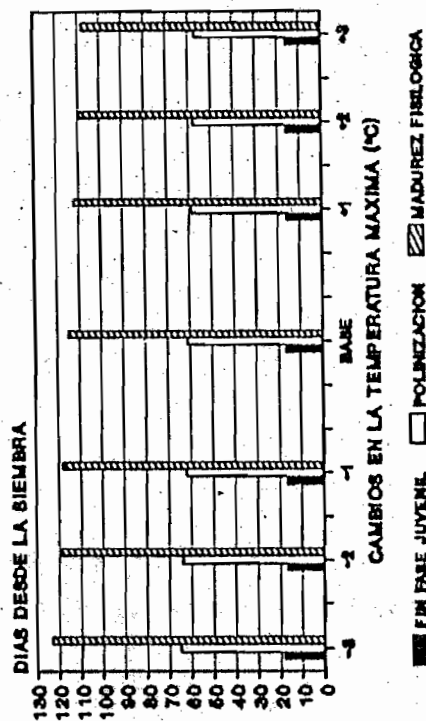


FIG. 24 TIEMPO ENTRE SIEMBRA Y ALGUNAS FASES FENOLOGICAS SEGUN CAMBIOS DE LA TEMPERATURA MAXIMA. TUREN (BASE 1967)

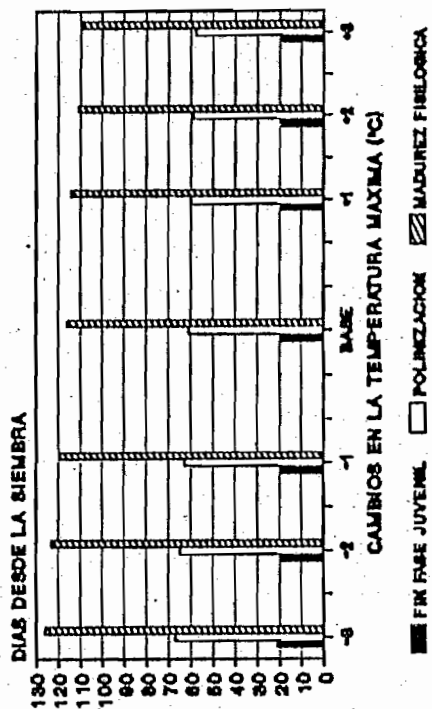


FIG. 25 TIEMPO ENTRE SIEMBRA Y ALGUNAS FASES FENOLOGICAS SEGUN CAMBIOS DE LA TEMPERATURA MINIMA. BARINAS (BASE 1988)

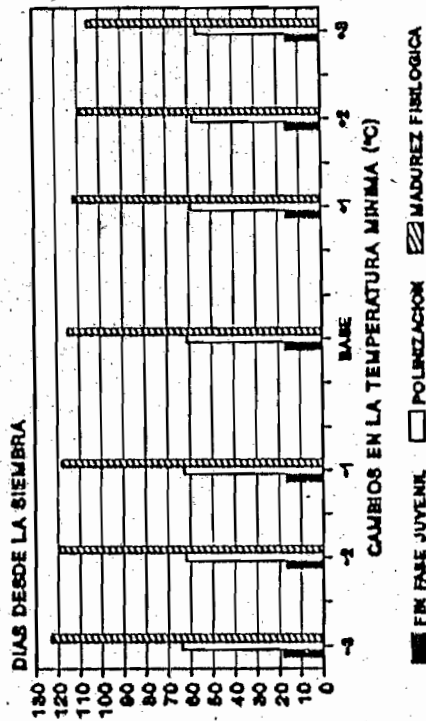
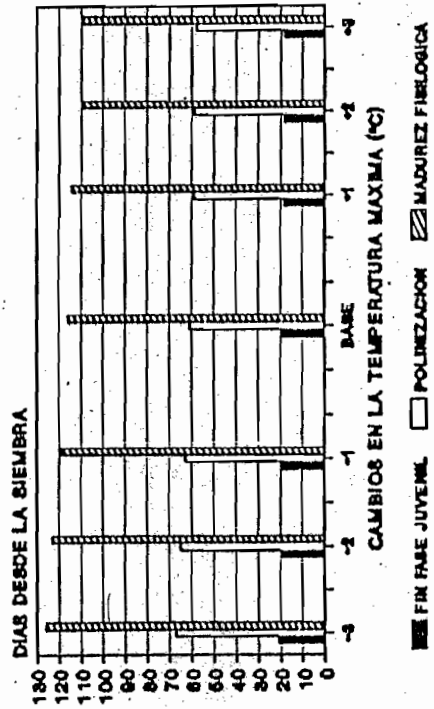


FIG. 26 TIEMPO ENTRE SIEMBRA Y ALGUNAS FASES FENOLOGICAS SEGUN CAMBIOS DE LA TEMPERATURA MINIMA. TUREN (BASE 1967)



4.2. Variabilidad Climática Actual (figuras asociadas en la página 102).

En las figuras 27 y 28 se muestran las simulaciones del modelo Ceres-Maíz en cuanto a producción (kg/ha) del híbrido CENIAP-PB8 para los años base seleccionados. Se puede notar que para el caso de la ciudad de Barinas el año de mayor producción resulta ser 1981, aunque en el caso de Turén es el de menor producción. El comportamiento citado se explica porque el año 1981 presentó muy baja radiación en Turén, no así en el caso de Barinas, ya que en esta localidad fue el de mayor nivel radiativo, lo que explica a su vez el que presente la mayor producción al comparar con el año promedio (1988) y el año de menor pluviosidad (1989). Este último, como se señaló en el capítulo de metodología, fue el que presentó de los tres años base seleccionados los menores niveles radiativos.

En 1981 la precipitación en el mes de abril en Turén fue de más de 500 mm. (unos 300 mm. en Barinas), lo que sin duda constituye un caso de extremos pluviométricos bastante notable. Benacchio (1983) señala que en ese año ocurrieron grandes pérdidas de maíz cultivado a causa del exceso de pluviosidad en los estados Portuguesa y Barinas, lo que no se refleja en las figuras 27 y 28, ya que vemos que para Barinas se simula como el de mayor producción y aún en el caso de Turén se predicen producciones de 4400 Kg/ha., lo que es todavía bastante alto si comparamos con los rendimientos promedios en los Llanos Occidentales, que

oscilan alrededor de los 2500 Kg/ha.

Lo anterior se explica por que el modelo CERES-Maíz no toma en cuenta los efectos de los excesos de agua (importante para incrementos de precipitación previstos por efecto invernadero y en un cultivo tan sensible a este tipo de problema como lo es el maíz). Si se agrega que el modelo tampoco toma en cuenta limitantes de nutrientes y competencia por malezas, se explica mejor el por qué simula producciones tan altas en un año base que en la realidad produjo grandes pérdidas por el problema de los excesos hídricos en los estados Portuguesa y Barinas.

En las figuras 27 y 28 se puede observar también que la producción en los años promedio es mayor para Turén (5543 Vs. 4918 Kg/ha.). Esto se debe básicamente al efecto de un mayor nivel radiativo en Turén, lo que trajo como consecuencia que el modelo simulara un número de granos por mazorca igual al potencial del híbrido PB-8 (400 granos por mazorca; véase la figura 30), mientras que en Barinas el número de granos por mazorca simulado fue de 362.62, a lo que se agrega que el peso de cada grano también fue menor en Barinas (0.287 gr Vs. 0.293 gr en Turén; compárese las figuras 29 y 30). En general, se encontró que el mayor nivel radiativo de Turén significó que en los años base se da el potencial del número de granos (a excepción del año 1981), lo que sólo ocurrió en Barinas para el año base de mayor nivel radiativo (1981).

Según la figura 28, en Turén el año base de mayor

producción sería el más seco (1974), lo que se explica por que el modelo no simuló problemas de falta de agua y predijo el número potencial de granos (año de alta radiación solar). Además, el tiempo de llenado fue el segundo más largo (después del año base de 1981, aunque este último presentó un número de granos mucho menor; ver la fig. 30).

El año de 1973 en Turén fue el más cálido de los años base, observándose en la figura 28 que respecto a los años de 1974, 1967 y 1983 presenta menor producción. En este caso el modelo simula bien el efecto de mayores niveles respiratorios a causa del incremento térmico relativo, lo que significa una menor producción neta a causa del consumo de parte de la producción bruta por fotosíntesis. Esto se reflejó en tasas de llenado más bajas, a lo que se puede agregar que el incremento térmico también favoreció una fase de llenado de grano más corta (fig. 30), todo lo que contribuyó a que el modelo simulara una menor producción. Sin embargo se puede observar que la producción del año 1973 es mayor que la de 1981, lo que se asoció a que los efectos del bajo nivel radiativo de este último año (menor número de granos), ya que en el caso de 1973 el modelo simula el potencial del número de granos por mazorca debido a su alto nivel radiativo, lo que impidió que las altas temperaturas afectaran ese componente de la producción.

Un aspecto interesante de resaltar es que para el año

1981 en Turén el modelo simuló el mayor peso de los granos, a pesar que fue también el de menor producción simulada. Esto se explica por lo señalado en relación a la baja radiación solar de dicho año, generando un menor número de granos, lo que hizo menos notable el mayor peso de los granos (esto último por efecto de las temperaturas más frescas al comparar con los otros años base). En el caso del año 1983 en Turén, se nota en la figura 28 que al comparar con el de 1981 se predice una mayor producción, lo que se explica por que si bien los dos años fueron bastante pluviosos, el de 1983 presentó un nivel radiativo mayor. Esto favoreció una mayor actividad fotosintética y en consecuencia un mayor número de granos por mazorca y tasas de llenado más altas, lo que aminoró el impacto del tiempo de llenado más corto al comparar con 1981 (fig. 30).

En la figura 29 se puede ver que para Barinas en 1989 (el año más cálido de los tres evaluados) se simula un comportamiento parecido al del año 1973 en Turén en cuanto a la duración del período de llenado de los granos, ya que es el más corto (39 días), mientras que en 1981 y 1988 la duración es de 42 días. En la figura 27 ya se vió que el año 1989 en Barinas es el de menor producción simulada; no obstante, a los efectos térmicos que acabamos de señalar se debe agregar que este año también fue el de menor nivel radiativo, lo que contribuyó junto a

las condiciones térmica menos favorables a que el número de granos por mazorca fuera más bajo que el del año 1981 (aunque un poco mayor que el del año 1988).

A nivel comparativo podemos concluir que el clima actual de Turén parece ser más adecuado para el cultivo del maíz a causa de su mayor nivel radiativo, a lo que se puede agregar que es menos lluvioso pero no tanto como para que sea considerado subóptimo por falta de agua. Los niveles térmicos son bastante parecidos, aunque un poco más cálido Turén. En las dos localidades el modelo CERES-Maíz sugiere que el clima actual presenta niveles de precipitación superiores a los requerimientos mínimos del cultivo, aún en años considerados secos. Por otra parte, si se toma como referencia la producción base del año de mayor producción simulada en las dos localidades (Turén 1974 y Barinas 1981), se tiene que las reducciones de producción por causa de la variabilidad climática actual serían las siguientes. Turén: 1967 = -0.04%, 1983 = -2.28%, 1973 = -5.4% y 1981 = -20.98%; Barinas: 1988 = -9.1% y 1989 = -14.92%. Como puede observarse, los años base que implican mayores reducciones productivas son los de menor radiación, haciendo de este elemento climático (según el modelo CERES-Maíz) el que mayor impacto produce en la variabilidad interanual de la producción; en segundo término estaría la temperatura si se toma en cuenta que el año base 1973 (cálido) en Turén fue el que después de 1981 produjo la mayor reducción de producción.

FIG. 27 PRODUCCION DEL HIBRIDO PB-8 EN BARINAS
SIMULADA POR EL MODELO CERES-MAIZ
VARIABILIDAD CLIMATICA ACTUAL

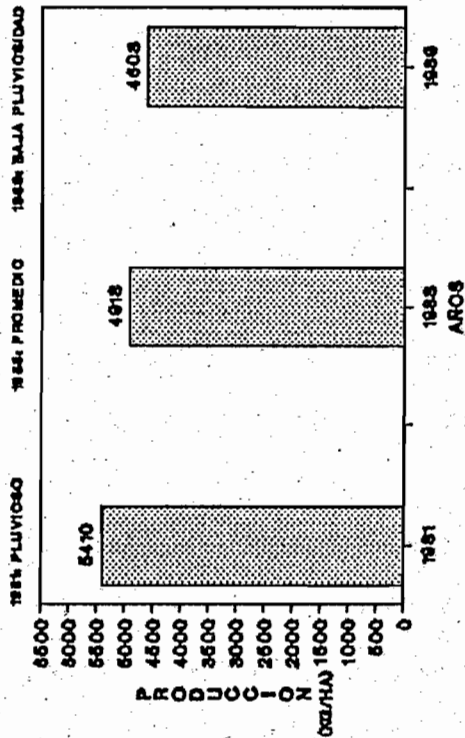


FIG. 28 PRODUCCION DEL HIBRIDO PB-8 EN TUREN
SIMULADA POR EL MODELO CERES-MAIZ
VARIABILIDAD CLIMATICA ACTUAL

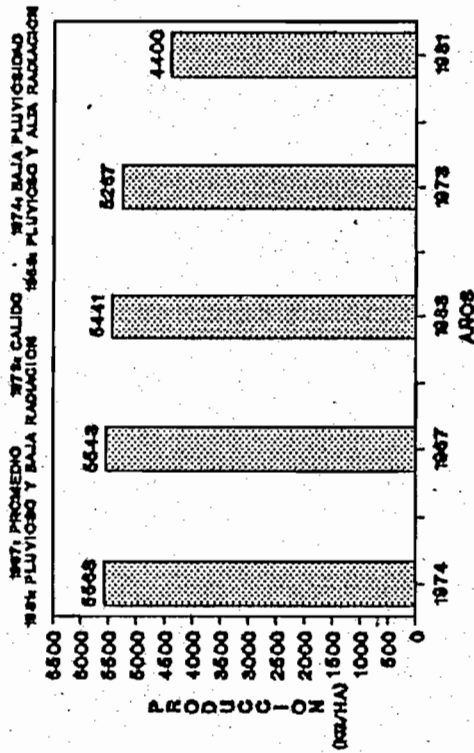


FIG. 29 TIEMPO DE LLENADO, NUMERO Y PESO DE
GRANOS EN EL HIBRIDO PB-8, BARINAS
VARIABILIDAD CLIMATICA ACTUAL

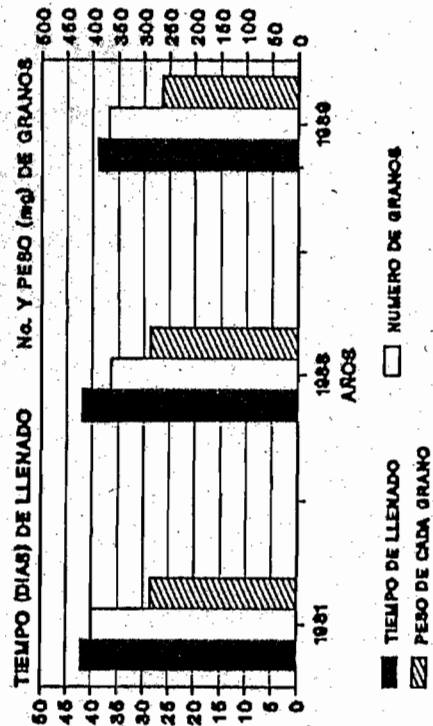
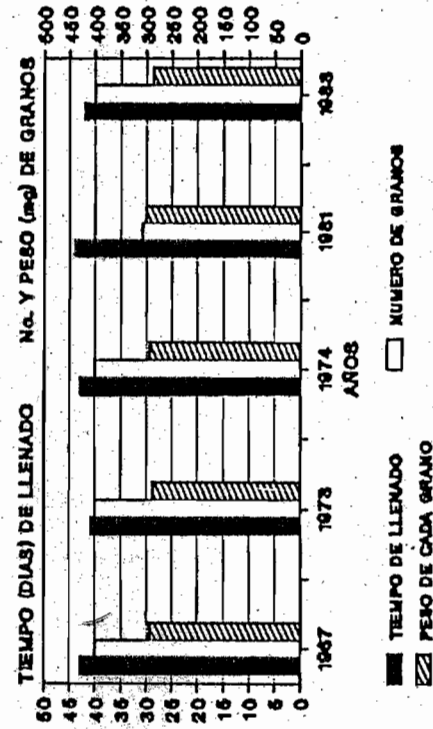


FIG. 30 TIEMPO DE LLENADO, NUMERO Y PESO DE
GRANOS EN EL HIBRIDO PB-8, TUREN
VARIABILIDAD CLIMATICA ACTUAL



4.3. Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación (figuras asociadas en las páginas 118 a 122).

4.3.1. Incrementos Similares en las Temperaturas Extremas Diarias

En las figuras 31 y 32 se pueden observar los efectos productivos (Barinas y Turén respectivamente) asociados a diferentes escenarios de cambios climáticos por efecto invernadero (SB, SM1, SM2, SM3, SA1, SA2, y SA3) o deforestación (DEF), asumiendo incrementos térmicos similares en las temperaturas máximas y mínimas diarias y siembra con el suelo a capacidad de campo.

a) Efecto Invernadero

Para Barinas el escenario que corresponde a una sensibilidad baja del sistema climático (SB: +20 C) implica una reducción de producción que varía entre un 16.1 % en el caso del año base promedio (1988), hasta reducciones de 21.34 y 23.5% para los años base de 1981 y 1989 respectivamente. Turén (fig. 43) presenta reducciones de producción que varían entre un 7.4 y 7.6% para los años base de 1967 y 1983 respectivamente, hasta reducciones máximas de 17.7% para el año base 1981.

En las dos localidades se simula la mayor disminución de producción al incrementarse las temperaturas extremas diarias en 20 C cuando los años base son los de menor nivel radiativo (1981 en Turén y 1989 en Barinas), lo que resulta significativo si se toma en cuenta que para una

sensibilidad mayor del sistema climático ante el aumento del CO_2 atmosférico si se esperan disminuciones de radiación solar. Por otra parte, ya que Barinas presenta un clima actual menos radiativo que Turén, podemos inferir preliminarmente que si se mantienen estas diferencias en el futuro, los cambios climáticos que impliquen aumentos térmicos causarán probablemente mayor impacto en Barinas, tal como lo sugieren las simulaciones del modelo CERES-Maíz, como veremos a continuación.

Pasando a los escenarios de cambios asociados a una sensibilidad media del sistema climático, los cuales incluyen disminución de radiación de hasta un 20% (SM1 y SM2), se puede observar en las figuras 31 y 32 que el impacto productivo es más marcado que en los escenarios anteriores, ya que aparte de aumentos térmicos mayores (+2.50 C) se agrega la disminución de la radiación solar (el aumento de precipitación no afecta según el modelo).

Para el caso de Barinas se vuelven a presentar reducciones de producción de mayor cuantía que en Turén, variando entre un 27% para el año base de 1988 hasta un 37% para el año base de 1989, mientras que en Turén las reducciones de producción para los mismos escenarios están en el orden de los 10 y 13% para los años base de 1983 y 1967 respectivamente y hasta un 26.5% para el año base de 1981. Como vemos, se repite el mismo patrón dado para los escenarios asociados a una sensibilidad baja del sistema climático, ya que los años base en los que se simulan las

mayores reducciones de producción son en las dos localidades los de menor nivel radiativo inicial. Se puede observar también que no se producen diferencias entre los escenarios que contemplan aplicación de los cambios en días seleccionados o de una manera uniforme (SM1 y SM2 respectivamente).

Los escenarios de cambio con aumentos radiativos (SM3) generan un impacto productivo menos negativo que los anteriores, a excepción de los años base de 1967 y 1983 en Turén, los cuales presentan la misma reducción de producción que los escenarios SM1 y SM2, (lo que se explica por su exceso de radiación en el clima sin modificar).

El efecto de los incrementos térmicos y la disminución de radiación solar para los años base menos radiativos, se refleja en un menor número de granos por mazorca (efecto de la radiación), períodos más cortos de llenado de los granos y tasas de llenado también reducidas respecto al clima sin modificar (efectos de los cambios térmicos), esto último contribuyendo a un menor peso de los granos. Estos efectos pueden ser observados al comparar las figuras 33 y 34, que corresponden a los años promedio para Barinas y Turén respectivamente, con los de carácter poco radiativo (figuras 35 y 36).

Al comparar las figuras 33 y 34 se encuentra que en Turén el efecto de las disminuciones o aumentos de la radiación solar sobre el número de granos por mazorca es poco notable, quizás por el ya señalado exceso de radiación

del año 1967. En cambio para Barinas sí se observa que el escenario de cambio climático que implica aumento de radiación (SM3) produce una recuperación casi total del número inicial de granos por mazorca; sin embargo, se puede notar en la figura 31 que esto no fue suficiente como para aminorar los efectos negativos de los incrementos térmicos.

Un mayor impacto de los cambios radiativos en los escenarios SM1, SM2 y SM3 se simuló cuando se utilizaron años base de menor nivel radiativo al comparar con años promedio, ya que nota que aún el clima sin modificar implica un número de granos por mazorca menor al potencial de 400 en las dos localidades; inclusive, al comparar a Barinas con Turén se ve que en este último caso el número inicial de granos por mazorca es menor, ya que el año 1981 fue de muy bajo nivel radiativo en Turén respecto al año de 1989 en Barinas (369 granos por mazorca en Barinas y 307 en Turén).

El peso de los granos (figuras 33 a 36) parece no estar afectado por los cambios radiativos, ya que no varía al comparar los efectos de los escenarios SM1 y SM2 (disminución de radiación en 20%) con el escenario SM3 (aumento de radiación en un 5%) y aún para los años base con baja radiación inicial (figuras 35 y 36). La misma conclusión se desprende del análisis de las figuras 37 a 40, las cuales muestran los efectos de los escenarios de cambios climáticos sobre los componentes de la

producción en el híbrido PB-8 para los años base de 1981 en Barinas y 1973, 1974 y 1983 en Turén.

En relación a los cambios de precipitación en los escenarios SM1, SM2 Y SM3 (+20%), no se notaron efectos sobre los niveles productivos, ya que como se ha señalado el modelo sugiere que el clima actual inclusive en sus años más secos es ya suficientemente lluvioso para un cultivo como el maíz. Este comportamiento se mantuvo independientemente de que se sembrara a capacidad de campo o al 20% de agua aprovechable en el suelo.

Pasando ahora a los escenarios asociados a una sensibilidad alta del sistema climático ante el incremento del CO₂ (SA1, SA2 y SA3), se puede observar en las figuras 31 y 32 que el impacto productivo negativo es de mayor cuantía, ya que los incrementos térmicos ahora son de 3.5 °C y las disminuciones de radiación solar llegan hasta un 40% (esto último sólo para los escenarios SA1 y SA2). Las disminuciones de producción en este caso varían para Turén entre 22% y 26.3% en el año base de 1983 (escenarios SA2 Y SA1 respectivamente), 27.5 y 31.5% para el año base de 1967 (idem.) y hasta 42.6% en el caso del año base de 1981. En Barinas las reducciones vuelven a ser mayores que en Turén para los mismos escenarios de cambio, con reducciones de producción de 39.5 Y 41.6% en el año base de 1988 (SA3 y SA2 respectivamente), hasta reducciones máximas de 49% en el caso del año base menos radiativo (1989; SA2).

El comportamiento productivo asociado a los escenarios

de efecto invernadero que implican aumentos radiativos (SA3; +10%), muestra que las disminuciones de producción son menores al comparar con los escenarios que implican una disminución de radiación solar (15.5, 22.4 y 26.5% para los años base de 1988, 1981 y 1989 en Barinas; 13.7, 16.2, 16.3, 18.6 y 18.9% para 1981, 1973, 1983, 1967 y 1974 en Turén). Sin embargo, al igual que en los escenarios SM3, los incrementos de radiación parecen no ser suficientes como para aminorar el efecto negativo de los incrementos térmicos propuestos (+3.59 C en las extremas diarias).

Al igual que en los escenarios por efecto invernadero asociados a una sensibilidad media del sistema climático, en los de sensibilidad alta los cambios de la radiación solar no afectaron el peso final de los granos, ya que independientemente de las disminuciones (SA1 y SA2; -40%) o aumentos (SA3; +10%) dicho peso fue similar. Este último dependió como ya se señaló, de los efectos térmicos sobre las tasas de llenado y el tiempo de llenado (véase las figuras 44 a 47 y las figuras 48 a 51)

b) Deforestación

En relación a los escenarios asociados al proceso de deforestación, se puede observar en las figuras 42 y 43 que el impacto negativo en la producción es menor que cualquiera de los simulados para el efecto invernadero. Esto se debe a que los incrementos térmicos son de menor cuantía (sólo 1.0C) y se propone un aumento de

radiación del 10%. Sin embargo, también se puede observar que este aumento radiativo no logra compensar el impacto negativo del incremento térmico, inclusive en los años base de menor nivel radiativo en los cuales el aumento de radiación es más beneficioso.

Otro aspecto que hay que destacar en relación a los escenarios de cambios climáticos por deforestación, es que al contrario de los asociados al efecto invernadero si se notó el efecto de comenzar a sembrar con el suelo al 20% del agua aprovechable, lo que se debe a que en este tipo de escenario de cambio se propone una disminución de precipitación del 25%. El efecto negativo se observó sobre todo en los años base secos en cada localidad (figura 41), ya que las disminuciones de producción en Turén (año base 1974) alcanzaron hasta un 63%, aunque en Barinas sólo llegaron al 17.6%. Esta diferencia se explica por que en Turén el año de 1974 fue menos lluvioso que el de 1989 en Barinas; en consecuencia, según el modelo CERES-Maíz las disminuciones de precipitación influyen más.

La variable productiva más afectada por la falta de un buen aprovisionamiento hídrico en los escenarios de cambio climático por deforestación fue el número de granos por mazorca.

En el caso de Turén y el año base de 1974 la reducción del número de granos por mazorca a causa de la falta de agua fue de un 55.5% (bajo de 392.1 granos en el clima sin

modificar a sólo 174 granos al simularse el escenario de deforestación y sembrando con el 20% de agua aprovechable). De este resultado se infiere que comenzar a sembrar con el suelo a su máxima capacidad de retención sería altamente beneficioso si se producen cambios climáticos por el efecto de la deforestación; sin embargo, para aplicar esta estrategia que implica riego presiembra se debería tomar en cuenta que en condiciones de sequía es problemático disponer precisamente de recursos hídricos para regar.

c) Disminución de Precipitación y Aumento Térmico y Radiativo en el Periodo de Floración y Polinización

En relación al escenario de cambio climático que probablemente contemple una combinación de aumentos térmicos de 3.59 C y disminución de precipitación de 25% durante el mes de agosto, la figura 42 muestra que comparando con los escenarios que proponen a nivel general aumentos térmicos de 2.59 C e incrementos de precipitación de 20% (tipo sensibilidad media en efecto invernadero) las reducciones de producción son mayores (con diferencias más notorias en Turén), y esto aún considerando que los cambios radiativos del mes de agosto son en este caso más favorables, ya que implican aumentos de un 10%, mientras que en el otro escenario se disminuyó la radiación solar en un 20%.

Las reducciones de producción bajo este nuevo tipo de escenario alcanzan un 30% en Barinas y 17% en Turén, aunque ya se señaló, en esta última localidad el aumento de

temperatura en un grado más para el mes de agosto causa una reducción relativa de producción mayor (en Barinas se pasa de 27.2 al 30% de reducción al comparar los dos tipos de escenarios, mientras que en Turén se pasa de un 12.8% al 17% de reducción). No se notaron efectos de comenzar a sembrar con el suelo a capacidad de campo o al 20% del agua aprovechable, ya que los incrementos de precipitación propuestos para los meses previos al mes de agosto (+20%) implicaron que las reservas de agua acumuladas para este último mes lograron aminorar el efecto de la disminución de precipitación en un 25% para el mes de agosto. Es decir, las diferencias en los efectos productivos observados se deben sobre todo al aumento térmico relativo de 19 C respecto a los escenarios originales de sensibilidad media en el sistema climático (3.59 C vs. 2.59 C), agregándose que los incrementos de radiación propuestos (10%) no aminoraron los efectos del aumento térmico.

Si bien como se acaba de señalar este tipo de escenario no genera problemas de falta de agua según el modelo, hay que considerar como ya se ha señalado que las disminuciones de precipitación en el mes de agosto coincidirían con el período tradicional de floración, polinización y formación de los granos en los cultivares. Además, los aumentos térmicos podrían desfasar la salida de los estilos y la producción de polen afectando el proceso de polinización (Norman et al., 1984); sin embargo, el modelo CERES-Maíz no simula este tipo de problemas.

4.3.2. Incrementos Diferentes en las Temperaturas Extremas Diarias

En este caso se incluyeron sólo escenarios de cambio asociados al efecto invernadero, ya que según Robock (1990) no existe en principio razón para pensar que haya diferencias entre los incrementos de las temperaturas máximas y mínimas en los escenarios asociados al proceso de deforestación, aunque un clima más seco podría favorecer un mayor incremento en la máxima respecto a la mínima por el efecto de la menor nubosidad, lo que debe ser investigado.

En general no se notaron diferencias marcadas con los escenarios que contemplan incrementos iguales en las temperaturas extremas diarias, sobre todo cuando se compara el impacto productivo de incrementos térmicos diferenciales en las máximas y mínimas que representan un promedio de incrementos similares; por ejemplo, la simulación de las respuestas productivas del híbrido CENIAP PB-8 son bastante parecidas si se aplican cambios térmicos de 19 C en la temperatura máxima y 29 C en las mínimas al comparar con las respuestas que resultan de aplicar incrementos de 1.59 C en dichas temperaturas.

Lo anteriormente planteado se puede observar en la figura 43, que corresponde a escenarios de cambios climáticos que sólo contemplan variaciones térmicas para el año base promedio en Turén y para los tres años base seleccionados en Barinas, con siembra a capacidad de campo (no se observó casi efecto del hecho

de sembrar al 20% de agua aprovechable, tal como se obtiene al analizar la figura 44 y compararse con la 43).

El hecho de que sólo se incluyan cambios térmicos para el análisis propuesto, se explica porque en el caso de los elementos radiación y precipitación no hubo diferencias en la metodología de cambio aplicada. En conclusión, para aquellos escenarios de cambios climáticos por efecto invernadero que incluyen variaciones en la temperatura, precipitación y radiación pero que se diferencian en la forma de incrementar los extremos térmicos diarios, el impacto productivo es bastante similar independiente de la metodología de aumento térmico (se aumentó más la mínima pero ésta tiene menor efecto productivo según el modelo).

Tratando de establecer cierta comparación entre los efectos sobre la producción de los cambios térmicos o radiativos individuales (no se incluyen los cambios de precipitación ya que no se notaron efectos de los incrementos propuestos), se tiene que un incremento de 2.5 °C (sensibilidad media del sistema climático) causa una reducción de producción de 18.7% en Barinas (año base 1988) y de 12.8% en Turén (año base 1967), mientras que la disminución de radiación en un 20% (sensibilidad similar a la anterior) causa una disminución de producción de 19% en Barinas (el mismo año base) y de 4% en Turén (idem); como vemos, en el caso de Barinas la contribución es bastante parecida, no así para Turén, lo que se explica porque los cambios radiativos en Turén tienen menor efecto productivo

a causa de su mayor nivel radiativo base. Para el caso de cambios asociados a una sensibilidad alta del sistema climático (+3.50 C y -40% de radiación solar), las contribuciones son las siguientes: reducción de producción de 23% en Barinas y 18.6% en Turén ante los cambios térmicos y reducción de 37% en Barinas y de 25% en Turén; en este caso la contribución del elemento radiación es mayor.

En relación al análisis anterior se debe destacar que los cambios térmicos al causar un desplazamiento de las fases fenológicas en el tiempo hace inevitable que se produzca cierto grado de interacción entre los efectos térmicos y radiativos desde el punto de vista productivo, ya que a pesar de los aumentos térmicos se simulan en ciertos casos (año base 1989 en Barinas) incrementos de producción (por ejemplo al pasar de +1.50 C a + 20 C; véase la figura 43).

El comportamiento anterior lo hemos asociado a un clima radiativo más favorable en la fase que va entre polinización y llenado de los granos, por efecto de desplazamiento de dicha fase a causa del incremento térmico respecto al clima base: se da un mayor número de granos al mejorar los niveles de radiación; nótese que el año base donde sucede este fenómeno es el menor nivel radiativo en Barinas, lo que explica su mayor sensibilidad ante el cambio de ambiente radiativo en una fase tan crítica en relación a los niveles de radiación como es la que va desde

la polinización hasta el comienzo del llenado de los granos.

Desde el punto de vista de la metodología para la generación de escenarios de cambios climáticos con fines de evaluar su impacto productivo, se debe destacar que el mejoramiento del clima radiativo citado anteriormente a causa del desplazamiento de las fases fenológicas por efecto de los incrementos térmicos, en cierta forma constituye un cambio en las condiciones agroclimáticas creado por el propio modelo CERES-Maíz, ya que no es producto de una manipulación de la base de datos climáticos original por parte del investigador. No obstante, los aumentos productivos observados a pesar del incremento térmico son de poca cuantía, como para que estos cambios creados por el modelo jueguen un papel importante en el análisis de los resultados. En este sentido, se puede afirmar que cualquier incremento térmico en la base de datos original va a causar una disminución de la producción base, dado que los niveles térmicos actuales son supraóptimos en Barinas y Turén para lograr mejores rendimientos.

4.3.3. Aumento de Precipitación en los Meses de la Actual Época Seca

Tal como se estableció en el capítulo de metodología, si se espera que por efecto invernadero las precipitaciones se incrementen, probablemente la época pluviosa en el

futuro comience más temprano que en la actualidad. Esto pudiera significar un desplazamiento de la época tradicional de siembra en Barinas y Turén (mayo) hacia el mes de abril, si los incrementos de precipitación en los meses de febrero, marzo y abril son suficientes como para llevar el agua en el suelo a niveles adecuados para sembrar en el último mes citado (sin aplicar riego).

Si asumimos que los promedios actuales de precipitación en los meses de marzo, abril y mayo son por lo general suficientes como para llevar las reservas hídricas del suelo a niveles en que se puedan sembrar y desarrollar los cultivos sin problemas a partir de mayo (tal como sucede en la mayoría de los años del clima actual), tendríamos que para sembrar en abril el incremento necesario de precipitación en los meses de febrero, marzo y abril (para llevarlos a los niveles actuales de precipitación en los meses de marzo, abril y mayo respectivamente) sería de 118, 562 y 206% en Turén, mientras que en Barinas los incrementos necesarios son de 168, 369 y 537% respectivamente.

Como vemos, los incrementos señalados resultan aparentemente bastante altos como para pensar que se puedan producir por efectos de cambio climáticos futuros (por lo menos a corto o mediano plazo), lo que en consecuencia hace poco probable un desplazamiento general de la época de siembra hacia el mes de abril, a excepción quizás de los años muy pluviosos. No obstante, si se considera que el

modelo sugiere que el clima actual de Turén y Barinas es por lo general muy lluvioso para el maíz, quizás los cambios necesarios para lograr que en un futuro se siembre en el mes de abril sean menores, aunque se debe también tomar en cuenta que de acuerdo a los escenarios propuestos en el Taller sobre cambios climáticos en la ciudad de Mérida, para los meses de la época seca los incrementos de temperatura alcanzarían hasta unos 4.5 °C, lo que implica que la demanda evapotranspirativa de la atmósfera se pudiera incrementar, significando que se van a necesitar mayores aumentos en los recursos hídrico para poder cultivar sin necesidad de riego.

FIG. 31: IMPACTO PRODUCTIVO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION SOBRE EL MAIZ HIBRIDO PB-8 EN BARINAS
CAMBIOS SIMILARES EN TEMPERATURAS EXTREMAS

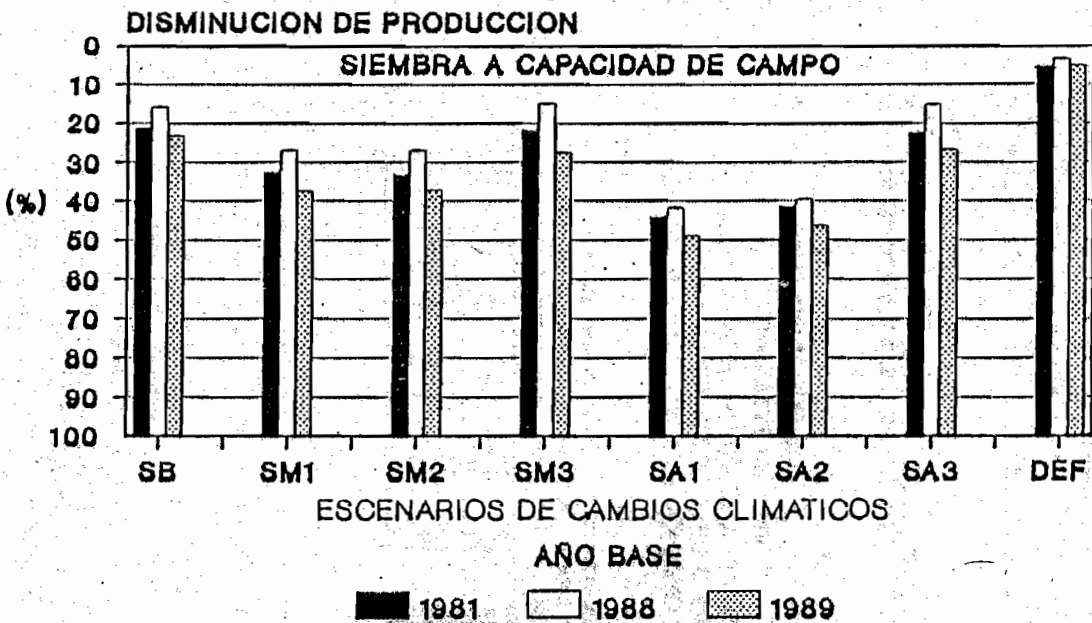


FIG. 32 IMPACTO PRODUCTIVO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION SOBRE EL MAIZ HIBRIDO PB-8 EN TUREN
CAMBIOS SIMILARES EN TEMPERATURAS EXTREMAS

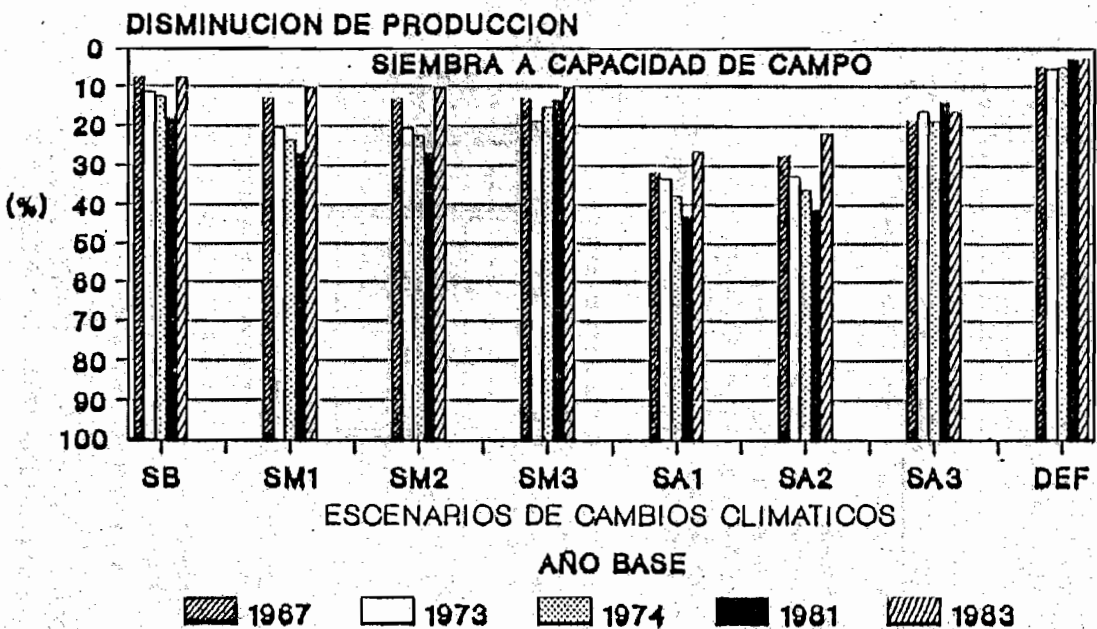


FIG. 33 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS DE PB-8 BARINAS (AÑO BASE 1988)

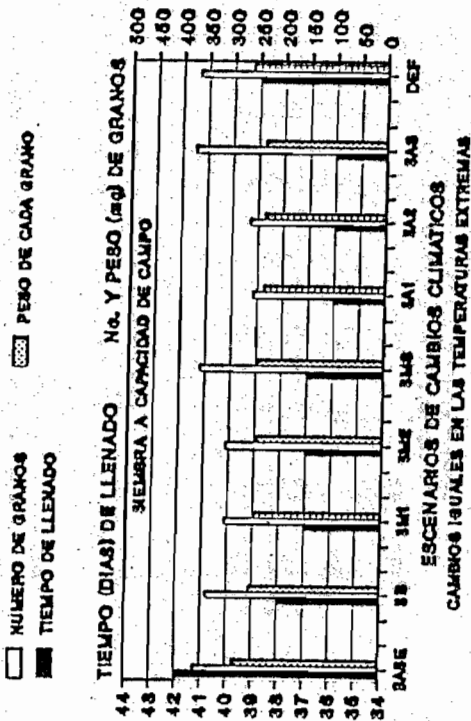


FIG. 35 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS DE PB-8 BARINAS (AÑO BASE 1989)

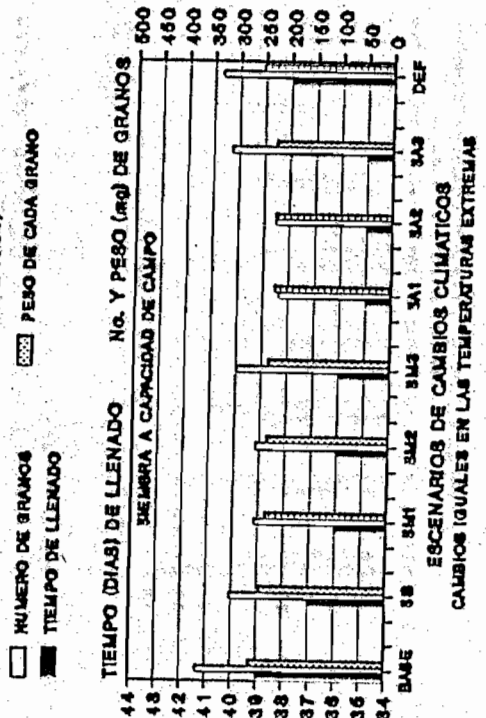


FIG. 34 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS DE PB-8 TUREN (AÑO BASE 1987)

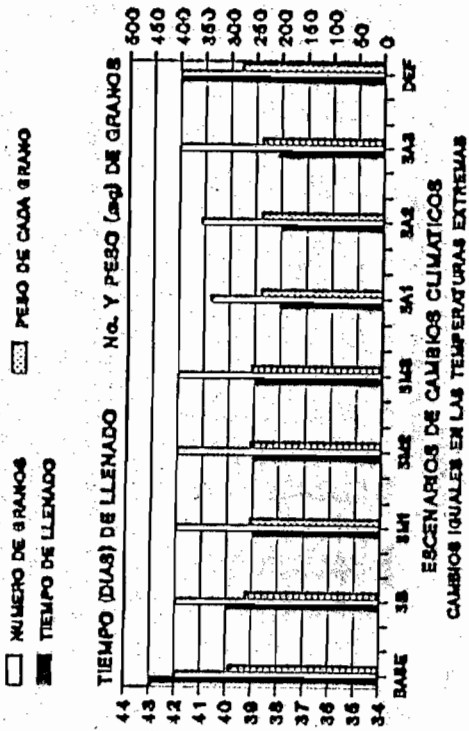


FIG. 36 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS EN PB-8 TUREN (AÑO BASE 1981)

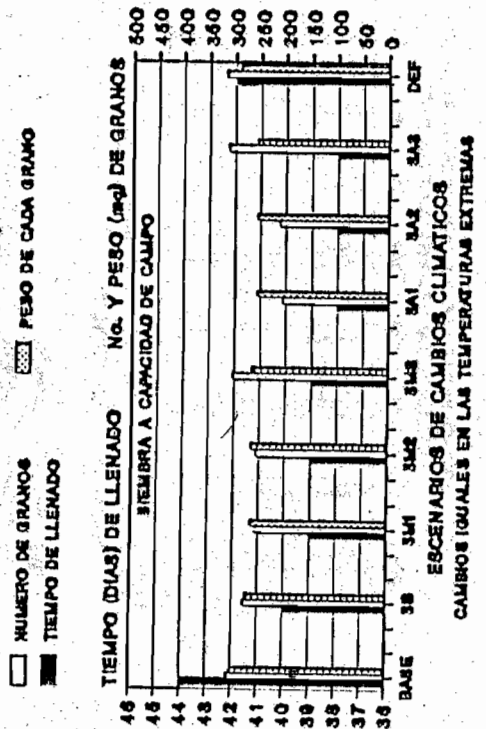


FIG.37 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS DE PB-8 BARINAS (AÑO BASE 1981)

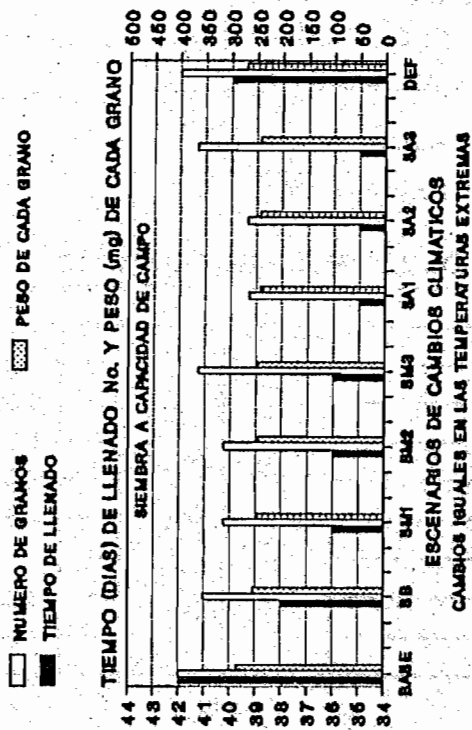


FIG.38 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS EN PB-8 TUREN (AÑO BASE 1973)

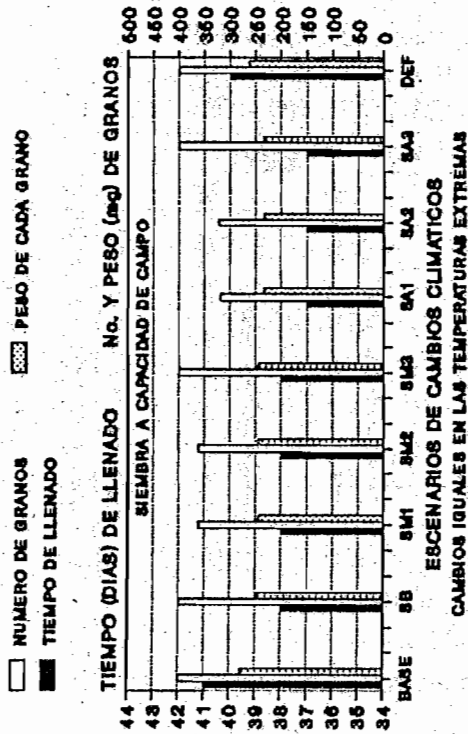


FIG.39 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS EN PB-8 TUREN (AÑO BASE 1974)

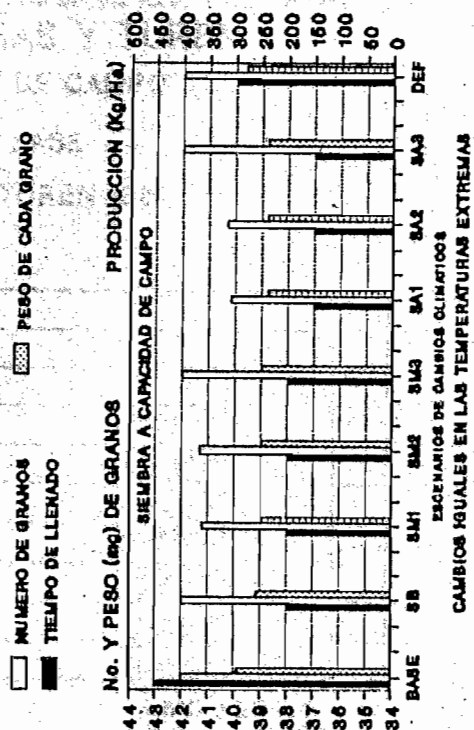


FIG.40 IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION EN EL TIEMPO DE LLENADO, No. Y PESO DE GRANOS EN PB-8 TUREN (AÑO BASE 1983)

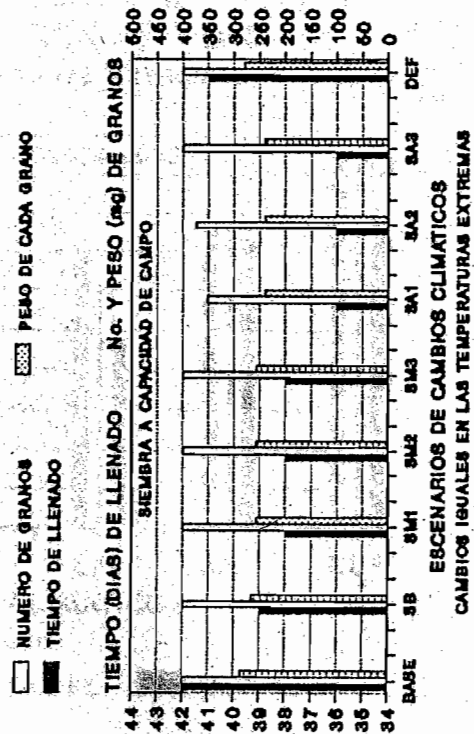


FIG. 41 IMPACTO PRODUCTIVO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION SOBRE EL MAIZ HIBRIDO CENIAP PB-8

CAMBIOS SIMILARES EN TEMPERATURAS EXTREMAS

DISMINUCION DE PRODUCCION

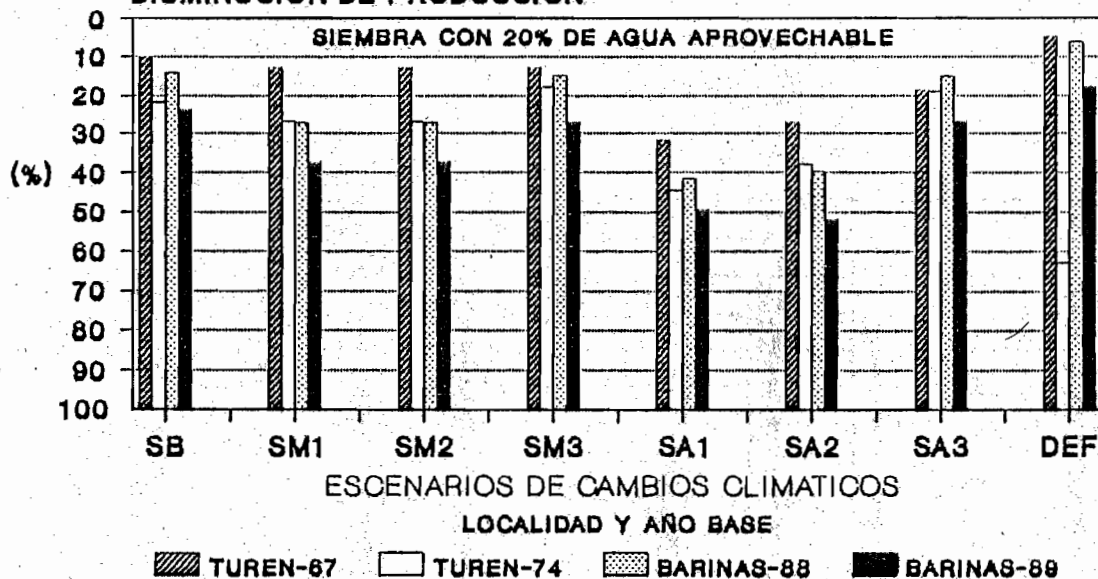


FIG. 42 IMPACTO PRODUCTIVO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO SOBRE EL HIBRIDO CENIAP PB-8 EN BARINAS Y TUREN

SIEMBRA A CAPACIDAD DE CAMPO

LOCALIDAD Y AÑO BASE

LOCALIDAD Y AÑO BASE

BARINAS 1988
 TUREN 1967

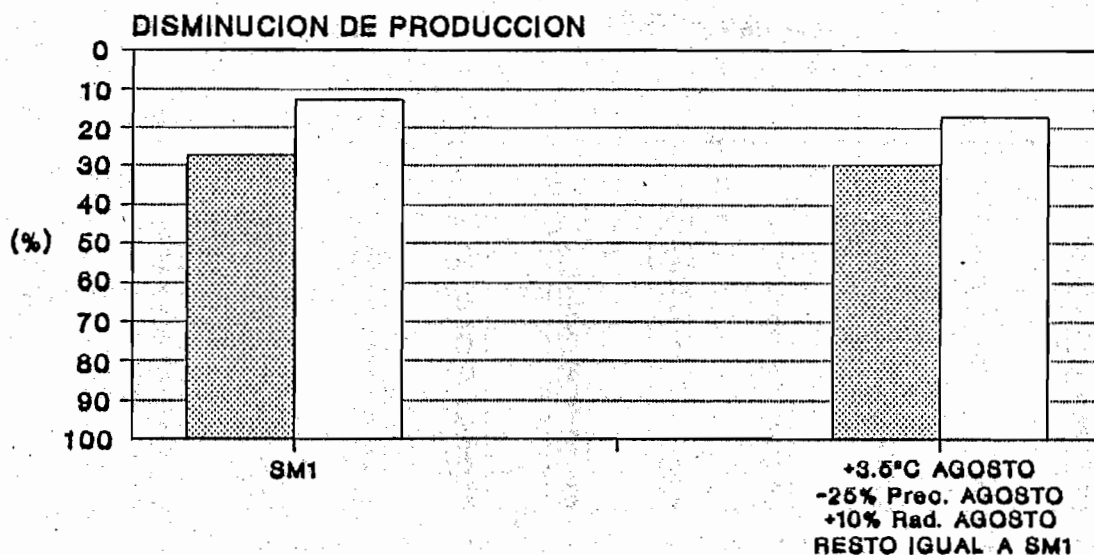


FIG. 43 IMPACTO DE CAMBIOS EN LAS TEMPERATURAS EXTREMAS DIARIAS SOBRE LA PRODUCCION DEL HIBRIDO CENIAP PB-8 EN BARINAS Y TUREN SIEMBRA A CAPACIDAD DE CAMPO

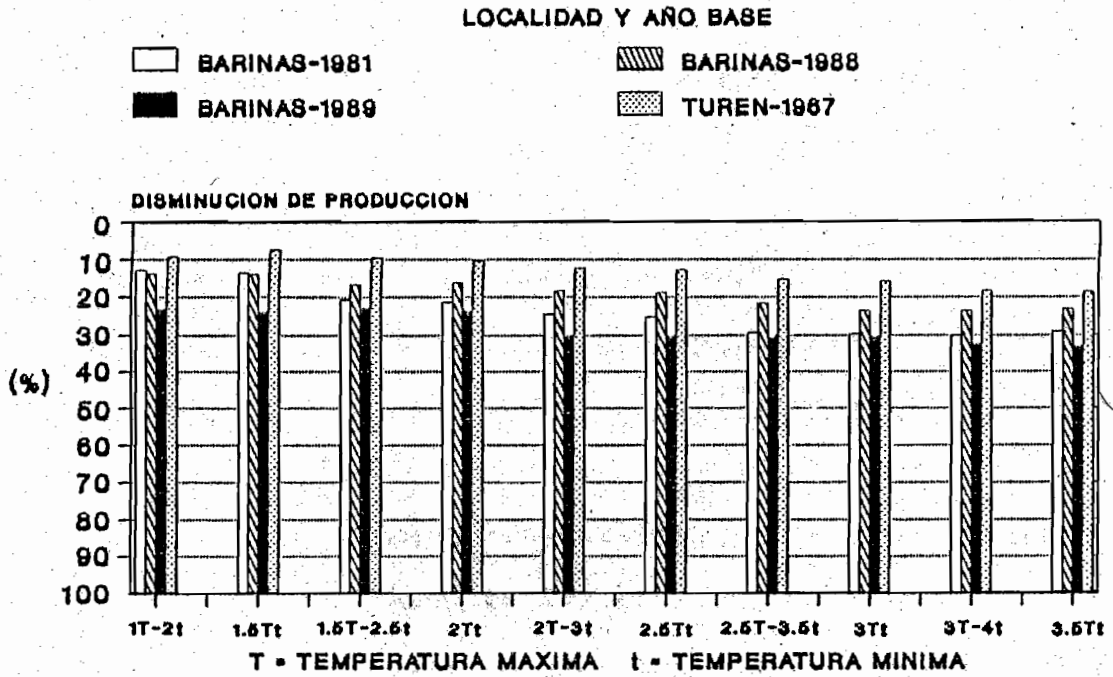
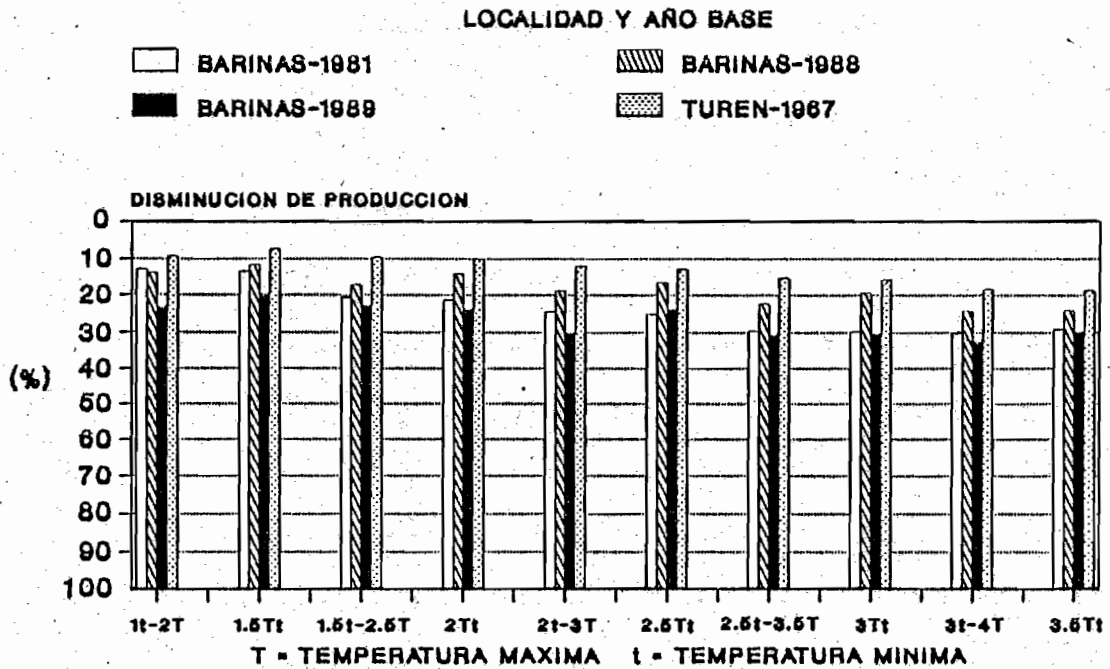


FIG. 44 IMPACTO DE CAMBIOS EN LAS TEMPERATURAS EXTREMAS DIARIAS SOBRE LA PRODUCCION DEL HIBRIDO CENIAP PB-8 EN BARINAS Y TUREN SIEMBRA CON 20% DE AGUA APROVECHABLE



CONCLUSIONES

1) A nivel general los cambios climáticos asociados al efecto invernadero y a la deforestación de los bosques en las regiones intertropicales pudieran generar según el modelo CERES-Maíz un impacto productivo negativo en el maíz híbrido CENIAP PB-8 en Turén y Barinas, con mayores reducciones de producción en el caso del efecto invernadero a causa de los mayores incrementos térmicos propuestos y la disminución de radiación solar. Esto es válido cuando se siembra a capacidad de campo, ya que si se hace al 20% de agua aprovechable los escenarios de deforestación a causa de la disminución propuesta de precipitación, pueden generar reducciones de producción mayor que las asociadas al efecto invernadero si los años base son secos (Turén 1974).

2) En el caso específico de los cambios climáticos por efecto invernadero, las variables climáticas que ejercerían mayor impacto son las temperaturas extremas diarias (sobre todo el incremento de las máximas según los algoritmos del modelo CERES-Maíz) y la radiación (a causa de su disminución como escenarios de cambio más probable).

3) Según las simulaciones realizadas los mayores impactos negativos se producen cuando se utilizan los años base de menor nivel radiativo, lo que explica en gran parte que las reducciones de producción hayan sido más notables en Barinas. Extrapolando estos resultados a otras áreas del país, podemos concluir en principio que el impacto

productivo de los cambios climáticos que impliquen disminución de radiación solar será mayor en aquellas áreas que actualmente presentan menor nivel radiativo; es decir las localizadas hacia el sur del país (sur del estado Bolívar y el Territorio Federal Amazonas); sin embargo, dada la alta pluviosidad y la baja incidencia de radiación solar en estas áreas actualmente, su contribución a la producción de maíz es poca, lo que probablemente se verá reforzado de producirse los cambios climáticos propuestos para efecto invernadero.

4) En cuanto a efectos térmicos individuales, nuestros resultados concuerdan con los de Peter et al (1971) y Peart et al (1988), ya que los impactos negativos sobre los niveles base de producción se asocian sobre todo al acortamiento del período de llenado de granos y a tasas de llenados también más bajas, esto último a causa del incremento en los niveles respiratorios y la declinación de la producción bruta por fotosíntesis al llegarse a umbrales térmicos que son limitantes inclusive para plantas tipo C_4 (temperaturas por encima de los 36 °C, y que pueden ser mayores si se considera el problema del menor enfriamiento a causa de la disminución de los niveles de transpiración). Aunque se debe investigar también lo señalado en la revisión bibliográfica de Cure y Acock (1986), en relación a que las respuestas de aumento productivo a los incrementos del CO_2 atmosférico son mayores si las temperaturas son altas.

5) En cuanto a los incrementos de precipitación por efecto invernadero, no se contó con un modelo capaz de evaluar los efectos de tales incrementos. Sin embargo, dada la conocida sensibilidad de los cultivares de maíz a condiciones de excesos hídricos se puede esperar que probablemente en el futuro este tipo de problema se presente, más si se toma en cuenta que los niveles promedios actuales de pluviosidad en la época tradicional del ciclo de cultivo (mayo a septiembre) son en Barinas y Turén (y sobre todo en Barinas) ya bastante altos para un cultivar como el maíz.

6) Los niveles de reducción de producción simulados para Barinas a causa de cambios climáticos por efecto invernadero son realmente significativos si se asume que se van a combinar disminuciones de radiación solar con los incrementos térmicos, ya que en el menor de los casos (escenarios correspondientes a una sensibilidad media del sistema climático) dichas reducciones alcanzarían a un 27% y hay que tomar en cuenta que los niveles promedios de producción en nuestro país no pasan todavía de los 2000 Kg/ha. En Turén los mismos escenarios producen reducciones del 12.8% y 24%, aunque en las simulaciones con el año base de menor nivel radiativo (1981) las reducciones de producción llegan hasta un 26.4%;

7) Si sólo se producen aumentos térmicos (escenarios de sensibilidad baja del sistema climático, a más corto plazo; +20 C), las reducciones de producción estarían entre 16 y

24% en Barinas y entre 7.4% y 17.7% para Turén;

7) Si se produce una respuesta de alta sensibilidad en el sistema climático las reducciones de producción estarían entre 40 y 49% en Barinas, mientras que en Turén las reducciones oscilarían entre 28 y 42.6%;

8) Si a los escenarios de cambio termo-radiativos se les agrega el posible efecto negativo de los incrementos de precipitación, las reducciones de producción probablemente sean mayores que las simuladas por el modelo CERES-Maíz;

9) Cambios climáticos que impliquen una combinación de los mismos incrementos térmicos evaluados con aumento de radiación significarían impactos productivos menos severos. Las reducciones de producción en este caso estarían para Barinas entre 16 y 26.8% y entre 13.7 y 19% para Turén;

10) Si bien no se evaluaron escenarios de cambios climáticos para una combinación del efecto invernadero y el proceso de deforestación, es de esperar que en el caso de las temperaturas se deberían incrementar los estrés térmicos, ya que los dos tipos de fuerzas climáticas favorecen los aumentos térmicos; sin embargo, el comportamiento radiativo y de la precipitación es contrario, ya que en el efecto invernadero se asume que lo más probable es que la radiación disminuya y la precipitación se incremente, mientras que en la deforestación la radiación tendería a aumentar y la precipitación a disminuir.

RECOMENDACIONES

1) Se considera necesario implementar investigaciones que evalúen el efecto combinado de cambios climáticos producidos por el efecto invernadero y el proceso de deforestación. Así mismo, debería investigarse qué resultado se generaría si se considera que a pesar de que por deforestación se espera una disminución de la precipitación, el aumento de CO_2 atmosférico asociado a dicho proceso implica favorecer el efecto invernadero; es decir, una fuerza climática contraria en cuanto a los efectos pluvio-radiativos. Por otra parte, también se debería investigar el posible efecto contrario sobre las temperaturas mínimas, ya que un clima menos nuboso por efecto de la deforestación favorecería una mayor salida de radiación de onda larga nocturna, implicando así un mecanismo de retroalimentación negativo en relación al incremento térmico por efecto de un mayor nivel de CO_2 atmosférico.

2) Se considera también necesario apoyar las investigaciones que mejoren la capacidad predictiva del modelo para el límite inferior de agua extraíble por los cultivos, la capacidad de campo y la saturación, adaptando los algoritmos del modelo para el caso de las características particulares de los suelos intertropicales. En este sentido, se considera que la consistencia de las subestimaciones por parte del modelo, sobre todo en el caso de la capacidad de campo y la saturación, facilita el

necesario ajuste de los algoritmos que utiliza el modelo para la simulación de esos parámetros hídricos.

En el caso del límite inferior las predicciones del modelo han sido más variables en cuanto a exactitud, lo que probablemente se asocie a que dicho límite no sólo depende de las características del suelo sino también de la capacidad intrínseca de cada cultivar para extraer agua a niveles hídricos bajos en el suelo; además, la historia agroclimática previa a la aparición de las condiciones de sequía probablemente inflencie la capacidad de los cultivares para extraer agua en condiciones de bajo disponibilidad hídrica. Se deberá investigar también si el límite inferior varía de acuerdo al estado de desarrollo de los cultivares, ya que en nuestro caso sólo se determinó en el momento en que las plantas estaban en su décima a onceava hoja (el corte de agua se hizo desde la aparición de la sexta hoja);

3) Otro aspecto que deberá ser investigado en relación al modelo CERES-Maíz es la exactitud de su fórmula para el cálculo de la evapotranspiración, ya que no se toma en cuenta el componente advectivo de dicho proceso; es decir, no considera los efectos de la velocidad del viento. En este sentido, se piensa que la fórmula de Penman resultaría interesante para ser evaluada, ya que ha demostrado que produce estimados de la evapotranspiración aceptables en áreas donde la velocidad del viento juega un papel importante para determinar la demanda evapotranspirativa

de la atmósfera. Quizás la notable diferencia entre valores de producción observados y simulados que reporta Comerma en su proceso de validación para la Mesa de Guanipa (lugar semiárido y con velocidades del viento relativamente importantes), se deba en parte a la no inclusión en el modelo CERES-Maíz de los efectos de la velocidad del viento sobre los niveles de evapotranspiración.

Si bien la velocidad del viento es una variable climática que no se mide en todas las estaciones, por lo cual podría objetarse su inclusión para fines de simulación, se debe considerar que el modelo CERES-Maíz al requerir de la radiación solar como dato de entrada ya implica utilizar registros de estaciones climatológicas principales, que incluyen las observaciones de la velocidad del viento; además, las estaciones de tipo agroclimáticos por lo general deben registrar a la velocidad del viento.

4) Se recomienda también apoyar las investigaciones tendientes a mejorar la versión nitrógeno del modelo CERES-Maíz e incluir el efecto de otros nutrientes como el fósforo, ya que en este último caso se debe destacar que nuestros suelos por lo general presentan niveles muy bajos de dicho nutriente. Así mismo, dado los escenarios de cambios climáticos que favorecen los incrementos de precipitación, se deberá realizar el ajuste del modelo para que tome en cuenta el efecto de vectores patógenos cuando aumenta la humedad ambiental y el efecto de un incremento de la competencia por agrorecursos debido a las malezas.

5) Para las determinaciones del potencial de granos por mazorca (coeficiente G_2) se recomienda seleccionar sitios experimentales de alta radiación solar incidente, dada la estrecha interrelación entre los dos tipos de parámetros.

6) Por último, se recomienda realizar investigaciones más detalladas que la presente, donde se evalúen escenarios de cambios climáticos de mayor complejidad y que contemplen análisis de probabilidad y los efectos de secuencias de años con características extremas para ver no sólo efectos agroecológicos sino los económicos y aplicados a otras regiones y cultivos de interés diferentes al maíz; así mismo, se recomienda realizar algunos experimentos de campo y/o laboratorio donde se evalúe la verdadera sensibilidad de los principales cultivos desarrollados en nuestro país ante los incrementos del CO_2 atmosférico y verificar si la temperatura promedio de $26^{\circ}C$ (para el maíz) es la que garantiza un mejor balance entre producción bruta por fotosíntesis y consumo respiratorio. En este sentido, transectas altitudinales en los Andes venezolanos pueden servir de áreas experimentales para evaluar las respuestas a diferentes ambientes termoradiativos y probar las hipótesis del modelo; Yaritagua, por tener temperaturas promedios inferiores a los $26^{\circ}C$, también resulta un área experimental de interés para las determinaciones que se están proponiendo.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Acevedo, M., Tonella, G., and Jaimez, R., (compiladores) , 1989: National Problems Caused by Global Climate Change. Problem Identification Session and Possible Research Projects Session. PAN-EARTH PROJECT, Venezuela Mini-Workshop, May 1989, Appendix C, pp 32.
- Ackerman, P. T, and Cropper, W. Jr., 1988: Scaling Global Climate Projections to Local Biological Assessments, Environment, vol. 30, No. 5, 31-34.
- Agee, E. M, 1980: Present Climatic Cooling and a Proposed Causative Mechanism, Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 61, No. 11, 1356-1367.
- Akita, S., and Moss, D., 1973: Photosynthetic Response to CO₂ and Light by Maize and Wheat Leaves Adjusted for Constant Stomatal Aperture. Crop Science, vol 13, No 2, 234-236.
- Andressen, R., y Jaimez, R., 1990: Evaluación de la Capacidad de Simulación del Clima Termopluiométrico Actual en Venezuela por los Modelos de Circulación General de la Atmósfera. Trabajo presentado en el Taller de Variabilidad del Clima y Cambios Climáticos en Venezuela y la Región del Caribe (Mérida, 17-33 de abril), sin pp.
- Bach, W., 1979: Impact of Increasing Atmospheric CO₂ Concentration on Global Climate: Potential Consequences and Correctives Measures. Environment International, No. 2, 215-228.
- Benacchio, S., 1983: Algunos Aspectos Agroecológicos Importantes en la Producción Maicera en Venezuela. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Serie B, No 6-02, pp 28.
- Chollet, R., 1979: The Biochemistry of Photorespiration Trens Biochems. Science, 2, 155.
- Comerma, J., Guenni, L., y Medina, G., 1985: Validación del Balance Hídrico del Modelo Ceres-Maiz en la Zona de Maracay, estado Aragua, Venezuela. Agronomía Tropical, Vol. 35, Nos.3-4, pp 115-134.
- Comerma, J., 1986: The Use of Simulation Model for Agrothechnology Transfer in Venezuela. Congreso Internacional de Suelos, Hamburgo (Alemania), pp. 14.
- Comerma, J., 1988: Perspectivas sobre el Uso de Modelos de Simulación como un Instrumento de Transferencia de Agrotecnología. AT NEWS (IBSNAT), No. 8, pp. 11-14.

Cure, J., and Acock, B., 1986: Crop Response to Carbon Dioxide Doubling: A Literature Survey. *Agr. and Forest Meteor.*, 38, 127-145.

Delgado, R., 1988: Validación de los Aspectos del Balance de Agua y Nitrógeno del Modelo CERES-Maíz. Tesis de Maestría, Postgrado en Ciencias del Suelo, UCV, Facultad de Agronomía (Maracay), pp. 201.

Downs, R., 1970: Effect of Light Intensity and Leaf Temperature on Photosynthesis and Transpirations in Wheat and Sorghum. *Aust. J. Biol. Sci.*, 23, 775-782.

Duncan, W., and Hesketh, J., 1968: Net Photosynthetic Rates, Relative Leaf Growth Rates, and Leaf Number of 22 Races of Maize Growth at Eight Temperatures. *Crop Science*, Vol 8, No. 6, 670-674.

Duncan, W., Shaver, D., and Williams, W., 1973: Insolation and Temperature Effect on Maize Growth and Yield. *Crop Science*, 13, 187-191.

Duncan, W., 1975 : Maize in: *Crop Physiology*, Evans, L. T (ed). Cambridge University Press, London, pp. 23-49.

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

Flohn, H., 1977: Climate and Energy: A Scenario to a 21st Century Problems. *Climatic Change*, No. 1, vol. 1, 5-20.

Ghan, S., Michael, C., and Walton, J., 1982: A Documentation of the OSU Two-Level Atmospheric GCM. CRI Report 35, Oregon State University, pp 395.

Ghan, S., MarCraken, C., and Walton, J., 1988: Climate Response to a Large Atmospheric Injections: Sensitivity Studies with a Tropospheric General Circulation Model. *Journal. Geophys. Res.*, 93, 8315-8337.

Gordon, C., and Stern, W., 1982: A Description of the GFDL Global Spectral Model. *Monthly Weather Review*, Vol 10, No. 7, 625-644.

Hansen, J., Rusell, G., Rind, D., Stone, P., Lacis, A., Lebedeff, S., Ruedy, R., and Travis, L., 1983: Efficient Three-Dimensional Global Model for Climate Studies: models I and II. *Monthly Weather Review*, Vol. 111, No. 4, 609-662.

Hansen, J., and Lebedeff, S., 1988: The Greenhouse Effect: Impact on Current Global Temperature and Regional Heat

Waves. Statement to Senate Energy Committee (June, 1988).

Hansen, J., Rind, D., Delgenio, A., Lacis, A., Lebedeff, S., Prather, M., and Ruedy, R., 1989: Regional Greenhouse Climate Effects. Proceedings of Second North American Conference on Preparing for Climate Change, Government Institutes, Inc Washington, D. C., pp 16.

Hayes, J., O'Rourke, P., Terjun, W., and Todhunter, P., 1982: Yield: a Numerical Crop Model of Irrigated and Rainfed Agriculture, Publ. Climatol. 35 C. W. Thornthwaite Assoc. and Cen. for Clim. Res. Elmer, N. J.

Hétier, J. M., Sarmiento, S., Aldana, T., Zuvia, M., Acevedo, D., and Thiery, J. M., 1989: The fate of Nitrogen Under Maize and Pasture Cultivated on an Alfisol in the Western Llanos savannas, Venezuela. Plant and Soil, 114, 295-302.

IBSNAT, 1987 : Field and Laboratory Methods for IBSNAT. Technical Report No. 2, Appendix 7, pp 56-57.

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, 85-96.

Liu, W., Botner, D., and Sakamoto, C., 1989: Application of CERES-Maize Model to Yield Prediction of 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, 327-347.

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.

Moss, D., Musgrave, R., and Lemon, E., 1961: Photosynthesis Under Field Conditions. III : Some Effects of Light, Carbon Dioxide, Temperature and Soil Mixture on Photosynthesis, Respiration and Transpiration of Corn. Crop Science, 1, 83.

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

Norman, M., Pearson, C., and Searle, P., 1984 : The Ecology

of Tropical Food Crops Cambridge University Press, London, p. 369.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1989: Fondo Especial para los Estudios sobre el Clima y el Medio Ambiente Atmosférico. Hoja Informativa No. 4.

Dram, P., 1985: Sensitivity of Agricultural Production to Climate Change. *Climatic Change*, 7, 129-152.

Palmer, A., 1973: Photoperiod and Temperature Effect on a Number of Plant Character in Several Races of Maizes Grown in the Field. UNESCO: Plant Response to Climatic Factor. Proc. Upsala Symp., 113-119.

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.

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. Final Report, pp 56.

Peter, D., Pendleton, J., Hageman, R., and Brown C., 1971: Effect of Nighth Temperature on Grain Yield Corn, Wheat and Soybean. *Agr. Journal*, 63, 809.

Ramirez, J. y Malaspina C., 1987: Efecto de la Densidad de Siembra, Nitrógeno y Fósforo en el Rendimiento del Híbrido de Maíz (*Zea mays* L.) CENIAP PB-8. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay estado Aragua, Tesis de Grado.

Rind, D., Goldberg, R., and Ruedy, R., 1989: Changues in Climatic Variability in the 21st Century. *Climatic Change*, 1, 45-54.

Ritchie, J., and Hamway, J., 1966: How a Corn Plant Develops. Special Report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service, Ames, Iowa, pp. 17.

Robock, A., 1979: The Little Ice Age: Northern Hemisphere Average Observation and Model Calculation. *Science*, 206, 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 CO₂ 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, 251-265.

_____, 1982: The Increasing CO₂ Concentration in the Atmosphere and its Implications, II: Effect Through CO₂ Induced Climatic Change. Climatic Change, Vol 4, No. 3, 282-239.

Shukla, J., Nobre, C., and Sellers, P., 1990: Amazon Deforestation and Climate Change. Science, 247, 1332-1325.

Smagorinsky, J., 1963: General Circulation Experiment with the Primitive Equation: A non Dimensional Form of the Baroclinic Instability Criterion. Appendix B, Monthly Weather Review, 91, 4190.

Smith, B., Brklacih, 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, 153-174.

Solow, R., and Broad, J., 1989: On the Detection of Greenhouse Warming. Climatic Change, 15, 449-453.

Stanley, A., Changnon, J., and Neill, J., 1968: A Meso-scale Study of Corn-Weather Response on Cash-Grain Farm. Journal of Applied Meteorology, Vol. 7, No 1, 94-104.

Staper, M., and Arkin, G., 1980: CORNF: A Dynamic Growth and Development for Maize (Zea mayz L.). Texas Agricultural Experiment Station, Blackland Research Center, Temple, USA; pp. 91

Stouffer, R., Manabe, S., and Bryan, K., 1989: Interhemispheric Asymmetry in Climate Response to a Gradual Increase CO₂ Concentration. Nature, Vol. 342, 660-662.

Takami, S., and Bavel, Van. C., 1975: Numerical Experiments on the Influence of CO₂ Release at Ground Level on Crop Assimilation and Water Use. Agricultural Meteorology, 15, 193-203.

Thompson, L., 1969: Weather and Technology in production of Corn in the U.S. Corn Belt. Agron. J, 61, 435-465.

UNESCO-QMM. 1963: Proceeding of the Rome Symposium of Climate Change. Actas del Coloquio.

Van Keulen, H., Louwerse, Van der Laar. H., and Goudriaan, J., 1981: Physiological Aspects of Increased CO₂ Concentration. Experientia, 36, 768-792.

Venezuela, FONAIAP (Región Central), 1982: Híbrido CENIAP PB-8, Nuevo Cultivar de Grano Blanco. Serie E, No. 6-02, Maracay, estado Aragua.

_____, FONAIAP, 1984: Paquete Tecnológico para el Cultivo del Maíz. Serie Paquetes Tecnológicos, No. 1-02, pp 28.

_____, Oficina Centra de Información (OCEI), 1985: V Censo Agrícola. pp 274.

Wallace, H., 1920: Mathematical Inquiry into the Effect of Weather Corn Yield Belt States. Monthly Weather Review, 48, 439-455.

Wellhausen, E., Fuentes, A., Corzo, A., and Mangelsdorf, P., 1957: Races of Maize in Central America. Natl, Acad. Sci. Natl Res. Council Publ., No. 511.

Wilks, D., 1988: Stimating the Consequences of CO₂-Induced Climatic Change on North American Grain Agriculture Using General Circulation Model Information. Climatic Change, Vol. 13, No. 1, 19-42.

Wilson, C., and Mitchell, J., 1987: A CO₂ Climate Sensitivity Experiment with a Global Model Including a Simple Ocean. J. Geophys. Res., Vol. 92, No. 13, 315-343.

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

Zinc, A y Stagno, P., 1966: Estudio Edafológico de la Zona de los Ríos Santo Domingo-Paguey. Estado Barinas. MOP, pp. 199.

Zuvia, M., 1991: La Simulación del Crecimiento y Desarrollo de un Cultivo y las Experiencias de Campo: Presente y Futuro de esta Práctica en Barinas. material no publicado, pp 14.

ANEXO No. 1
DETERMINACION DE ASPECTOS FENOLOGICOS Y
PRODUCTIVOS EN EL MODELO CERES-MAIZ

Aspectos Fenológicos.

A través de una subrutina denominada PHENOL, que utiliza datos de temperatura media diaria, genotipo y fotoperíodo, el modelo simula el desarrollo de las diversas fases fenológicas de los cultivares. Estas fases son:

a) Desde la siembra hasta la germinación, asumiendo el modelo que esta última ocurre sólo si existe un adecuado contenido de agua en el suelo, lo que se produce cuando dicho contenido es superior al límite inferior de agua extraíble por las plantas (Lower Limit);

b) Desde la germinación a la emergencia de la plántula, lo que ocurrirá si la acumulación de grados días llega a un valor denominado $P9 = 15 + 6 \times PS$, siendo PS la profundidad (cm) a la que se sembró la semilla;

c) Desde la emergencia hasta el final de la fase juvenil o no reproductiva, esta última detectada en campo cuando el cuello de la sexta hoja sea bien visible. Según el modelo el final de la fase juvenil ocurrirá si la acumulación de grados días iguala o excede a un coeficiente genético denominado $P1$, cuyo valor específico para el cultivar seleccionado se dará más adelante;

d) Desde la finalización de la fase vegetativa o no reproductiva hasta la iniciación floral, lo que dependerá básicamente del efecto que tenga el fotoperíodo (en horas) sobre el cultivar seleccionado, estimándose que la tasa de

inducción floral = $1/(4 + P2 \times (\text{fotoperiodo} - 12.5))$,
siendo P2 un coeficiente genético característico del
cultivar que se seleccione y que expresa su sensibilidad
ante la variación en la duración del día de acuerdo a la
época del año y la latitud del lugar donde se esté
cultivando. El valor 12.5 es el fotoperiodo al cual el
modelo asume que el desarrollo ocurre a máxima velocidad.
En este sentido, P2 sería el factor temporal de retardo en
la velocidad de desarrollo entre el final de la fase
juvenil y la iniciación floral, por cada hora que se
incrementa la duración del día respecto al valor de 12.5
horas, de acuerdo a la época del año y la latitud del lugar
de cultivo;

g) Desde la polinización hasta el comienzo del llenado
efectivo de los granos, ocurriendo la polinización cuando
la acumulación de grados días iguala o excede un
coeficiente denominado $P3 = (TLNO - 2) * 38.9 + 96 - GDA$,
siendo TLNO el número de hojas que ya han emergido y GDA
los grados días acumulados. Es importante señalar que el
modelo CERES-Maíz asume que el crecimiento foliar cesa
cuando ocurre la floración femenina, es decir, que en este
momento debe haberse alcanzado el mayor valor en el índice
de área foliar (LAI);

h) Desde el comienzo del llenado efectivo de los
granos hasta madurez fisiológica, que se identifica por la
aparición de un punto de abscisión oscuro en la base del
embrión. De no aparecer este punto oscuro la madurez

de corrección FC (factor de corrección de temperatura cada tres horas):

$$FC = 0.931 + (0.114 \times I) - (0.703 \times I^2) + (0.0053 \times I^3)$$

De acuerdo al procedimiento planteado, la temperatura media corregida será igual a $FC \times (T_{\text{máx.}} - T_{\text{mín.}})$, siendo el término $I = 1.8$ (Jones y Kiniry, 1986, op. cit.).

Por último, si la temperatura media corregida es menor que la temperatura base, los grados días acumulados serán iguales a cero (0); además, si dicha temperatura es mayor de 44 grados $^{\circ}\text{C}$ se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{GDA} = (34 - T_{\text{base}}) \times [1 - (T_{\text{mc}} - 34/10)].$$

Aspectos Productivos

El modelo CERES-Maíz a través de la subrutina GROSUB calcula tanto la producción bruta como la producción neta de biomasa. Para esto se determina primero la radiación fotosintéticamente activa (PAR), que se asume como la mitad de la radiación global incidente. Luego, en base a la densidad de plantas (DP, o número de plantas por metro cuadrado) y el índice de área foliar, se calculará la producción potencial de materia seca (PPMS) asumiéndose primero niveles óptimos de temperatura y agua en el suelo, de la manera siguiente:

$$\text{PPMS} = [5.0 \times (\text{PAR}/\text{DP})] \times [1 - \exp(-0.65 \times \text{LAI})]$$

En la fórmula anterior 5.0 es el número de gramos de materia seca producida por mega Joule de PAR interceptado por las hojas, mientras que 0.65 es el coeficiente de extinción de radiación solar a medida que

ésta penetra en el cultivo y asumiéndose que la intercepción foliar de radiación obedece a la Ley de Beer's.

Luego el modelo introduce dos índices de estres con valores de cero (0) a uno (1), que sirven para ajustar la producción potencial de materia seca a limitantes térmicas o hídricas, seleccionando para el cálculo el menor de los dos. El primer índice introduce el efecto de las temperaturas sobre el proceso de respiración, el que se sabe consume parte de la producción bruta de la planta. Se define así un índice de estres térmico (ST), de la manera siguiente:

$$ST = 1 - 0.0025 \times [((0.25 \times T_{\min}) + (0.75 \times T_{\max})) - 26]^2$$

En la fórmula anterior 26 significa la temperatura media diaria óptima para un balance adecuado de la producción por fotosíntesis en relación a parte de su consumo por el proceso de respiración. Calculado ST, el modelo CERES-Maíz lo utiliza para determinar la producción de materia seca (PMS), que será igual a PPMS x ST.

En forma análoga a la anterior, el efecto de un estres hídrico sobre la producción de materia seca permite determinar a PMS como igual a FDHI x PPMS, siendo FDHI el índice de estres hídrico. Este último se obtiene dividiendo la toma potencial de agua por las raíces en el suelo entre la transpiración de la planta. La extracción potencial de agua se asume como equivalente a 0.03 cm³/cm de raíz. No obstante, ya que la

extracción de agua por las raíces es función de la disponibilidad hídrica del suelo para suplir dichos requerimientos, el modelo reduce convenientemente las tasas de transpiración a medida que el suelo se va secando y en especial si los niveles de agua está cercanos al límite inferior de agua extraible por los cultivares.

La determinación de la producción final del cultivo se logra de la siguiente forma. Durante el período que va desde la polinización hasta el comienzo del llenado de los granos se calcula, de acuerdo a la fotosíntesis acumulada durante dicho período, el número de granos por mazorca GPM:

$$GPM = G2 \times (FA - 195) / (1213.2 + FP11g - 195)$$

G2 es un coeficiente genético que indica el número potencial de granos por mazorca para la variedad o híbrido seleccionado, mientras que FA es la fotosíntesis acumulada durante el lapso de tiempo entre la polinización y el comienzo del llenado del grano; a su vez, el término FA es igual a:

$$FA = FACPLLg \times 1000 / TPLLg \times 3.4 / 5$$

FACPLLg es la fotosíntesis acumulada entre la polinización y el comienzo del llenado del grano, mientras que TPLLg es el tiempo que dura tal acumulación.

El peso final de cada grano se determinará de acuerdo a una tasa de llenado y el tiempo de duración efectiva de dicho llenado, estimándose que el crecimiento total diario de los granos PG, es igual a la siguiente

expresión:

$$PG = TLLG \times GPP \times G_{\pm} \times 0.001 \times (0.45 + 0.55 + FDH1)$$

TLLG es un factor o tasa de llenado de los granos (de 0 a 1) que se calcula de acuerdo a la temperatura media diaria (TMD) = $TLLG + (1 - 0.0025 \times (TMD - 26)^2/8$, mientras que G_{\pm} es un coeficiente genético que indica la tasa máxima de llenado de los granos (mg/día). La producción final por hectárea vendrá dada por la multiplicación del número de granos por mazorca, el peso de dichos granos y el número de plantas por hectarea (la multiplicación de los componentes de la producción; el modelo siempre asume la existencia de una sola mazorca).