



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

**EL CAMBIO CLIMATICO Y SUS EFECTOS POTENCIALES EN
LOS RECURSOS HIDRICOS Y LA AGRICULTURA DEL
VALLE DEL YAQUI, SONORA, MEXICO**

MARTIN DAGOBERTO MUNDO MOLINA

T E S I S

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA**

**FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA
HIDRAULICA**

CIUDAD UNIVERSITARIA

1 9 9 4

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	vi
ABSTRACT	vii
RESUMEN	viii

Capítulo	Página
1 INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Justificación	3
2 AREA DE ESTUDIO	4
3 CAMBIO CLIMATICO	6
3.1 Escenarios	8
3.2 Escenario uno (escenario A o situación habitual)	9
3.3 Escenario dos (escenario B)	9
3.4 Escenario tres (escenario C)	9
3.5 Escenario cuatro (escenario D)	9
3.6 Escenario cero	9
4 METODO PROPUESTO PARA EL CALCULO DE NECESIDADES HIDRICAS ANTE CAMBIO CLIMATICO	10
5 ANALISIS DE RESULTADOS	18
5.1 Necesidades hídricas de los cultivos Etr y Eto	18
5.2 Balance de agua	18
5.3 Disponibilidad de agua para el riego	18
5.4 Necesidades de agua de los cultivos	19
5.5 Condiciones de humedad del suelo	22
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
APENDICES	
Apéndice A: análisis de las principales variables que intervienen en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, disponibilidad de agua en el suelo y evapotranspiración:	
Temperatura	34
Humedad relativa	36
Presión de vapor	38
Radiación	39
Viento	41

Nubosidad	43
Insolación y fotoperiodo	45
Albedo y emisividad	47
Régimen térmico del suelo	48
Precipitación efectiva	49
Humedad del suelo	50
Balance hídrico	52
Apéndice B: análisis del comportamiento de la temperatura en los últimos 20 años (escenario cero), su relación con la tendencia global y sus efectos en los recursos hídricos y la producción agrícola del Valle del Yaqui, Sonora	54
Apéndice C: coeficientes de contingencia y análisis de tendencia con promedios móviles	94
Apéndice D: coeficientes K_c correspondiente a cultivos extensivos y de hortalizas en diferentes fases de desarrollo y según las condiciones climáticas predominantes	100
Apéndice E: duración del período vegetativo y fases de desarrollo de determinados cultivos extensivos y algunas indicaciones al respecto	102
Apéndice F: comparación de E_{to} entre diferentes métodos	108
REFERENCIAS	109

"... El agua es el motor de la naturaleza... Nunca descansa hasta que se junta con el mar, donde, si los vientos no la perturban, se asienta y queda con su superficie equidistante del centro del mundo..."

Enzo Levi

Corre y salta, despierta eternos recuerdos, como las olas del mar, que caminando por el globo azul se enternecen y enfurecen, recordando al hombre la grandeza de su creador. No desmaya, renace y se vuelca llena de esperanzas y virtudes, sobre la arena, sobre la tierra árida, ella no sabe que moldea la roca "...Ella no sabe que va y retorna..."

DEDICATORIA

A mi esposa: Laura, a mi hija: Montserrat

A mis padres: Miguel y Oneida

AGRADECIMIENTOS

A Dios

A mi asesor: Dr. Polioptro Martínez Austria

A mis sinodales: Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares, Dr. Alvaro Muñoz Mendoza, Dr. Jesús Gracia Sánchez, M.I. Jorge Sánchez Sesma.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Tendencia de la temperatura de 1850 al año 2000	1
2 Distrito de riego 041, Valle del Yaqui, Sonora, México	5
3 Efecto de invernadero	6
4 Disminución de la precipitación en junio, julio y agosto	7
5 Disminución de la precipitación en enero, febrero y marzo	8
6 Incrementos de Eto y Etr, casos A	20
7 Decrementos de Eto y Etr, casos B	22
8 Balance hídrico (Bh)	23
9 Volúmenes de agua requeridos en diferentes escenarios de cambio climático	24
10 Volúmenes de agua requerido por el maíz en todo su ciclo vegetativo	25
10.a Emisión de bióxido de carbono a la atmósfera	29
10.b Emisión de gases y actividades que contribuyen al efecto de invernadero en México	31
11 Influencia de la temperatura en la radiación	35
12 Evolución mensual de la temperatura en un período de 30 años	36
13 Variación de la humedad relativa con la temperatura	37
14 Variación de la presión de saturación (E) y actual (e) con la temperatura	40
15 Evolución diaria de la temperatura, Valle del Yaqui	40
16 Evolución de la temperatura en 30 años, Valle del Yaqui	41
17 Variaciones de Eto con distintas intensidades de viento	42
18 Variaciones de nubosidad (NU) promedio, para un período de 30 años	44
19 Variaciones de insolación (n) mensual en un período de 30 años	45
20 Variaciones de la insolación (n) con la latitud	46
21 Aumento de Eto con la insolación (n)	46
22 Variación del albedo con la latitud	48
23 Disponibilidad de agua en el suelo	51
24 Comportamiento de la temperatura, Valle del Yaqui	56
25 Comportamiento de la temperatura media global	57
26 Tendencia de la temperatura, Valle del Yaqui	58
27 Correlación de la temperatura Global y Vicam	59
28 Temperatura, Phoenix Arizona U.S.A.	60
29 Correlación de las temperaturas Phoenix-Global	61

Continuación de la lista de figuras	Página
30 Correlación de las temperaturas Vicam-Phoenix-Global	62
31 Tendencias de la temperatura Vicam-Phoenix-Global	63
32 Tendencias de la temperatura global	66
33 Variaciones de régimen de la temperatura global	67
34 Variaciones de régimen, estación Vicam, Valle del Yaqui	68
35 Aportaciones a la presa Oviachic	71
36 Aportaciones a la presa el Novillo	71
37 Aportaciones a la presa la Angostura	72
38 Aportaciones a la presa Oviachic, serie suavizada (promedio móvil)	73
39 Aportaciones a la presa Novillo, serie suavizada (promedio móvil)	73
40 Aportaciones, presa Angostura, serie suavizada (promedio móvil)	74
41 Tendencias de las aportaciones a la presa Oviachic	75
42 Tendencias de las aportaciones a la presa el Novillo	76
43 Tendencias de las aportaciones a la presa la Angostura	76
44 Extracciones a la presa Oviachic	77
45 Extracciones a la presa el Novillo	78
46 Relación de las extracciones y temperatura, presa Oviachic	79
47 Relación de las extracciones y temperatura, presa el Novillo	79
48 Temperaturas y extracciones de la presa Oviachic	80
49 Comportamiento de la temperatura y extracciones, presa el Novillo	81
50 Tendencia de las extracciones de la presa Oviachic	82
51 Tendencia de las extracciones de la presa el Novillo	82
52 Temperatura y rendimiento del sorgo	85
53 Temperatura y rendimiento del trigo	85
54 Temperatura y rendimiento de la sandía	86
55 Disminución del rendimiento del sorgo	87
56 Disminución del rendimiento del frijol	88
57 Disminución del rendimiento del maíz	88
58 Disminución del rendimiento del cártamo	89
59 Disminución del rendimiento del ajonjolí	89
60 Disminución del rendimiento de la soya	90
61 Disminución del rendimiento del algodón	90
62 Tendencia de incremento en el rendimiento del trigo	91
63 Tendencia de incremento en el rendimiento de la sandía	92
64 Tendencia de incremento en el rendimiento de la cebolla	92
65 Tendencia de incremento en el rendimiento del jitomate	93
66 Componentes de una serie cronológica	97
67 Comparación de Eto entre diferentes métodos	108

LISTA DE TABLAS

	Página
1 Etr y Eto, escenarios de cambio climático, casos A	19
2 Etr y Eto, escenarios B(2) de cambio climático, casos B	21
3 Balance hídrico (Bh)	23
4 Volúmenes de agua requeridos en los diversos escenarios	25
5 Volúmenes de agua requeridos en los escenarios críticos	26
6 Variaciones de Eto con distintas intensidades de viento para el maíz en el período punta, Valle del Yaqui	42
7 Nubosidad, Valle del Yaqui, Sonora	44
8 Comparación estadística de las series de tiempo	64
9 Variaciones de régimen, temperatura global	66
10 Variaciones de régimen, temperatura, Valle del Yaqui	68
11 Variabilidad de régimen respecto a la VIT de la tendencia global y la estación Vicam, Valle del Yaqui	69
12 Variabilidad de la temperatura, tendencia global y regional respecto a la VIT	69
13 Correlación lineal y contingencia de la temperatura y escurrimiento, Valle del Yaqui	74
14 Correlación lineal y contingencia de la temperatura y extracciones, Valle del Yaqui	77
15 Valores promedio de aportaciones y extracciones en un lapso de tiempo de 10 años (1976-1986) y pendientes de las tendencias	83
16 Correlación entre la temperatura y el rendimiento (Kg/Ha)	86
17 Valores máximos y mínimos del rendimiento y valores de las pendientes de disminución de rendimiento (Kg/Ha) de algunos cultivos analizados, Valle del Yaqui, Sonora	87
18 Valores de rendimientos máximos y mínimos y pendientes de las rectas de algunos cultivos con tendencia de incrementos	91
19 Valores de contingencia (C)	96
20 Ejemplo numérico	98
21 Comparación de Eto entre diferentes métodos	108

ABSTRACT

According to the World Meteorological Organization (WMO), increases in world temperature of 0.3°C to 0.6°C have been registered in the past 100 years. Recently, global warming has captured the attention of the scientific community. This issue was widely discussed during the recent meeting in Brasilia (WMO, 1992). As a consequence of the use of fossil fuels for energy production, gases that cause the greenhouse effect have increased since the beginning of the industrial revolution. According to the global warming hypothesis, this has resulted in an increase of mean earth temperature. Global warming follows a behavior where an increase in greenhouse effect gases increases atmospheric energy capture, with a consequent increase in temperature. Based on the scenarios proposed by the Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC) of the United Nations, preliminary estimations of maize potential evapotranspiration (Et) are presented. These show that temperature increases of 2°C to 3°C are likely to increase ET by 12% to 14%. These preliminary results justify the need for further research.

RESUMEN

A partir de la Revolución Industrial se ha incrementado la emisión a la atmósfera de gases que producen el efecto invernadero, como consecuencia del uso y transformación de combustibles fósiles, principalmente. Esto ha originado un incremento en la temperatura media global de la Tierra, es decir, existe una correlación entre una mayor presencia de gases de invernadero y el incremento de la temperatura media global, que obedece a una razón física: a mayor cantidad de gases de invernadero mayor atrapamiento de energía, que a su vez origina mayor calentamiento.

La afirmación anterior es la hipótesis de cambio climático más aceptada en la actualidad (Lluch B.D. et al, 1991). En cálculos con el modelo de radiación modificado, propuesto en este trabajo, realizados para el maíz en el valle del Yaqui, se desprende que se podrían tener incrementos en la evapotranspiración potencial, E_p y la evapotranspiración real, E_r , hasta en un 14%, para los escenarios críticos de incrementos de temperatura media analizados, lo que significa mayores requerimientos de agua, en una zona en la que de por sí, este líquido vital es escaso. Este incremento en E_p y en E_r del maíz en los escenarios críticos aquí estudiados, eleva a su vez de manera proporcional los volúmenes de agua necesarios para mantener los cultivos con un adecuado balance de agua y evitar el riesgo de stress hídrico. En cuanto a las condiciones de humedad del suelo, este tendrá un déficit en los escenarios críticos de hasta un 15%. Estos resultados justifican la necesidad de realizar estudios más profundos.

CAPITULO I

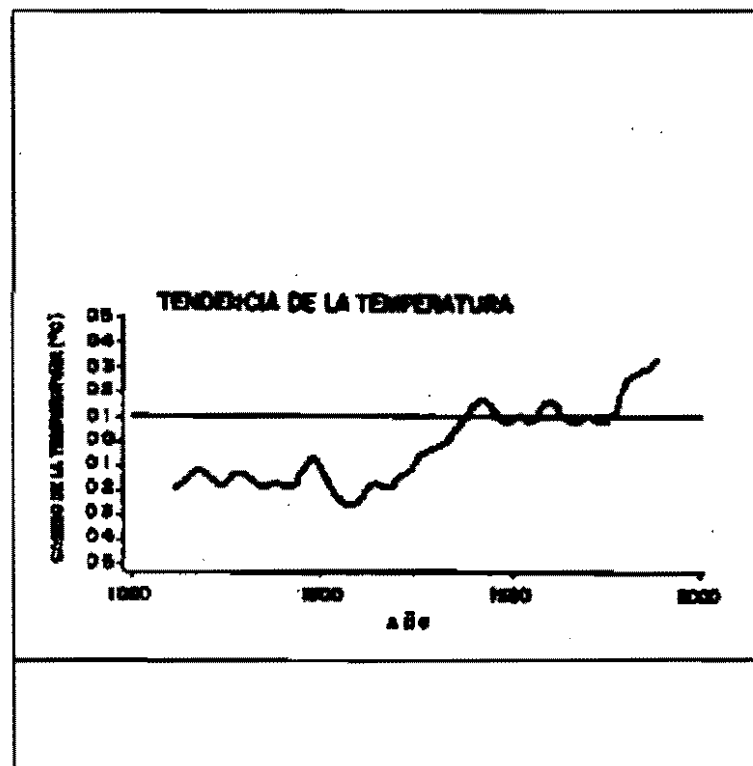
INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

En fechas recientes se ha vuelto de interés público un tema que hasta hace algunos años era sólo de relevancia para los científicos: **el calentamiento global de nuestro planeta**. De hecho, éste fue uno de los temas más controvertidos en la reciente Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, Brasil (OMM, 1992).

El calentamiento global, es decir, el incremento en la temperatura promedio de nuestro planeta y sus efectos potenciales, necesitan ser precisados con mayor detalle, por ejemplo, en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua, sobre todo en las zonas áridas de nuestro país.

Las redes de observación de la Organización Meteorológica Mundial, OMM, han registrado, incrementos de la temperatura media global del planeta entre $.3$ y $.6^{\circ}\text{C}$ en los últimos cien años (Bruce, 1990) (OMM, 1990), como se puede observar en la figura 1.



1. Tendencia de la temperatura de 1850 al año 2000 (OMM, 1990)

El calentamiento esperado de la Tierra según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, PICC de la Organización de las Naciones Unidas, ONU (que ha

realizado simulaciones con modelos de circulación general) será del orden de 2 a 4°C en los próximos cuarenta o cincuenta años (OMM, 1990), dependiendo de las cantidades de CO₂ que se emitan a la atmósfera, aunque regionalmente los efectos puedan ser diferentes. En términos generales, mientras más al norte se presente este fenómeno, mayores serán los efectos (Bruce, 1990).

Los pronósticos se realizaron con un horizonte de treinta a cuarenta años. Cuanto antes nos encontremos preparados para ello, seremos más capaces de adaptarnos y de mitigar los daños potenciales, o incluso, aprovechar las posibles ventajas.

Por otra parte, la creciente presión ejercida sobre los recursos hidráulicos por una combinación de un aumento en la demanda (incremento de población, creciente industrialización y aumento en el nivel de vida, entre otras razones) con una disminución en la oferta de agua (agotamiento de fuentes y contaminación), prefiguran una crisis de escasez, que algunos expertos piensan será de gran magnitud y de alcance global (Jensen, 1990) (Biswas, 1991).

En este contexto, la posibilidad de una disminución de la cantidad de agua disponible en regiones áridas o semiáridas, aunada a la de un aumento de la evapotranspiración de los cultivos -ambas situaciones ocasionadas por el incremento en la temperatura provocado por el calentamiento global- merece el más serio análisis, dado que las variaciones del clima influye en los cultivos ya que a través de la evapotranspiración se realiza el intercambio de agua y energía en la atmósfera (IG-BP, 1991).

Un estudio de los efectos del cambio climático sobre la agricultura no se trata, por lo tanto, de especulaciones teóricas, sino de planear la administración y el aprovechamiento de los recursos hidráulicos bajo estas condiciones, para evitar hasta donde sea posible sus efectos adversos y, si es el caso, aprovechar sus efectos benéficos (Mundo y P. Martínez-Austria, 1993).

En este trabajo se presentan diversos cálculos acerca de los principales efectos potenciales del cambio climático sobre los recursos hidráulicos, con especial énfasis en los que se destinan a la agricultura de riego; y algunos resultados sobre la evapotranspiración del maíz en el valle del Yaqui, bajo diferentes escenarios de calentamiento global.

Se trata de un estudio que pretende establecer en forma aproximada el orden de la magnitud del problema, con miras a planear los recursos hídricos ante escenarios críticos de cambio climático.

1.2 Objetivos

En esta tesis se presentan los efectos potenciales del cambio climático sobre los recursos hidráulicos en el Valle del Yaqui, Sonora; con especial énfasis en la agricultura de riego.

Se presentan los resultados de las condiciones de evapotranspiración del maíz en el Valle, disponibilidad de agua del suelo y condiciones de humedad del mismo, bajo diferentes escenarios de calentamiento global.

En este estudio se aplica el método de Radiación modificado, que se propone en esta tesis, basado en el modelo de Radiación de FAO en su texto "Necesidades hídricas de los cultivos" (FAO 24, 1976).

1.3. Justificación

Observaciones de la atmósfera terrestre muestran que ciertos gases denominados de invernadero han incrementado su proporción.

Se acepta que el bióxido de carbono ha aumentado su concentración en la atmósfera en un 28%, metano 100%, óxido nitroso 9% y fluorocarbonados (CFC) hasta en 1300%.

La hipótesis más aceptada conforme a la evidencia física es que el incremento de estos gases ha originado el sobrecalentamiento de la tierra.

Tomando como hipótesis que el calentamiento global es un proceso en marcha y como hecho que la producción de granos y la disponibilidad de agua en las zonas semiáridas de nuestro país es de vital importancia, es necesario el estudio de los posibles efectos del cambio climático sobre el recurso agua y la producción de granos en una zona de alto potencial agrícola. Aquí se ha tomado como caso de estudio el Valle del Yaqui, en el estado de Sonora.

CAPITULO II

AREA DE ESTUDIO

Para analizar las consecuencias potenciales de un incremento en la temperatura media global y sus efectos en la agricultura, se propuso como zona de estudio el valle del Yaqui, principalmente por tres razones:

- *Importancia nacional:* por su producción agrícola.
- *Situación geográfica:* situada en el norte del país, donde se esperan los mayores efectos de un posible cambio climático.
- *Clima:* clasificada como zona semiárida donde el recurso agua reviste gran importancia.

El distrito de riego 041 Valle del Yaqui es una planicie costera al sur del estado de Sonora con un alto potencial agrícola, conformado por los siguientes municipios: Guaymas, Bacum, Cajeme, Navojoa y Etchojoa, los cuales comprenden 220 000 ha bajo riego -ver figura 2- ubicadas entre los 26° 58' y los 27° 50' de latitud norte y entre los 109° 31' y los 110° 23' de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Su altura sobre el nivel del mar fluctúa entre los cuatro y setenta metros, con una altura media de treinta metros, cuya pendiente media es 1.5 m/k, en dirección al suroeste hasta llegar al mar.

Los principales cultivos son los siguientes: trigo, cártamo, soya, ajonjolí y maíz.

En el ciclo de verano se siembran, entre otros productos, soya, ajonjolí y maíz.

La mayor parte de la producción agrícola se destina al consumo nacional.

El clima es semiárido, con humedad deficiente durante casi todo el año, principalmente en invierno y primavera.

La temperatura media es de 23°C con insolación abundante casi todo el año, principalmente en el lapso de sequía que va de marzo a julio.

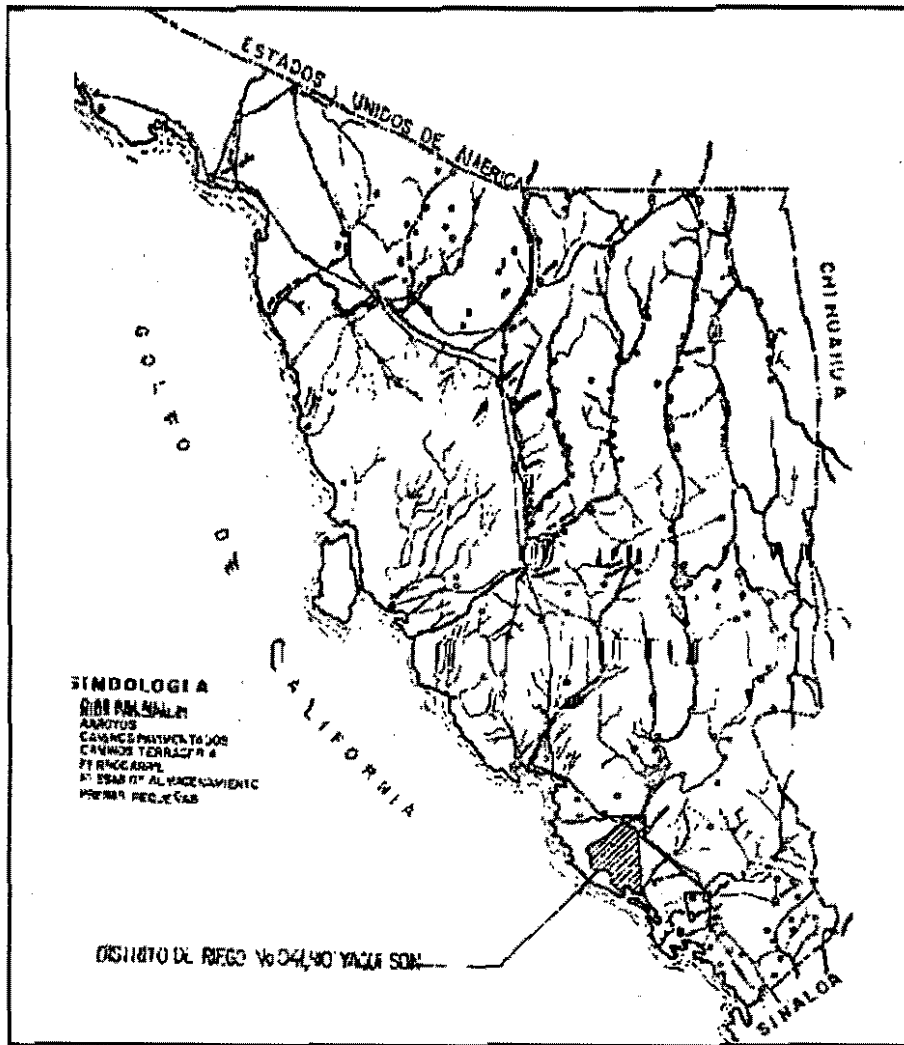
El número de horas sol es predominante sobre los nublados.

La precipitación media anual es de 272.3 mm, buena parte de ella ocurre en los meses de julio, agosto, septiembre y parte de octubre.

La evaporación media anual es de 1986 mm.

Los vientos dominantes son del norte y noroeste en otoño e invierno y el resto del año son del suroeste y oeste (de poca intensidad) y fuertes únicamente en época de lluvias.

Cuenta con tres presas importantes: Alvaro Obregón, Plutarco Elías Calles y Angostura con una capacidad de 2989 Mm³, 2925 Mm³ y 864 Mm³ respectivamente, sumando una capacidad total de 6778 millones de metros cúbicos.



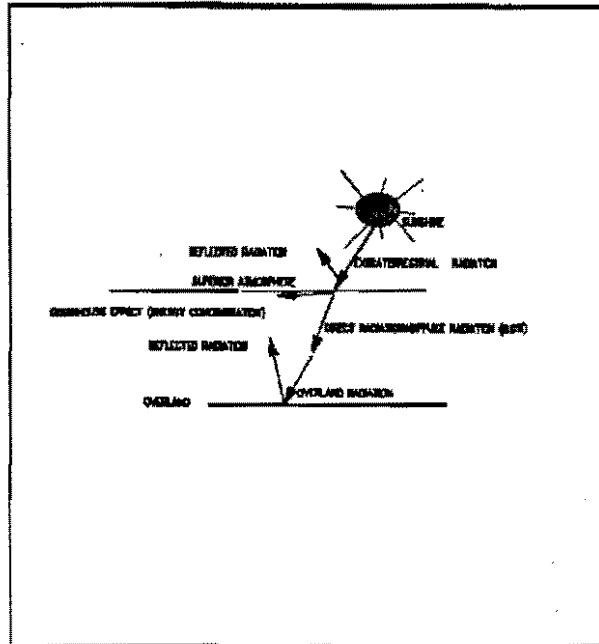
2. Distrito de riego 041, valle del Yaqui, Sonora, México

En general con el riego, que se realiza casi en su totalidad por gravedad, se cubren las necesidades de los cultivos principales, quedando supeditado el riego de los otros cultivos a la disponibilidad de agua en las presas.

CAPITULO III

CAMBIO CLIMATICO

Cierta radiación reemitida por la superficie terrestre, es atrapada en la atmósfera por tres gases, principalmente: bióxido de carbono CO_2 , vapor de agua y ozono O_3 ; pero además existen otros que atrapan dicha radiación y que también se encuentran presentes en la atmósfera como: óxido nitroso NO_2 , metano CH_4 , y clorofluorocarbonatos CFC , que producen el efecto *invernadero*. Ver figura 3.



3. Efecto invernadero

A partir de la Revolución Industrial, se ha incrementado la emisión a la atmósfera de gases que producen el efecto *invernadero*, como consecuencia del uso y la transformación de combustibles fósiles, principalmente.

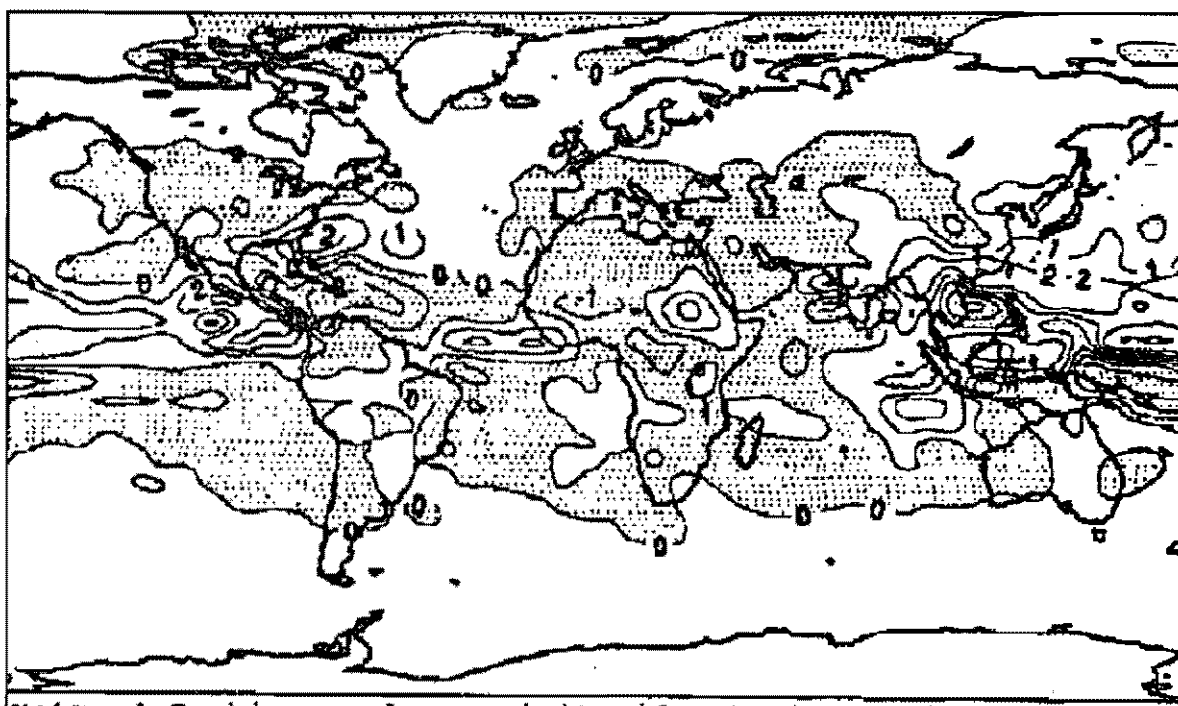
Se cree que esto ha originado un incremento en la temperatura media global de la Tierra, dada la correlación entre una mayor presencia de gases de invernadero y el incremento de la temperatura media global.

La hipótesis más ampliamente aceptada en la actualidad es que estamos viviendo un periodo de calentamiento de la tierra, debido a la creciente concentración de CO_2 en la atmósfera (Lluch, 1991).

El uso de combustibles fósiles; la deforestación, ciertas técnicas agrícolas, el incremento en la producción industrial, el uso ineficiente de diversas fuentes de energía, el uso de transportes consumidores de combustibles fósiles (terrestres y aéreos), termoeléctricas, extensión de zonas ganaderas, la continua extinción de los bosques y selvas, la explosión demográfica, entre otros factores, son la causa del incremento en la atmósfera de gases de *invernadero*, como: bióxido de carbono,

metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonatos.

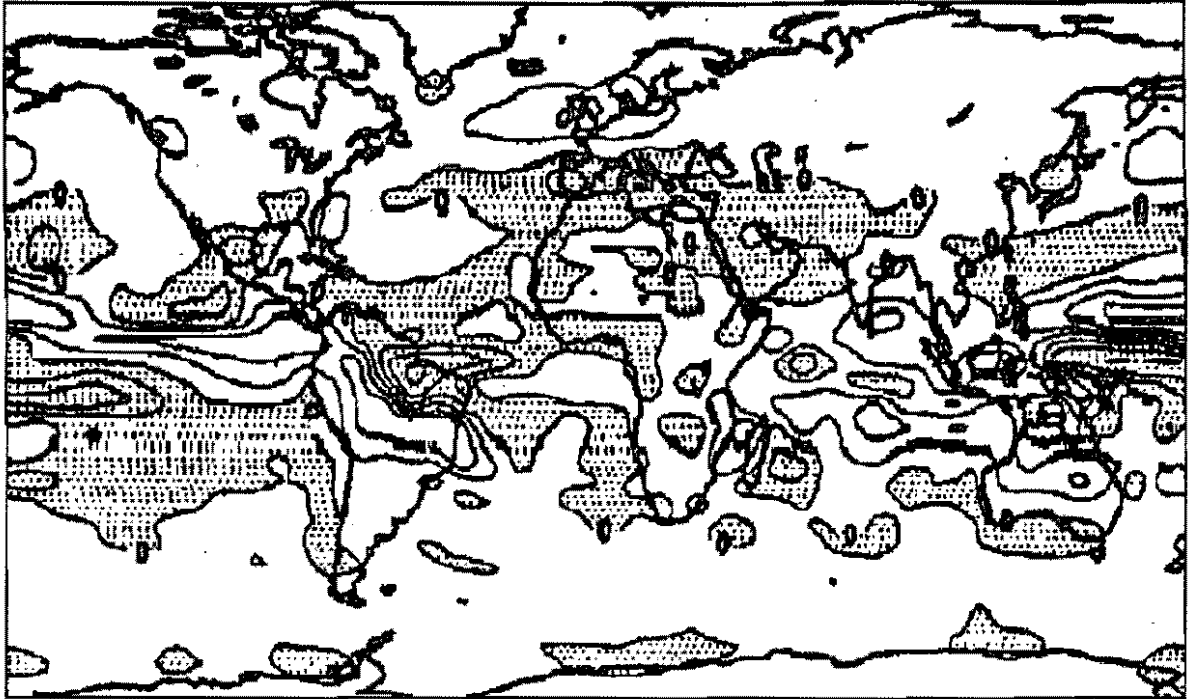
Como se puede apreciar en las figuras 4 y 5, México se encuentra localizado en una zona en la que probablemente disminuiría la precipitación en invierno (zona punteada) (Gleick, 1987), por lo que podrían esperarse daños en la agricultura sobre todo en la de temporal (Macera, 1991). Esta afirmación resulta preocupante, pues la mayor parte de la superficie de cultivo en nuestro país corresponde a este tipo de agricultura. Como ejemplo de la magnitud en los cambios en la precipitación, se prevé (Gleick, 1987) para la cuenca de Sacramento, California, Estados Unidos de América, una disminución de 10% en la precipitación que, combinada con un incremento de temperatura de 2°C, producirá una disminución de 68% en el escurrimiento de verano, y un incremento de 14% en el de invierno.



4. Disminución de la precipitación en junio, julio y agosto

En México y América Central se esperan incrementos de hasta 3.3 a 4.5°C (si se duplica el CO_2 atmosférico actual) (OMM, 1990), descenso en el patrón de precipitaciones, así como una reducción entre 10 y 20% de la disponibilidad de agua en el suelo, lo que provocaría una disminución de entre un 5 y un 25% en la producción de maíz (Liverman *et al*, 1991). Esta reducción de la precipitación también afectaría al sur de los Estados Unidos de América y de los países que formaban la ex-Unión Soviética, lo que a su vez provocaría incrementos en la frecuencia de sequías (Benz, 1991).

La magnitud de los cambios esperados justifican en México la elaboración de estudios regionales, debido a que la resolución de la malla de cálculo de los modelos de



5. Disminución de la precipitación en enero, febrero y marzo

circulación general no permite mucho detalle.

Los cambios en la precipitación, evapotranspiración, evaporación y humedad del suelo, combinados con efectos de temperatura, pueden ocasionar cambios mayores en el escurrimiento superficial (Mimikou y Kouvopoulus, 1991).

3.1 Escenarios

En las simulaciones realizadas con el modelo propuesto en este trabajo, se utilizaron cuatro escenarios de cambio climático, consistentes con los propuestos por el PICC de la ONU (Bruce, 1990).

Las hipótesis de trabajo son:

- El cambio climático es un proceso en marcha.
- Se producen incrementos de la temperatura media, de acuerdo a lo predicho por el PICC, en los cuatro escenarios referidos en los siguientes subíndices.
- Los efectos regionales de incremento de temperatura media son más acusados que los globales.

3.2 Escenario uno (escenario A o situación habitual)

La mejor aproximación de incremento es de 3° C en los próximos cien años, pero podría llegar a cinco grados centígrados.

- No se toman medidas para disminuir y controlar las emisiones de gases de invernadero.
- El carbón es la principal fuente de energía y continúa el deterioro y la tala de bosques y selvas.
- Continúa la expansión de la agricultura.
- La emisión de *CFC* no se restringe.

3.3 Escenario dos (escenario B)

Se calculan 2°C de incremento en la temperatura media global en los próximos cien años.

- Se sustituye parcialmente el uso del carbón por gas natural.
- Control rígido de monóxido de carbono.
- Se implantan programas de forestación.
- Se aplican adecuadamente y a nivel mundial las restricciones en las emisiones de clorofluorocarbonatos.

3.4 Escenario tres (escenario C)

Se estima en algo más de 1°C de incremento en los próximos cien años.

- La principal fuente de energía es la nuclear.
- No existe emisión de clorofluorurocarbonatos.
- Se pone en marcha el concepto de *desarrollo agrícola sustentable*.

3.5 Escenario cuatro (escenario D)

Se estima en cerca de 1°C el incremento de la temperatura para los próximos cien años.

- Durante la primera mitad del próximo siglo se utiliza energía nuclear.
- Las concentraciones de gases de invernadero están estabilizadas.
- Existe una recuperación de bosques y selvas.
- Las actividades agrícolas reducen notoriamente sus emisiones a la atmósfera.

Los especialistas del PICC estiman que si en este momento se estabilizan las emisiones de gases de invernadero, es probable que la temperatura siga incrementándose a un ritmo de 0.2 °C por decenio y durante algunos decenios más (OMM, 1992).

3.6 Escenario cero

Situación actual

CAPITULO IV

METODO PROPUESTO PARA EL CALCULO DE NECESIDADES HIDRICAS ANTE CAMBIO CLIMATICO

Los principales factores que influyen en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos son: clima, humedad disponible en el suelo, cultivo, medio ambiente, suelo, prácticas de cultivo y riego, por mencionar los más importantes. De ellos, el clima, por sus efectos, es uno de los factores más importantes.

En la literatura especializada se pueden consultar varios métodos para predecir las necesidades de agua de los cultivos. Su aplicación depende del tipo de datos disponibles.

Tres de las razones más importantes para aplicar el método de radiación en el cálculo de necesidades hídricas de los cultivos, ante diferentes escenarios de cambio climático son las siguientes:

- *El intercambio calorífico* entre el aire atmosférico y el medio ambiente (incluyendo el suelo) ocurre por radiación.

- *La radiación reemitida a la atmósfera* por la superficie terrestre, los cultivos y los vegetales (según su coeficiente de reflexión o albedo σ), son atrapados por los gases de invernadero (CO_2, NH_4, CFC, NO_2), vapor de agua (evapotranspiración) y ozono principalmente. Lo anterior sugiere un balance de radiación que incluya, ante diversos escenarios de cambio climático, a la temperatura (tanto del ambiente como del suelo) como factor principal en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos.

- *Disponibilidad de datos.* Sólo se cuenta con datos medidos de temperatura, nubosidad, insolación y datos estimados de humedad y viento.

Uno de los cuatro métodos validados por *FAO 24* en diversos climas y partes del mundo, para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos, es el de la radiación, cuya ecuación queda determinada por (FAO 24, 1976):

$$E_{to} = a + b \cdot (w \cdot R_s') \dots (1)$$

donde:

E_{to} = evapotranspiración de los cultivos (mm/día)

a, b = constantes de la ecuación.

$w \cdot R_s'$ = factor de radiación (langley).

Para obtener la E_{tO} de los cultivos, **FAO 24** recomienda una serie de relaciones que están en función de los niveles de humedad relativa hr , velocidad de viento y temperatura t principalmente, las cuales transformadas a ecuaciones quedan determinados por los siguientes cuatro bloques:

Humedad < 40%

vientos diurnos débiles (0-2 m/s):

$$E_{tO} = \frac{[1.086 * (w.Rs') * 0.65] - 0.281}{0.65} \dots (2)$$

vientos diurnos moderados (2-5 m/s):

$$E_{tO} = \frac{[1.125 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2687}{0.65} \dots (3)$$

vientos diurnos fuertes (5-8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{[1.203 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2413}{0.65} \dots (4)$$

vientos diurnos muy fuertes (8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{[1.274 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2091}{0.65} \dots (5)$$

Humedad 40-55%

vientos diurnos débiles (0-2 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(0.974) (w.Rs') (0.65) - 0.2719}{0.65} \dots (6)$$

vientos diurnos moderados (2-5 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(1.051) (w.Rs') (0.65) - 0.2493}{0.65} \dots (7)$$

vientos diurnos fuertes (5-8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(1.316) (w.Rs') (0.65) - 0.4618}{0.65} \dots (8)$$

vientos diurnos muy fuertes (> 8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(1.188) (w.Rs') (0.65) - 0.1378}{0.65} \dots (9)$$

Humedad 55-70%

vientos diurnos débiles (0-2 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(0.904) (w.Rs') (0.65) - 0.3068}{0.65} \dots (10)$$

vientos diurnos moderados (2-5 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(0.965) (w.Rs') (0.65) - 0.2655}{0.65} \dots (11)$$

vientos diurnos fuertes (5-8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(1.035) (w.Rs') (0.65) - 0.2827}{0.65} \dots (12)$$

vientos diurnos muy fuertes (> 8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(1.086) (w.Rs') (0.65) - 0.652}{0.65} \dots (13)$$

Humedad > 70%

vientos diurnos débiles (0-2 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(0.803) (w.Rs') (0.65) - 0.2801}{0.65} \dots (14)$$

vientos diurnos moderados (2-5 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(0.857) (w.Rs') (0.65) - 0.2419}{0.65} \dots (15)$$

vientos diurnos fuertes (5-8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(0.910) (w.Rs') (0.65) - 0.2470}{0.65} \dots (16)$$

vientos diurnos muy fuertes (> 8 m/s):

$$E_{tO} = \frac{(0.955) (w.Rs') (0.65) - 0.248}{0.65} \dots (17)$$

Sin embargo, en las ecuaciones (1) a (17) el factor de radiación $w.Rs'$ tiene algunas limitaciones en cuanto a su cálculo, ya que la radiación solar Rs' se calcula con (Chávez, 1977) (FAO 24, 1976):

$$Rs' = (c + d \frac{n}{N}) Ra \dots (18)$$

donde:

Rs' = radiación solar (langley). En adelante todas las variables que aparecen con unidades de *langley* = $Cal/cm^2/día$ son convertidos a milímetros/día, al multiplicarse por el factor 0.017 (1 langley = 0.017 mm/día) (FAO 24, 1976).

c, d = constantes: radiación directa y difusa respectivamente, $c = 0.25, d = 0.50$

n/N = factor de nubosidad.

Ra = radiación extraterrestre (langley)

Debe notarse que los valores c y d no son constantes como en esta ecuación se supone, son factores de la radiación directa y difusa (onda corta) respectivamente y varían con la latitud y época del año del punto en cuestión.

Además, el valor de w en las ecuaciones (1) a (17) es un índice que representa dos factores importantes a la vez: temperatura y altitud, que deberían ser medidos independientemente, para tener una evaluación más real.

En la ecuación (18) se calcula la nubosidad NU , con el cociente de insolación n/N . Sin embargo, el factor nubosidad NU puede ser calculado explícitamente (Ortiz, 1987), como se muestra en las ecuaciones (24) y (25), ya que para este caso en estudio se tienen valores de nubosidad estimados en un período de treinta años, en el valle del Yaqui.

Por otro lado, la ecuación (18) representa una fracción (aproximadamente el 45%) de la radiación total que llega a la atmósfera, y no toma en cuenta la evapotranspiración vegetal.

Si se quiere evaluar la influencia de la radiación en la evapotranspiración de los cultivos, debe considerarse la radiación neta o efectiva Rs , que además de considerar la radiación directa y difusa, ecuación (18), tomé en cuenta la reflexión solar de la superficie o de los cultivos (albedo), además de la radiación atmosférica que llega al suelo R_{atm} y la radiación terrestre R_{terr} .

Por lo tanto se propone calcular el factor wRs' de las ecuaciones (1) a (17) de la siguiente forma (Torres, 1984):

$$Rs = (R_{dir} + R_{dif}) + R_{atm} - R_{terr} \dots (19)$$

donde:

$$R_s = w R_s' \dots (20)$$

R_s = radiación efectiva o balance de radiación (langley)

$\downarrow R_{dir}$ = radiación directa, onda corta (langley)

$\downarrow R_{dif}$ = radiación difusa, onda corta (langley)

$\downarrow R_{atm}$ = radiación atmosférica que llega al suelo, de onda larga (langley)

$\uparrow R_{terr}$ = radiación terrestre, de onda larga (langley)

Con la ecuación (19) se toma en cuenta la fracción de radiación que penetra la atmósfera y el balance de la misma a nivel de la superficie terrestre.

Considerando la reflexión de los vegetales o albedo en la superficie terrestre, la ecuación (19) podría escribirse de la siguiente forma (FAO 24, 1976) (Torres, 1984):

$$R_s = (R_{dir} + R_{dif}) (1 - \alpha) + \downarrow R_{atm} - \uparrow R_{terr} \dots (21)$$

donde:

α = coeficiente de reflexión de la superficie o albedo.

Para calcular la radiación atmosférica R_{atm} de la ecuación (21) Brunt propone (Torres, 1984):

$$\downarrow R_{atm} = (0.34 + 0.079\sqrt{e}) \sigma T_1^4 \dots (22)$$

donde:

e = presión de vapor a 2 m del suelo (mmHg)

σ = constante de Stefan Boltzmann (1.17×10^{-7} langley).

T_1 = temperatura absoluta °K (a 2m sobre el suelo).

La radiación terrestre R_{terr} de la ecuación (21) se puede calcular con la ecuación de Stefan Boltzmann (Torres, 1984):

$$\uparrow R_{terr} = \epsilon \sigma T_2^4 \dots (23)$$

donde:

ϵ = emisividad de la superficie

T_2 = temperatura absoluta, °K (suelo).

Por lo tanto, sustituyendo (22) y (23) en (21), en este trabajo se propone calcular el factor de radiación R_s , considerando efectos de nubosidad, de la siguiente manera:

$$R_s = (R_{dir} + R_{dif}) (1 - \alpha) + [(0.34 + 0.079\sqrt{e}) \sigma T_1^4 - \epsilon \sigma T_2^4] \left(1 - \frac{DD \cdot 0.1 + DMN \cdot 0.5 + DNC \cdot 0.85}{DTM}\right) \dots (24)$$

donde:

DD = días despejados

DMN = días medio nublados

DNC = días nublados cerrados

DTM = días totales del mes

Si los datos de temperatura de la superficie terrestre y sobre el suelo (ambiente) son iguales, la ecuación (24) queda como:

$$R_s = (R_{dir} + R_{dif}) (1 - \alpha) + [(0.34 + 0.079\sqrt{e}) \sigma T^4] \left[1 - \frac{DD \cdot 0.1 + DMN \cdot 0.5 + DNC \cdot 0.85}{DTM}\right] \dots (25)$$

Sustituyendo (24) si T_1 es diferente de T_2 o (25) si $T_1 = T_2$ en (1) a (17) dependiendo de las condiciones de humedad relativa y viento, se puede obtener la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{to} . La ecuación (25), donde $T_1 = T_2$ fue utilizada en este trabajo (debido a la falta de datos de temperatura del suelo).

Conocido E_{to} y k_c , y sustituyendo sus valores en (26) se puede conocer finalmente la evapotranspiración real del cultivo en cuestión:

$$E_{tr} = E_{to} K_c \dots (26)$$

donde:

K_c = coeficiente del cultivo

Este método propuesto fue contrastado con Penman-Monteith y su error de aproximación en cálculos de E_{to} total para el escenario cero (sin incrementos de temperatura) es de ocho por ciento (ver figura 67 y tabla 21, apéndice F).

Con este método se pueden obtener valores más precisos en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, ante diversos escenarios de cambio climático, ya que éste toma en consideración efectos de temperatura, radiación directa y difusa

radiación global o radiación de onda corta, radiación de onda larga (atmosférica y terrestre), condiciones de humedad relativa, viento, niveles de tensión de vapor, nubosidad, reflexión vegetal α , emisividad terrestre ϵ y temperatura del suelo.

Para el uso de las ecuaciones (24) y (25) únicamente se necesitan valores medidos de radiación, temperatura y nubosidad.

Las limitaciones del método son: no considera los efectos dinámicos y biológicos del incremento de CO_2 en la atmósfera.

CAPITULO V

ANALISIS DE RESULTADOS

Se analizan principalmente las necesidades hídricas de los cultivos (evapotranspiración real y potencial), condiciones de humedad del suelo (balance hídrico) y disponibilidad de agua para el riego (volúmenes necesarios) ante diferentes escenarios de cambio climático.

5.1 Necesidades hídricas de los cultivos E_{tr} y E_{to}

- Casos A: se consideraron cuatro escenarios de cambio climático, D, C, B, A y A BIS con incrementos de 1, 1.5, 2, 3 y 4°C respectivamente, consistentes con los del PICC de la ONU, suponiendo que las condiciones de humedad, tensión de vapor y radiación aumentan proporcionalmente con la temperatura; la precipitación no cambia y las condiciones de nubosidad se mantienen como en la actualidad.

- Casos B: se consideraron los mismos escenarios que los casos A. La nubosidad aumenta 10, 15, 20, 25, y 30%, respectivamente, para un escenario específico (B).

En ambos casos se analizan principalmente las variaciones (en porcentaje) de E_{to} y E_{tr} en los escenarios de cambio climático, con respecto al escenario actual (denominado en este trabajo escenario cero), para el período de máximas demandas o período punta (agosto).

5.2 Balance de agua

Diversos escenarios de cambio climático, se analizan con base en el concepto de balance hídrico.

Este concepto permite conocer las condiciones de déficit de agua del suelo, o los volúmenes de agua que habrá que reponer al mismo mediante el riego (en caso de valores positivos) en condiciones de cambio climático, en los escenarios ya descritos. Se comparan los valores obtenidos en los diferentes escenarios contra el actual (escenario cero), en el período punta (agosto).

5.3 Disponibilidad de agua para el riego

Se cuantifican los volúmenes de agua necesarios en el escenario cero, así como en los escenarios de cambio climático, en dos situaciones específicas:

- Período punta (agosto)
- Ciclo vegetativo (completo) del maíz

5.4 Necesidades de agua de los cultivos

Casos A, condiciones de la simulación:

- H_r , e , E y R_s aumentan con la temperatura
- La precipitación P no cambia
- La nubosidad NU no cambia

Como podrá observarse en la figura 6 y en el tabla 1, existe una tendencia de incremento de los valores de E_{to} y E_{tr} entre el escenario cero y el escenario crítico (A BIS), de 156.84 mm/mes a 169.53 mm/mes y de 144.29 mm/mes a 155.96 mm/mes, respectivamente.

La diferencia entre estos valores representa el 7.5 % más de evapotranspiración real y potencial del maíz, del escenario cero respecto al escenario crítico (A BIS).

1. E_{tr} y E_{to} , escenarios de cambio climático, casos A

Escenario	E_{to} (mm/mes)	(%) ^b	E_{tr} (mm/mes)	(%)
Cero ^c	156.84	0	144.29	0
D(1) ^d	159.97	1.96	147.17	1.96
C(1.5)	161.54	2.90	148.61	2.90
B(2)	163.12	3.85	150.07	3.85
A(3)	166.31	5.69	153.00	5.69
A BIS (4)	169.53	7.5	155.96	7.5

^b Los porcentajes son con respecto al escenario cero, para los casos A y B

^c El escenario cero corresponde a las condiciones actuales del clima en el valle del Yaqui

^d Los valores entre paréntesis corresponden a los incrementos de temperatura media, según el escenario simulado.

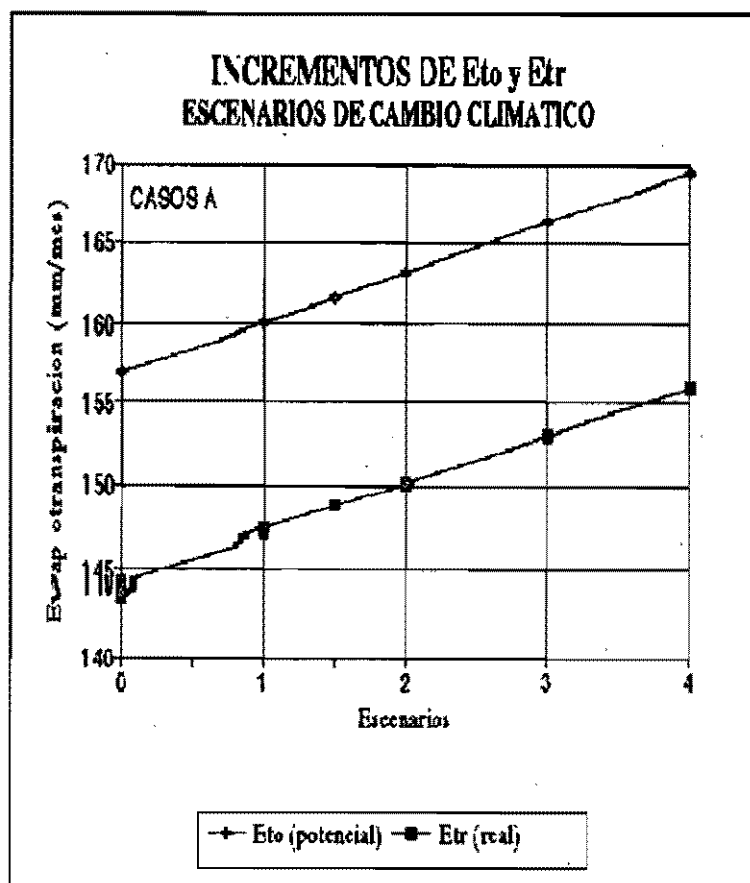


Fig. 6 Incrementos de Eto y Etr, casos A

Los resultados anteriores indican una pérdida de agua mayor hacia la atmósfera por efecto de la temperatura, en el proceso evapotranspirativo del cultivo. Este porcentaje, transformado en volumen, representa una cantidad significativa de agua que deberá disponerse en caso de presentarse escenarios de cambio climático como los aquí estudiados, de lo contrario se pondría en riesgo la producción agrícola, dado que, si no existe suministro o reposición del agua evapotranspirada, se pondría a los cultivos en peligro de agotamiento por las siguientes razones:

- Cambio en la frecuencia de los riegos: Dado un incremento de *Eto* y *Etr* se modifica el balance de agua en el suelo. Ver ecuación 43. Incrementándose el valor de las pérdidas (*Etr*), se incrementa a la vez el valor de balance hídrico (*Bh*), el cual representa la lámina de agua que habrá que reponer al cultivo mediante el riego. Con el incremento del (*Bh*), sufren modificaciones los calendarios de riego y con ello la frecuencia de los mismos.

La frecuencia y el tiempo del riego es vital en la producción agrícola, sobre todo en la etapa de germinación y más importante aún en la floración. Por ejemplo, si no se riega en el momento adecuado en la etapa de floración, la producción agrícola (en este caso del maíz) puede decaer hasta en un 50% (Liverman *et al*, 1991).

- Disponibilidad insuficiente del recurso agua: El incremento de hasta el 7.5 % de la evapotranspiración real, transformado en volumen de agua, es una cantidad

significativa con que las presas habrán de contar en caso de presentarse escenarios de cambio climático como los aquí descritos.

Lo anterior tiene una importancia relevante ya que, precisamente, se necesitará más agua en una zona donde siempre el recurso es limitado.

Si no se dispone de agua de riego en el momento necesario, la producción agrícola en la zona podría decrecer, sobre todo la de granos y cereales, que son menos resistentes a las sequías.

Casos B, condiciones de la simulación (escenario B(2)):

- *hr, e, E, Rs* aumentan con la temperatura

- La precipitación no disminuye

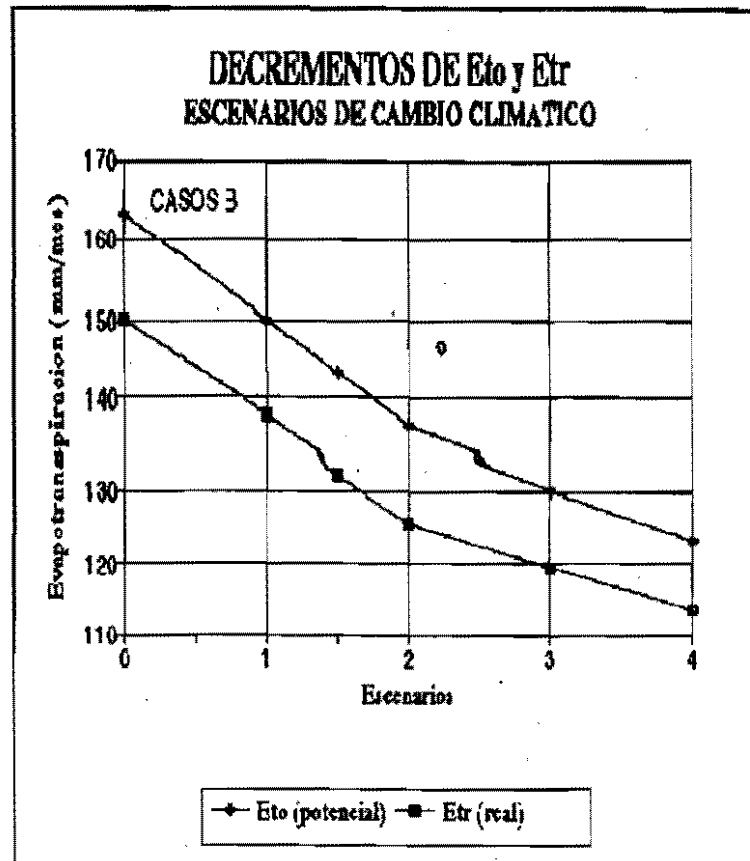
- La nubosidad aumenta 10, 15, 20, 25 , y 30% para el escenario B(2).

Si la precipitación no disminuye y aumenta la temperatura, y además se presentan incrementos de humedad del ambiente, y por ésta razón aumentan los niveles de nubosidad en la zona, las consecuencias potenciales del cambio climático, según este modelo, no serán tan drásticas, ya que la nubosidad es un factor mitigante de los efectos de la radiación solar y evapotranspiración de los cultivos. Incluso para un mismo valor de temperatura y aumentos de nubosidad (de 0 a 30%) la *Eto* disminuye entre 8 y 24.3 % (tabla 2, columna 5).

Lo anterior puede notarse en la figura 7 y en el tabla 2, en donde efectivamente, existe una tendencia de decremento de los niveles de evapotranspiración *Etr* y *Eto*. Estos decrementos son del orden del 24.3 %, del escenario cero respecto al crítico (A BIS).

2. *Etr* y *Eto*, escenarios B(2) de cambio climático, casos B

Incremento de Nubosidad	<i>Eto</i> (mm/mes)	(%)	<i>Etr</i> (mm/mes)	(%)
0 %	163.12	0	150.07	0
10 %	149.91	8	137.91	8
15 %	143.30	12.15	131.83	12.5
20 %	136.69	16.20	125.75	16.2
25 %	130.09	20.24	119.68	20.24
30 %	123.48	24.3	113.60	24.30



5.5 Condiciones de humedad del suelo

Las variaciones de disponibilidad de agua en el suelo se analizan en este caso para el período de máximas demandas (agosto).

Casos A, condiciones de la simulación:

- H_r , e , E y R_s aumentan con la temperatura
- La precipitación P no cambia
- La nubosidad NU no cambia

Casos B, condiciones de la simulación:

- h_r , e , E , R_s aumentan con la temperatura
- La precipitación no disminuye
- La nubosidad aumenta 10, 15, 20, 25, y 30% para el escenario B.

Los valores de la figura 8 y del tabla 3 nos indican un incremento del déficit de agua en el suelo en los diferentes escenarios (casos A), con una diferencia en porcentaje de hasta 13.68 % aproximadamente, entre el escenario cero (actual) y el crítico (A BIS). Sin embargo, bajo condiciones de aumento de nubosidad, humedad relativa y tensión de vapor en la región (casos B), este porcentaje disminuye notablemente. Ver figura 8 y tabla 3. Debe notarse que la diferencia máxima en porcentaje entre el escenario cero y el crítico (A BIS) es del 43.76 % (CASOS B).

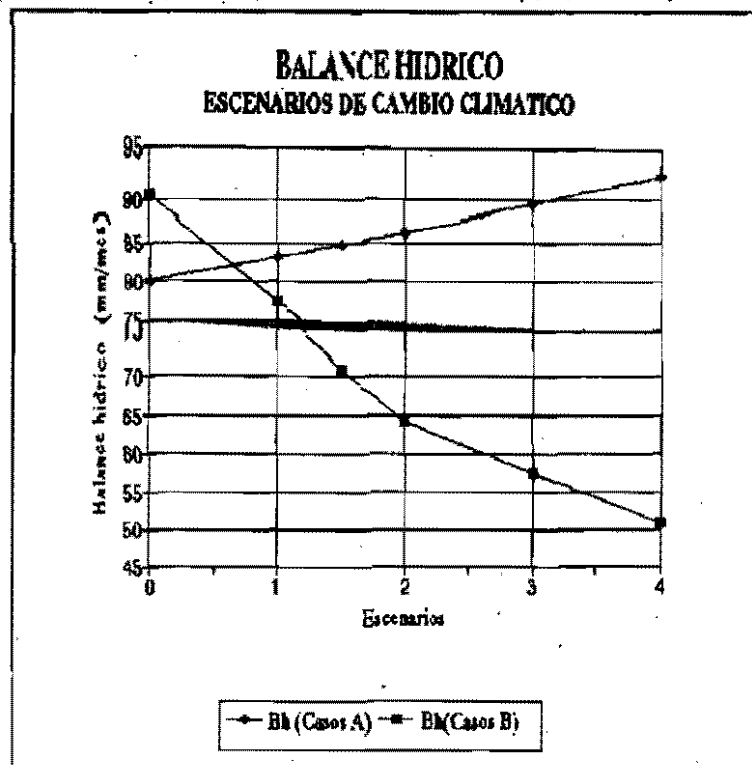


Fig. 8 Balance hídrico (Bh)

3. Balance hídrico

Escenario	Caso A Bh(mm/m)	(%)	Caso B Bh(mm/m)	(%)
Cero	80.02	0	90.57	0
D(1)	83.15	3.76	77.36	14.58
C(1.5)	84.72	5.54	70.75	21.88
B(2)	86.30	7.27	64.14	29.18
A(3)	89.49	10.58	57.54	36.46
A BIS (4)	92.71	13.68	50.93	43.76

Esto indica que en los casos A, se necesitaría más agua que reponer, en un porcentaje de hasta 13.7%, lo que provocaría cambios en la frecuencia de los riegos en la región y mayores volúmenes de agua disponibles. Este último punto se analizará en el siguiente subíndice.

Sin embargo, en caso de aumentar la nubosidad (incremento del 30%), éste déficit se reduciría hasta en un 43.76% entre los escenarios cero y A BIS.

● Disponibilidad de agua para el riego

Cuanto más caliente sea una zona, para ciertos valores de humedad relativa y viento, mayores serán las demandas de agua de los cultivos. Para poder ejemplificar adecuadamente con este modelo, los volúmenes de agua demandados por el maíz, con diferentes escenarios de cambio climático, se analizan dos casos específicos:

- Período de máximas demandas
- Ciclo vegetativo completo del maíz

Ambos casos se comparan contra el escenario actual, suponiendo que toda el área bajo riego del valle del Yaqui está cubierta por maíz.

En la figura 9 y el tabla 4 podrán observarse los volúmenes de agua requeridos por el maíz, en el período punta (agosto), para los diferentes escenarios.

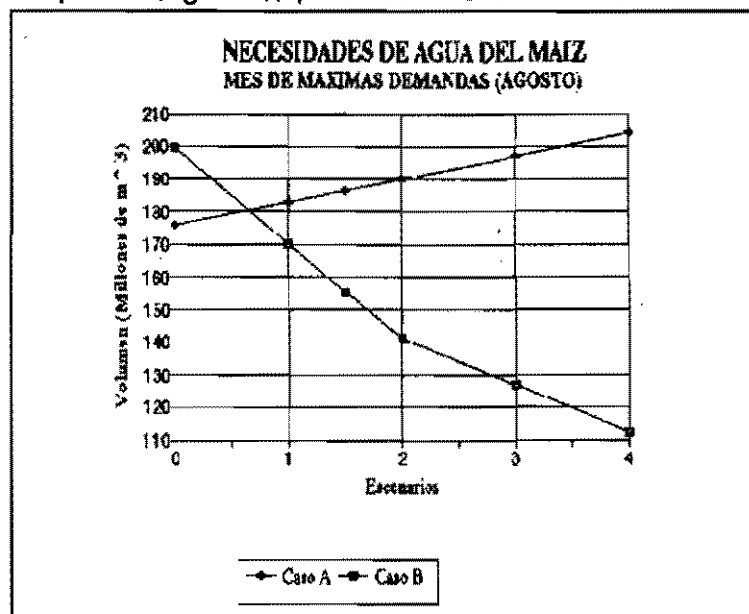


Fig. 9 Volúmenes de agua requeridos en diferentes escenarios de cambio climático

4. Volúmenes de agua requeridos en los diversos escenarios

Escenario	Mes	Area(ha)	Vol(Mm ³) Caso A	(%)	Vol(Mm ³) Caso B	(%)
Cero	Agosto	220 000	176.044	0	199.254	0
D(1)	Agosto	220 000	182.930	3.76	170.192	14.58
C(1.5)	Agosto	220 000	186.384	5.54	155.650	21.88
B(2)	Agosto	220 000	189.860	7.27	141.108	29.18
A(3)	Agosto	220 000	196.878	10.58	126.588	36.46
A BIS (4)	Agosto	220 000	203.962	13.68	112.046	43.76

Podrá notarse que existe una diferencia de 13.68% aproximadamente, entre el volumen de agua demandado por el maíz en el período punta para el escenario cero, respecto a los escenarios críticos (A BIS). Lo anterior implica una diferencia de 27 918 000 m³ de agua entre el escenario actual (escenario cero) y el escenario crítico (A BIS). El volumen anterior representa el 3.3% de la capacidad total de la presa la Angostura, la cual posee un volumen total de 864, 000 000 metros cúbicos. En la figura 10 y el tabla 5 podrán observarse los volúmenes demandados por el maíz en su ciclo vegetativo completo, es decir, desde su plantación hasta su cosecha.

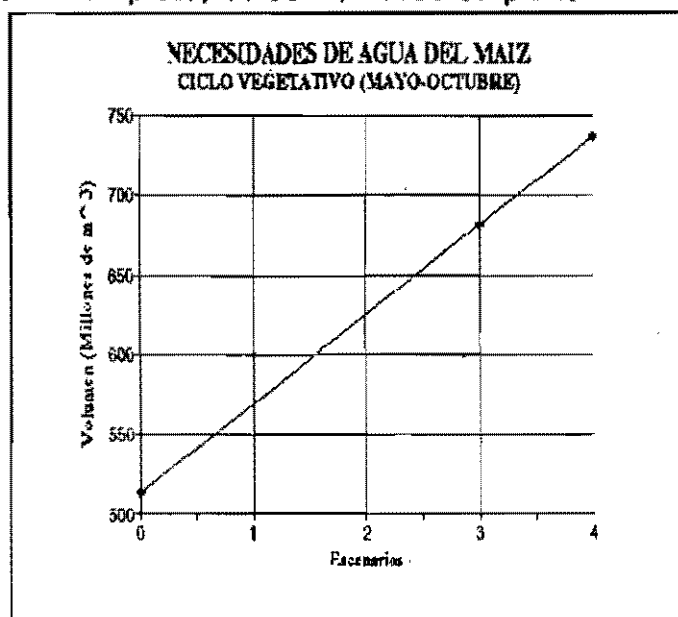


Fig. 10 Volumen de agua requerido por el maíz en todo su ciclo vegetativo

5. Volúmenes de agua requeridos en los escenarios críticos

Escenario	Mes	Area (ha)	Volumen (m ³)	(%)
Cero	Ciclo completo	220 000	513 634 880	0
A(3)	Ciclo completo	220 000	681 054 000	24.58
A BIS (4)	Ciclo completo	220 000	735 829 160	30.19

Estos volúmenes se obtuvieron sumando los balances hídricos de cada mes en el período vegetativo del maíz, el resultado de esta suma se multiplicó por la superficie sembrada, para obtener el volumen demandado en todo el ciclo.

La diferencia en volúmenes de agua demandados por el maíz entre el escenario actual (cero) y el escenario A(3) es de 167 000 000 m³, que representa el 19.40% de capacidad de la presa la Angostura.

Estos volúmenes deficitarios de agua deberán estar disponibles en las presas del distrito, en caso de presentarse escenarios de cambio climático, como los que aquí se han analizado.

Si se presentaran condiciones de cambio climático como las del escenario A BIS(4), el volumen de agua necesario, para satisfacer la demanda del maíz en todo su ciclo vegetativo podría ser de 30.19% de la capacidad de la presa la Angostura, es decir, 222 000 000 m³ de agua más, respecto al escenario actual, mostrado en el tabla 5.

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En cálculos con el modelo de radiación modificado, propuesto en éste trabajo, realizados para el maíz en el valle del Yaqui, se desprende que se podrían tener incrementos en la evapotranspiración potencial *Eto* y en la evapotranspiración real *Etr* de hasta en un 14%, para los escenarios críticos analizados, lo que significa mayores requerimientos de agua, en una zona en la que de por sí, este líquido vital es escaso. Este incremento en la evapotranspiración potencial *Eto* y real *Etr* del maíz en los **escenarios críticos aquí analizados, eleva a su vez de manera proporcional los volúmenes de agua necesarios, para mantener al maíz con un adecuado balance hídrico y evitar el riesgo de *stress vegetativo*. Si no se disponen de los volúmenes necesarios o no se atienden los cambios de calendarización del riego (frecuencias), la producción agrícola, sobre todo granos y cereales, podría decrecer.**

En cuanto a las condiciones de humedad del suelo, este tendrá un déficit en los escenarios críticos de hasta un catorce por ciento. Se realizó el análisis de condiciones de humedad del suelo para dos casos específicos: *periodo de máximas demandas* (agosto) y *ciclo vegetativo completo del maíz* (mayo a octubre), bajo la hipótesis de que todo el área bajo riego en el valle del Yaqui, está sembrado con maíz. Se obtuvieron los siguientes resultados:

○ Período de máximas demandas (agosto)

Se necesitará un volumen de agua deficitario de aproximadamente 3.3% de la capacidad de la presa la Angostura, lo que representa un volumen de 27 918 000 m³, en el escenario crítico.

○ Ciclo vegetativo completo

Se necesitará de un volumen de agua deficitario de aproximadamente 30.2% de la capacidad de la presa la Angostura, lo que representa un volumen en el escenario crítico (A BIS) de entre 222 000 000 m³. En los resultados anteriores solo se ha considerado *Eto* y *Etr*, sin embargo cuando se distribuye el agua a nivel de distrito de riego, se tiene generalmente una eficiencia de distribución muy baja ($40\% < E_f < 60\%$), lo que podría incrementar los volúmenes deficitarios aquí calculados.

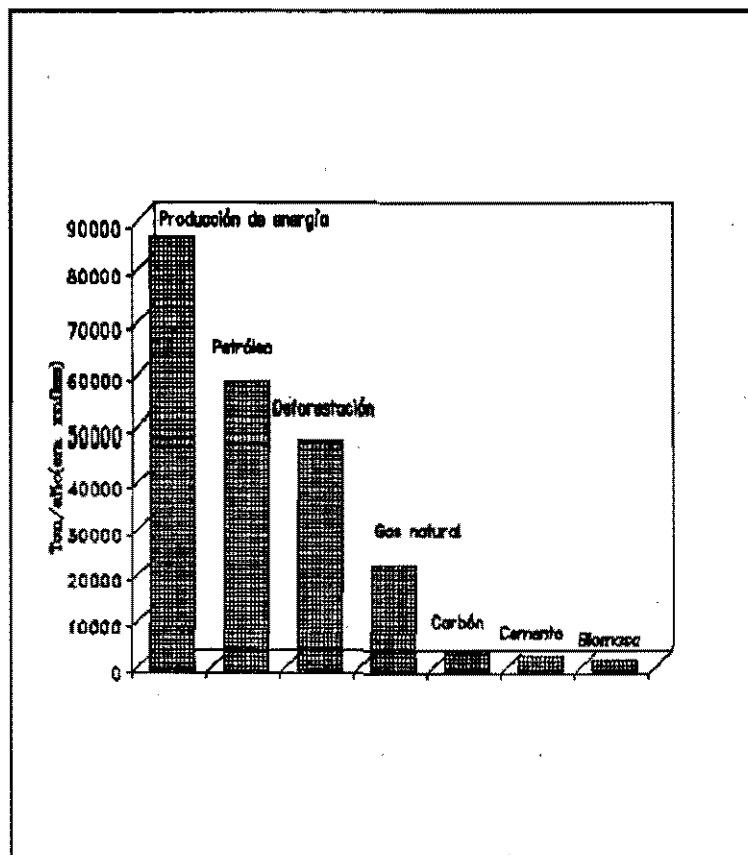
Estos resultados justifican la necesidad de realizar estudios más profundos y continuar con esta línea de investigación. En este estudio no se tomó en consideración (por falta de datos) la influencia que podría tener el mar de Cortés en los resultados obtenidos. Es importante aclarar que este método no considera los efectos dinámicos y biológicos del incremento de *CO₂* en la atmósfera.

Finalmente ante las perspectivas antes descritas en las siguientes páginas se plantean algunas propuestas y líneas de investigación.

Algunas líneas de investigación

1. Implementación de programas para el estudio de otras fuentes alternativas de energía, como: energía solar, eólica y nuclear.
2. Investigaciones que conduzcan a nuevas formas de reducción de emisión de contaminantes en la industria y estudios de difusión de los mismos en la atmósfera.
3. Experimentación con nuevas variedades de cultivos para una mejor adaptación y desarrollo en sequías, resistencia a plagas, salinidad y condiciones extremas.
4. Investigaciones sobre el comportamiento de nuevas condiciones de humedad, evapotranspiración y necesidades hídricas de los cultivos, especialmente en el norte de la República Mexicana, ante la posibilidad de cambio climático con diferentes escenarios.
5. Estudios sobre la factibilidad de desarrollo de nuevas plagas y enfermedades de cultivos.
6. Investigaciones sobre nuevos programas y planes de riego en condiciones de déficit hídrico.
7. Simulación biológica de cultivos ante cambio climático
8. Planes de adiestramiento y administración del agua.
9. Realizar análisis cuidadosos de la variación de la temperatura y precipitación en las últimas décadas, para establecer tendencias en el cambio climático a nivel regional.
10. Sistemas de advertencia sobre ciclones.
11. Continuar mejorando nuevas herramientas de pronóstico y cálculo de tormentas tropicales e inundaciones, e iniciar estudios de operación de sistemas de presas durante avenidas.
12. Intercambio de información con organismos internacionales que estudian el cambio climático.
13. Reforestación y conservación de bosques y selvas.

La deforestación contribuye con el 35% de las emisiones totales de bióxido de carbono en México, es decir un promedio aproximado de 45 500 toneladas por año (figura 10.a).



10.a Emisión de bióxido de carbono a la atmósfera

Por lo cual es necesario:

- Un plan nacional rector de forestación intensiva.
- Evitar en lo posible la ganadería de tipo extensivo, sobre todo en los límites de bosque tropicales y selvas.
- Evitar asentamientos humanos en zonas boscosas y selvas, y en los que ya exista establecer planes de desarrollo para integrar a la población al medio ambiente en que vive y evitar su degradación.
- Mayor control sobre empresas nacionales e internacionales, para evitar la sobreexplotación de madera y de recursos del suelo y subsuelo de bosques y selvas.
- Limitación a proyectos que pongan en riesgo a la ecología.
- Planes para el control de incendios forestales naturales o provocados, que destruyen cada año miles de hectáreas de bosques en México.

Nuevamente la energía solar fotovoltaica podría proporcionar una solución factible, estableciendo puntos estratégicos con sistemas de bombeo de pozos, alimentados por energía solar fotovoltaica y dar autonomía a los mismos.

Sugerencias para el control de emisiones de gases de invernadero

En el uso de la energía.

México emite aproximadamente 87500 toneladas de bióxido de carbono al año, que representa el 63% de las emisiones totales de este gas, debido a la producción y uso de energía (figura 10.b), (Macera, 1991).

1. Algunos estudios hechos en los Estados Unidos sugieren que, se puede reducir la emisión de bióxido de carbono a la atmósfera hasta en un 25% a mediano plazo sin costos tan elevados, como los críticos del recalentamiento global suponen. Eliminar los subsidios que los gobiernos ofrecen en el uso de combustibles fósiles, para tender a costos reales que además reflejen el daño potencial a la ecología.

2. Pago de impuestos a industrias contaminantes que no acaten los reglamentos sobre emisiones al medio ambiente, que reflejen de algún modo el daño ecológico.

3. Tan solo en la ciudad de México se consumen en promedio 20 millones de litros de combustible diarios (automóviles), en una ciudad en la que existen 2.5 millones de autos.

La adopción de tecnología nueva (convertidores catalíticos) y la reducción de consumo de combustible por automóvil es una opción para el uso eficiente de este tipo de energía.

Existen pruebas de consumo de combustible hasta de la tercera parte del promedio actual por automóvil en los Estados Unidos, la adopción de este tipo de tecnología se justifica dado el beneficio esperado.

4. El cambio de uso de bombillas incandescentes al vacío, por bombillas fluorescentes es una opción para ahorrar energía en el área doméstica.

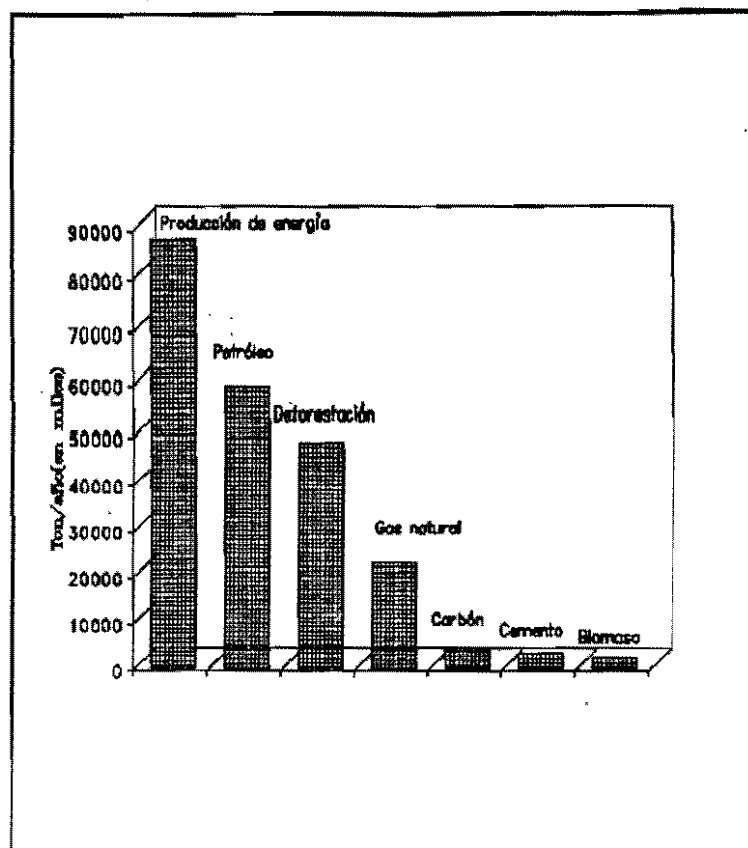
El promedio de uso en Watts de las primeras es de 60, a 20 Watts de las segundas (además que se consigue una mejor iluminación).

Aunque la inversión inicial (en cuanto al costo de las lámparas fluorescentes) es superior, se amortiza con el tiempo.

5. La adopción de tecnología nueva en refrigeración comercial, industrial y doméstica, presenta también una buena opción de baja emisión de CFC.

Existen en el mercado norteamericano aparatos de refrigeración que no utilizan CFC.

6. Cambio gradual hacia el uso de otras fuentes de energía.



10.b Emisión de gases y actividades que contribuyen al efecto de invernadero en México

México es potencialmente adecuado para el uso de dos fuentes alternativas de energía, que en relación a otras son menos dañinas al medio ambiente: la energía solar y la eólica.

7. Energía solar

Gracias a su latitud geográfica, nuestro país podría beneficiarse con un cambio gradual al uso de la energía solar fotovoltaica.

Este tipo de energía no aprovechada en nuestro país, más que por sus limitaciones técnicas (pocas) o económicas en la actualidad, su uso a futuro dependerá en mayor medida de la disponibilidad (o indisponibilidad) del petróleo, gas u otras fuentes de energía, comunes ahora.

Este tipo de energía tiene una diversidad de posibles aplicaciones, que deberíamos de empezar a tener en cuenta en México, ya que algunas de ellas se están aplicando actualmente en otros países, reduciendo de este modo su dependencia de otras fuentes de energía dañinas al medio.

7.1 Electrificación rural

El alto costo de instalación de redes convencionales en poblaciones rurales semiaisladas (o aisladas) por la topografía o situación económica, ofrece una buena opción para el uso de energía solar fotovoltaica que, a partir de los 70s, la simplificación de partes y reducción de costos en este tipo de tecnologías, culminaron en nuevos materiales, que abarataron significativamente las células solares y demás componentes del generador fotovoltaico, que las han hecho más competitivas con el uso de sistemas de generación comunes.

7.2 En el área agrícola y ganadera

El sistema de electrificación solar fotovoltaica en granjas ganaderas, ofrece una buena opción para la implementación de este tipo de energía.

En zonas agrícolas bajo riego, este tipo de energía es ideal para la alimentación de sistemas de bombeo y riego (goteo, aspersión, etc).

Por ejemplo en Nebraska U.S.A, existe un sistema solar fotovoltaico, capaz de alimentar un sistema de riego diseñado para 33 hectáreas, con una potencia de 25 kw (Marcombo, 1986).

7.3 En la industria

El sector industrial consume más del 50% de la electricidad producida en México. Durante 1980 por ejemplo, cada industria consumió en promedio el equivalente a 800 viviendas, que corresponde a la energía utilizada para una población de 5000 habitantes aproximadamente.

Estos datos justifican el impulso del uso de energía solar en este ramo.

En aquellas industrias en donde el consumo es continuo, la energía solar fotovoltaica ofrece mejores expectativas, por ejemplo, en la industria metalúrgica, para la obtención de cobre y aluminio.

En la Universidad Central de Chile, existen 44 paneles fotovoltaicos experimentales que proporcionan energía para la obtención de cobre (Marcombo, 1986).

7.4 Centrales fotovoltaicas

Aunque hace poco tiempo era una idea poco realista, en la actualidad ha tomado el enfoque contrario, a partir del alto costo de las centrales hidroeléctricas, térmicas y nucleares y el tiempo de ejecución de las mismas.

Plantas fotovoltaicas que podrían generar hasta 10 MW, podrían ser una opción para la generación de energía eléctrica futura en México y la sustitución progresiva de las termoeléctricas. Las de baja potencia (100 a 500 KW) ya son frecuentes en el mundo.

En California U.S.A existe una en funcionamiento y genera 1 MW desde 1982, el tiempo de ejecución de la obra fue de seis meses (Marcombo, 1986).

En 1986 existió un proyecto en los Estados Unidos de una central fotovoltaica que generaría 16 MW.

8. El uso, almacenamiento y trasvase de petróleo genera contaminación atmosférica por la liberación de diversos gases, principalmente bióxido de carbono, representa el 62% de las emisiones totales al año en nuestro país, es decir, 87 500 toneladas de este gas al año (Macera, 1991).

La sustitución gradual de este combustible (que en un futuro no muy lejano se agotará) por gas natural y energía solar fotovoltaica, es una buena medida para la reducción en la emisión de bióxido de carbono y otros gases.

APENDICE A

Análisis de las principales variables que intervienen en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, disponibilidad de agua y evapotranspiración

Enseguida se presenta el análisis cualitativo y cuantitativo de las principales variables que intervienen en la determinación de las necesidades de riego de los cultivos, disponibilidad de agua y régimen de humedad de suelo ante diversos escenarios de cambio climático e incrementos de temperatura.

Temperatura

Es la esencia del clima y depende de la radiación que penetra a la atmósfera terrestre y se queda en ella.

Es uno de los elementos climáticos más importantes que condiciona el desarrollo de las plantas, la humedad del ambiente, los patrones de precipitación, los vientos y la evapotranspiración, fundamentalmente.

Es un factor determinante en la evapotranspiración de los cultivos; por ejemplo, para las mismas condiciones climáticas (humedad relativa, viento, presión de vapor, etc) y un aumento de 2 a 3°C en la temperatura media de una zona determinada, puede cambiar el valor de la evapotranspiración real hasta en un 15 por ciento.

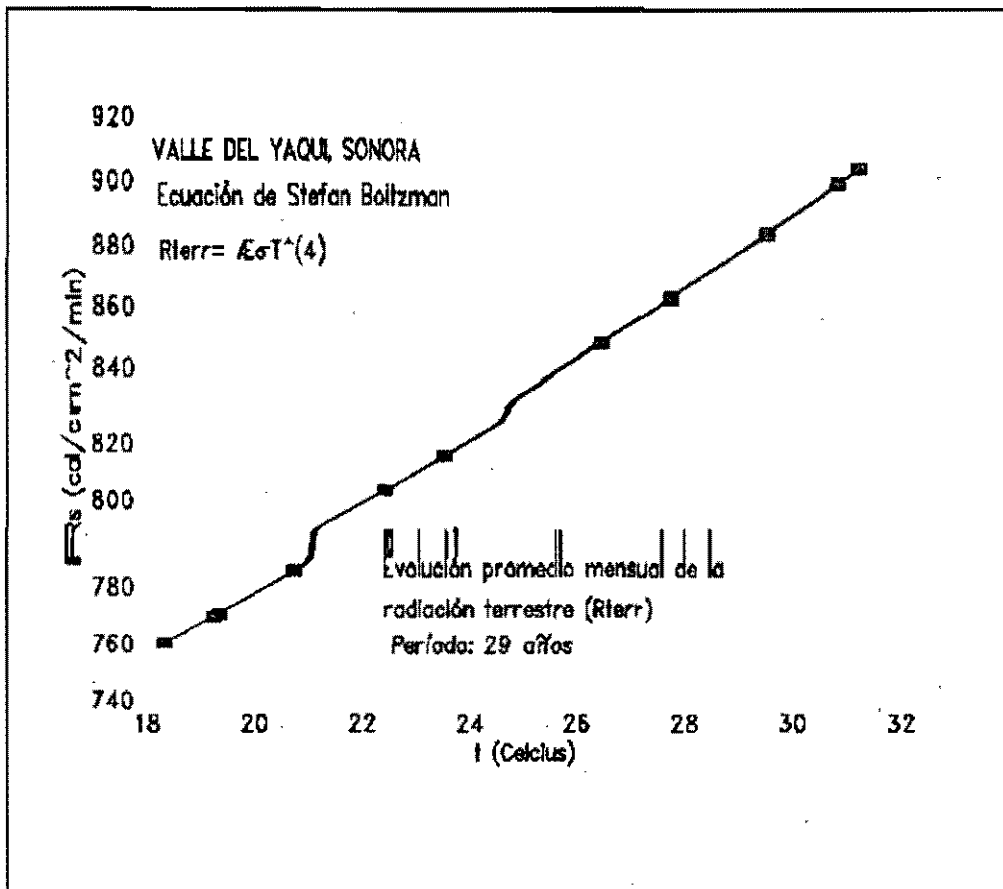
Una de las razones fundamentales para aplicar un modelo de radiación en la predicción de las necesidades de agua de los cultivos ante escenarios de cambio climático, es que el intercambio calorífico entre el aire atmosférico y el medio ambiente ocurre por radiación, que a su vez condiciona la evapotranspiración de las plantas y los niveles de temperatura ambiental y del suelo.

Para el caso particular en estudio, interesan dos tipos de temperatura, según la ecuación 24:

T_{ambiente}

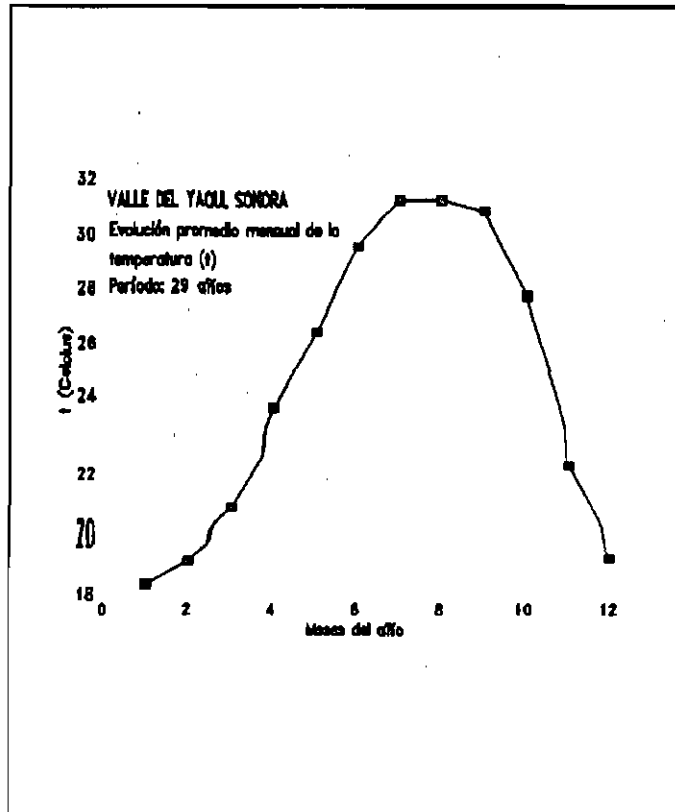
T_{suelo}

Los niveles de temperatura del suelo y medio ambiente influyen directamente en el balance de radiación terrestre, como se muestra en la figura 11, y este, a su vez, en las necesidades de agua de los cultivos y condiciones de humedad del suelo.



11. Influencia de la temperatura en la radiación

El valle del Yaqui tiene una abundante insolación durante casi todo el año y se registran temperaturas elevadas en los meses de junio a agosto principalmente. En la figura 12 se puede ver la evolución de la temperatura en un período de treinta años. En general, a mayor temperatura, para las mismas condiciones de las otras variables climáticas, mayor evapotranspiración.



12. Evolución mensual de la temperatura en un período de 30 años

Humedad relativa

La cantidad de humedad que contiene el medio ambiente en un sitio y a una temperatura determinada, con relación a la cantidad de vapor que a dicha temperatura el medio puede contener, se denomina humedad relativa:

$$hr = \frac{mv}{MV} \dots (27)$$

donde:

hr = humedad relativa (%)

mv = masa de vapor (a una temperatura determinada)

MV = máxima masa de vapor (que podría contener a la misma temperatura)

Generalmente se expresa en forma porcentual a través de la presión de vapor (Jromov, 1983):

$$hr = \frac{e}{E} * 100 \dots (28)$$

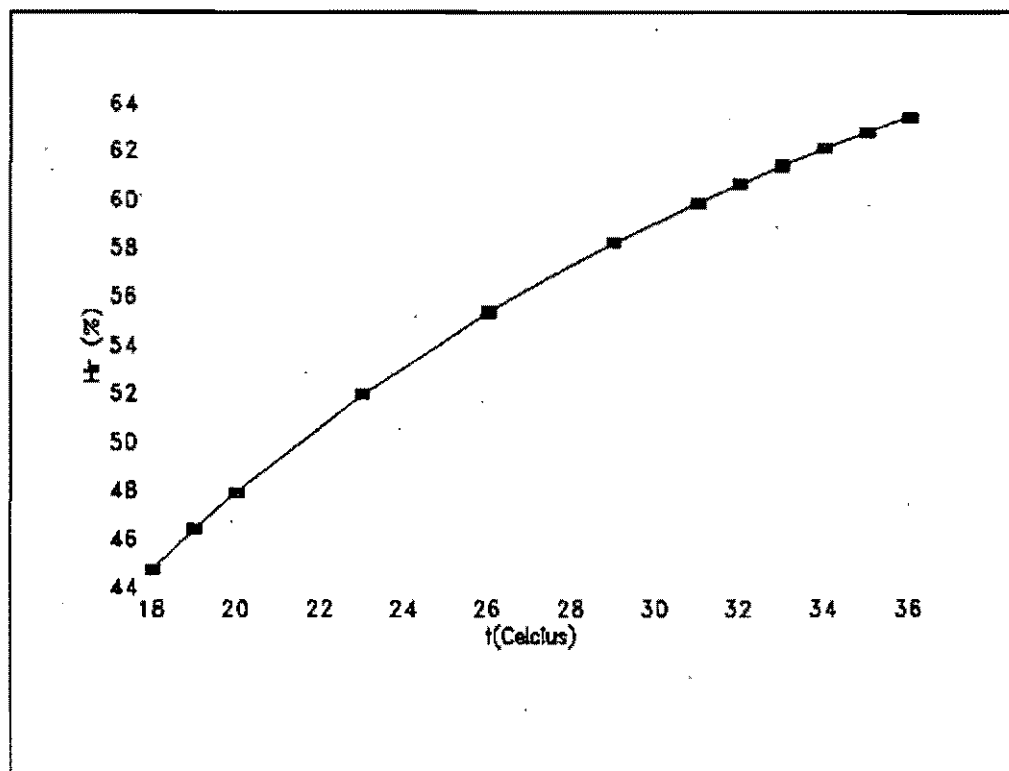
donde:

e = presión real de vapor de agua (mmHg)

E = presión de vapor a saturación (mmHg)

Debe notarse que las variaciones de la humedad relativa dependen, entre otros factores, de las variaciones de temperatura y presión de vapor, principalmente.

La figura 13 muestra la variación de la humedad relativa con el incremento de la temperatura.



13. Variación de la humedad relativa con la temperatura

Con la expresión (29) también se puede calcular la humedad relativa:

$$h_r = \frac{E' - cp(t - t')}{E} * 100 \dots (29)$$

donde:

e = presión real de vapor (mmHg)

E = presión de vapor, bulbo seco (mmHg)

E' = presión de vapor a saturación, bulbo húmedo (mmHg)

c = constante psicométrica

p = presión atmosférica del lugar (mmHg)

t = temperatura, bulbo seco

t' = temperatura, bulbo húmedo.

Si:

$$t - t' = \Delta t$$

Entonces la ecuación (29) se puede reescribir como:

$$hr = \frac{E' - cp(\Delta t)}{E} * 100 \dots (30)$$

Si la humedad relativa aumenta podría ser un factor climático mitigante, de las condiciones de evapotranspiración de los cultivos, ante escenarios de cambio climático.

Presión de vapor

La cantidad de vapor de agua contenida en el aire posee una presión. Se designa con la letra E si es la presión de vapor máxima y con e la presión de vapor real. Ambas presiones dependen de la temperatura (como parámetro principal) y se pueden calcular con (Torres, 1984):

$$e = E' - cp(t - t') \dots (31)$$

$$E=6.11*10^a \dots (32)$$

n se puede calcular con:

$$n=\frac{7.5t}{237.3t+t} \dots (33)$$

Ambas presiones E y e varían exponencialmente con la temperatura según se ve en la figura 14.

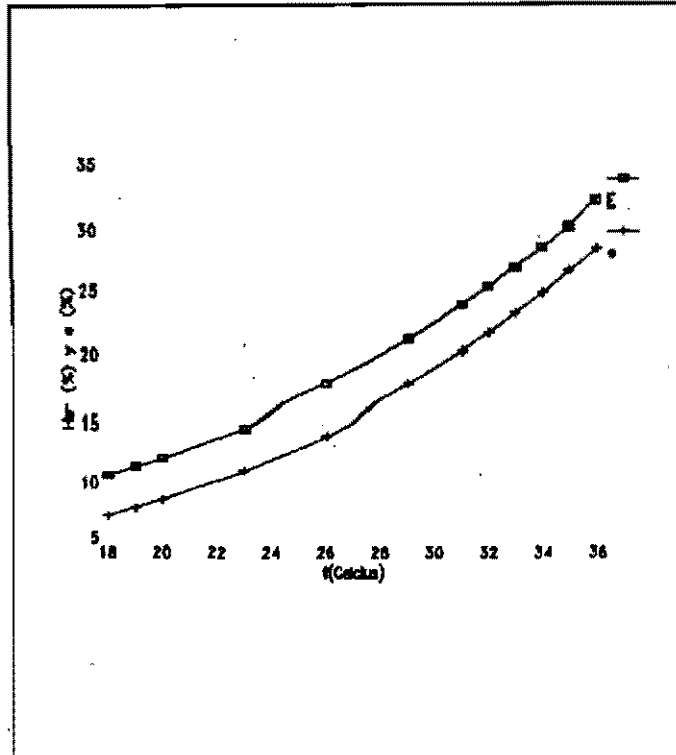
Aproximadamente la presión de vapor a saturación aumenta el doble por cada diez grados centígrados.

Cuanto más cálido es el aire, mayor será el contenido de vapor de agua, lo cual implica mayor tensión de vapor. Teóricamente si el aire fuera seco: $e=0$, si está totalmente saturado $e=E$.

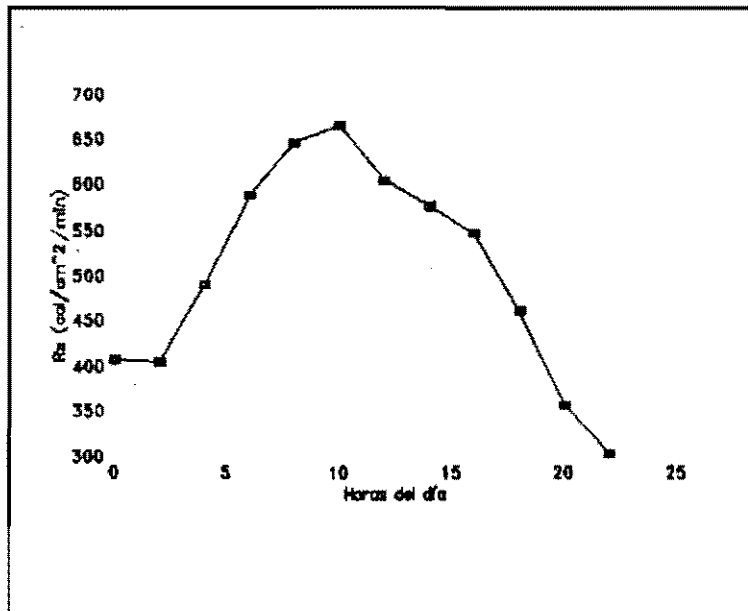
Esta variación exponencial de la presión actual de vapor e y presión de vapor a saturación E , tiene un efecto importante en nuestro estudio, ya que a mayor tensión de vapor, mayor humedad relativa; a mayor humedad relativa menor es el balance de la radiación terrestre, lo que repercute en una menor cantidad de agua evapotranspirada.

Radiación

En la figura 15 se presenta la evolución de la radiación solar R_s con la temperatura en un día de abundante insolación en el valle del Yaqui, y en la figura 16 se puede observar la evolución mensual de la misma, con datos medios en un periodo de treinta años.



14. Variación de la presión de saturación (E) y actual (e) con la temperatura



15. Evolución diaria de la radiación, Valle del Yaquí

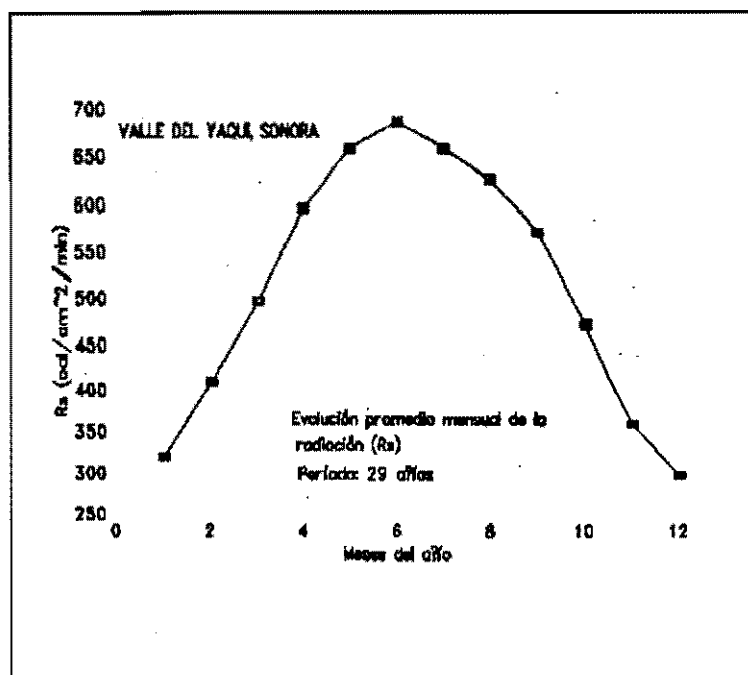


Fig. 16 Evolución de la radiación en un período de 30 años, Valle del Yaqui

Viento

La velocidad o intensidad del viento es un parámetro importante para efectos de cálculos de evapotranspiración potencial en cultivos agrícolas.

La velocidad del viento es importante, ya que a bajas velocidades facilita las heladas, en latitudes donde es común este fenómeno, lo que repercute en la producción.

Los vientos intensos pueden incluso destruir completamente los cultivos, al anular la floración o al arrancar por completo las plantas (Torres, 1984).

La intensidad del viento influye en la evapotranspiración de los cultivos, ésta última varía dependiendo de la intensidad de los vientos, como se plantea en las ecuaciones que van de la (2) a la (17), y de los niveles de humedad relativa del sitio en estudio; por ejemplo: para el valle del Yaqui, las variaciones de E_{to} para una $hr < 40\%$ y varios niveles de viento son como se representan en el cuadro 6 y la ilustración 17.

Cuando el viento es cálido y seco la evapotranspiración de los cultivos aumenta considerablemente, y si éste es prolongado, por ejemplo, por varios días, repercute en los índices de humedad del suelo, sometiendo los cultivos a un proceso de agotamiento (Torres, 1984).

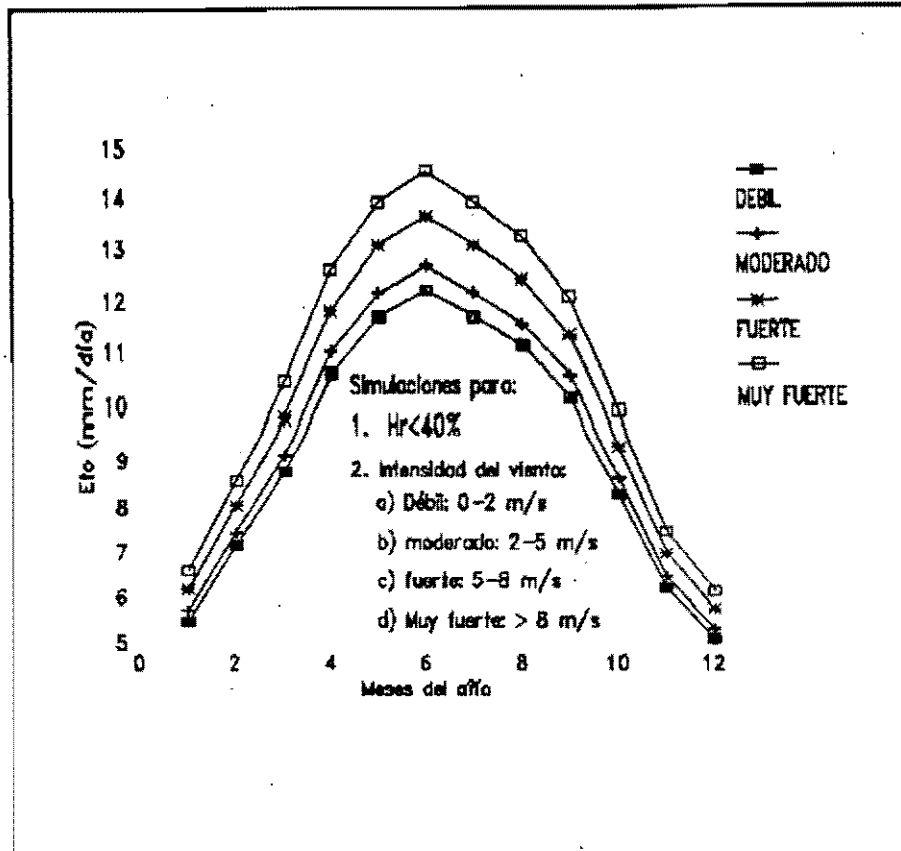


Fig. 17 Variaciones de Eto con distintas intensidades de viento

6. Variaciones de Eto con distintas intensidades de viento para maíz en el período punta, valle del Yaqui

Intensidad de viento	Eto(mm/mes)	% variación respecto a 1
Débiles	365.67	0
Moderados	380.10	4
Fuertes	408.30	11.70
Muy fuertes	434.70	18.90

Un escenario crítico de cambio climático, por ejemplo: el A o el B, podría provocar consecuencias negativas en la producción agrícola en cualquier latitud del mundo, bajo condiciones de baja humedad relativa y vientos cálidos, ya que sometería a las plantas y suelo a elevados índices de evapotranspiración y evaporación, respectivamente, lo que afectaría en gran medida las cosechas, especialmente en las zonas áridas y semiáridas, debido a los elevados niveles de radiación a que generalmente se encuentran expuestos durante todo el año.

6.6 Nubosidad

El grado de cobertura del cielo por las nubes se denomina nubosidad.

Este es también un elemento importante en el estudio de niveles de balance de radiación y evapotranspiración, ante escenarios de cambio climático.

Generalmente la nubosidad se expresa en décimas, de la cobertura del cielo por las nubes, aunque también puede ser expresada en octavos. Por ejemplo, en décimas la escala de medición va de 0.10 a 0.85; un cielo totalmente cubierto tiene una nubosidad de 0.85, si el cielo está totalmente despejado su nubosidad es de punto diez.

Generalmente las mediciones son subjetivas, ya que depende del observador a simple vista, aunque también existen instrumentos como el *espejo semiesférico convexo* que refleja todo el cielo y lo fotografía por arriba.

En condiciones de nubosidad alta (densa) los niveles de evapotranspiración disminuyen. Este factor varía en el tiempo, como se muestra en la ilustración 18 y se puede calcular de manera empírica con la siguiente ecuación (Ortiz, 1987):

$$NU = \frac{DD*0.1 + DMN*0.5 + DNC*0.85}{DTM} \dots (34)$$

donde:

NU = nubosidad

DD = días despejados (se considera el 10%)

DMN = días medio nublados (se considera el 50%)

DNC = días nublados cerrados (se considera el 85%)

DTM = días totales del mes

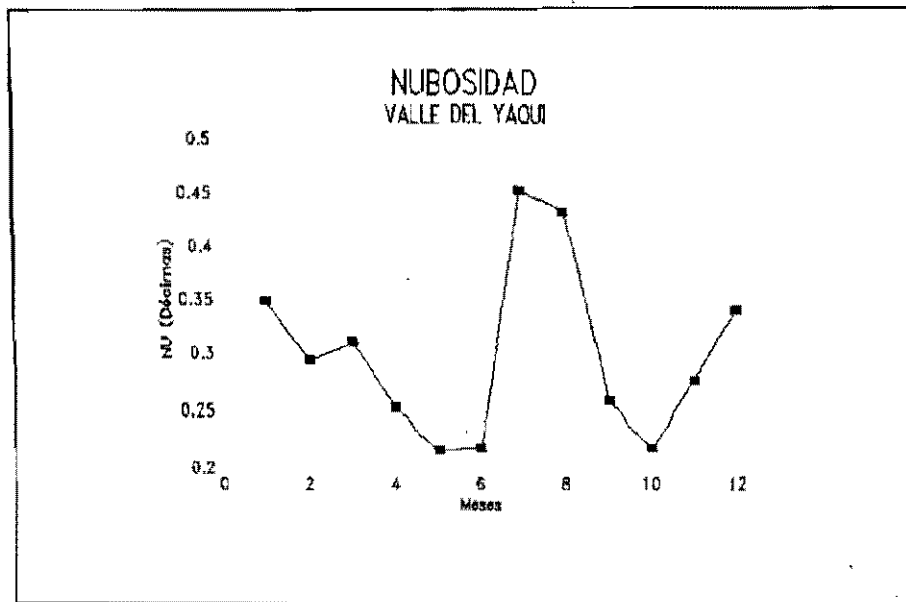


Fig.18 Variaciones de nubosidad (NU) promedio, para un período de 30 años

La variación de la nubosidad mensual en treinta años de registro en el valle del Yaqui, calculados con los datos del cuadro 7 y la ecuación (34) es la siguiente:

7. Nubosidad, valle del Yaqui, Sonora

MES	DD	DMN	DNC	DTM	NU
Enero	16.69	8.69	5.61	31	0.348
Febrero	16.74	7.14	3.47	28	0.293
Marzo	18.32	8.64	4.03	31	0.308
Abril	20.82	6.51	2.65	30	0.252
Mayo	23.83	5	2.16	31	0.216
Junio	22.58	5.72	1.68	30	0.218
Julio	9.37	15.27	6.34	31	0.450
Agosto	10.56	14.46	5.96	31	0.430
Septiembre	20.42	6.82	2.75	30	0.259
Octubre	23.44	5.66	1.88	31	0.218
Noviembre	19.76	6.68	3.56	30	0.278
Diciembre	18.07	7.48	5.44	30	0.339

Insolación y fotoperíodo

La insolación n es el número de horas que alumbra el sol durante el día y se puede medir directamente con el heliógrafo.

En los meses de mayor insolación el balance de radiación solar R_s aumenta, ya que esta última se relaciona con la primera como se plantea en la ecuación (24).

A mayor insolación, mayor es el balance de radiación R_s , por lo tanto se incrementan los índices evapotranspirativos de los cultivos.

En el caso del valle del Yaqui los niveles de insolación promedio anuales, que se pueden apreciar en la ilustración 19, aumentan en los meses de abril a octubre.

En términos generales, a mayor latitud mayor insolación (Torres, 1984) para una época del año dada. Ver ilustración 20.

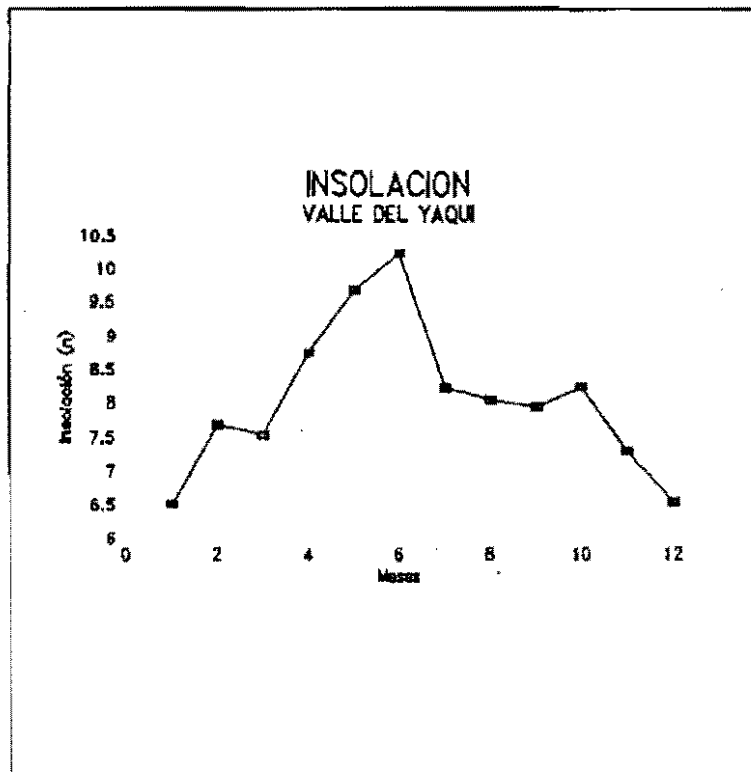


Fig. 19 Variaciones de la insolación (n) mensual, en un período de 30 años

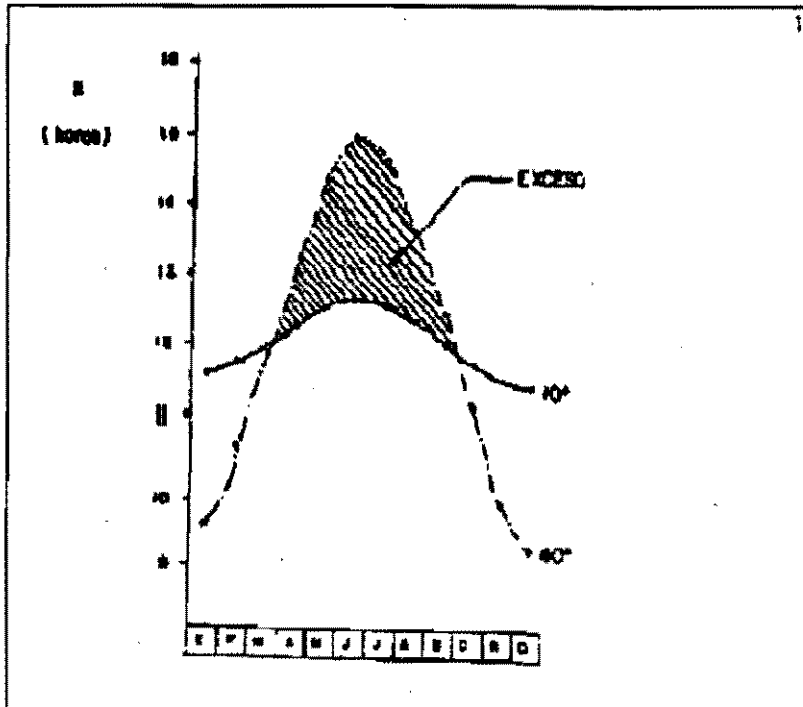


Fig. 20 Variaciones de la insolación (n) con la latitud

Este exceso de energía presentado en la ilustración 20 (área sombreada), influye en los niveles de balance de radiación R_s y aumenta la cantidad de agua evapotranspirada por los cultivos. Ver ilustración 21.

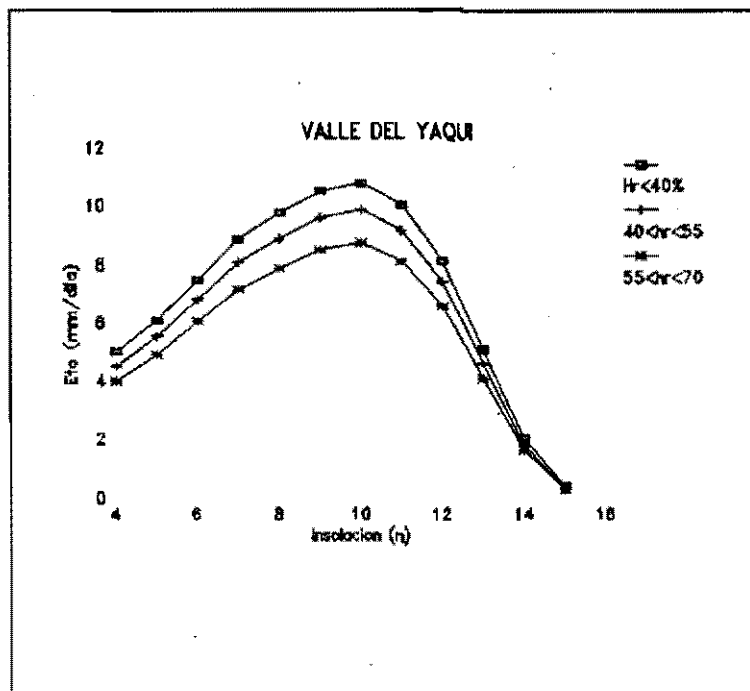


Fig. 21 Aumento de Eto con la insolación (n)

El fotoperiodo N es la duración astronómica de la insolación.

Este factor no toma en cuenta la intensidad de radiación, pero es muy importante en cuanto a su duración, ya que para ciertos cultivos como el trigo o soya, necesitan para su adecuado desarrollo vegetativo valores de N menores de 12 horas (plantas de fotoperíodo corto).

EL fotoperiodo N queda determinado por (Torres, 1984):

$$N = \frac{2w}{15} \dots (35)$$

$$\cos w = -\tan \beta \tan \mu \dots (36)$$

donde:

N = fotoperiodo

w = ángulo horario (de la salida del sol al medio día solar)

β = latitud geográfica

μ = declinación solar

Albedo y emisividad

La relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente se denomina albedo. Es una propiedad de reflexión de los cuerpos que se expresa en porcentaje, este varía en función del color y homogeneidad del cuerpo reflejante.

Por ejemplo, un espejo de plata tiene un valor de albedo de casi la unidad, sin embargo el maíz y el trigo poseen un albedo de 0.15 y 0.25 respectivamente (Torres, 1984). Esta propiedad de reflexión protege a los vegetales y cultivos contra el sobrecalentamiento y excesos de energía solar recibida.

El albedo varía también con la latitud, a mayor latitud mayor es el porcentaje de reflexión o albedo, ver ilustración 22, como resultado de la *menor altitud del sol sobre el horizonte*.

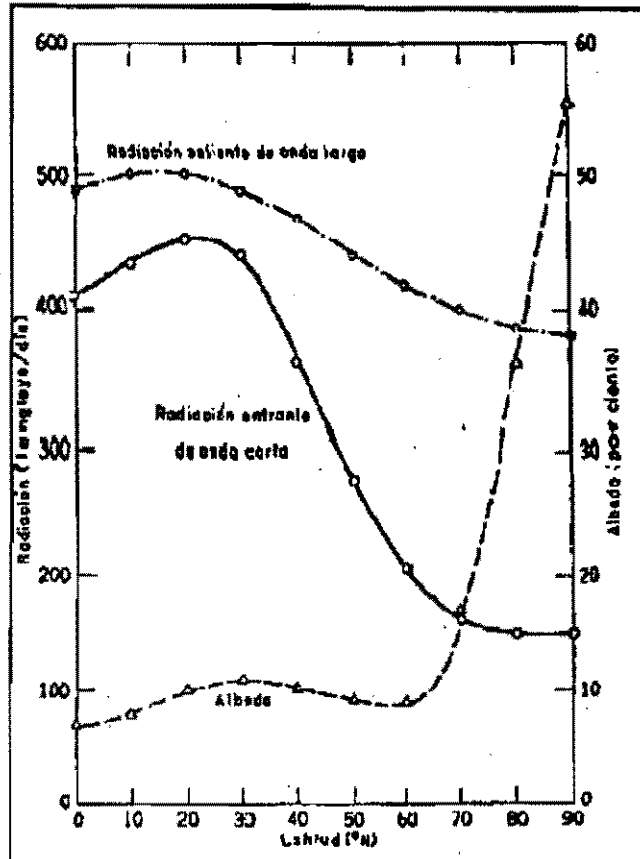


Fig. 22 Variación del albedo con la latitud

La emisividad ϵ es una propiedad que tienen los cuerpos de emitir energía del sol (calor), se fundamenta en el concepto de cuerpo negro.

Un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la energía recibida, es decir, tiene una emisividad ϵ de uno.

Por lo tanto, cada material tiene su propio coeficiente de emisividad ϵ .

Por ejemplo para el maíz y el trigo sus coeficientes son: 0.90 y 0.92 respectivamente (Torres, 1984).

Régimen térmico del suelo

La temperatura del suelo influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, en la actividad y crecimiento de raíces, en la disponibilidad de agua del suelo, por lo tanto afecta la producción de las mismas.

Se denomina régimen térmico del suelo al flujo e intercambio de calor que existe entre el mismo y el aire. El mayor porcentaje de radiación global entrante en atmósferas de climas áridos, se consume en calentar al suelo y al aire.

La temperatura de la superficie terrestre está en función del tipo de suelo, de su cubierta vegetal correspondiente y de la porción de la radiación global entrante a la atmósfera que no es reflejada, ni usada en evapotranspiración, ni emitida como radiación saliente.

Un resultado importante encontrado por Chang (Baver, 1980), es el siguiente: *la temperatura del suelo a diferentes profundidades en latitud de 20° N, es la misma en el ciclo estacional de verano.*

Sin embargo, la temperatura superficial del suelo posee una variación diaria y estacional.

En general, el mínimo se produce cuando no existe radiación solar (antes de salir el sol), su máximo es al mediodía y desciende con la puesta del sol.

Los cambios diarios de la temperatura del suelo no siempre son regulares, ya que se ven afectados por la nubosidad y la precipitación, entre los factores más importantes.

En términos generales la temperatura máxima del suelo es mayor que la del medio ambiente, ya que durante el día la radiación solar calienta primero al suelo y después éste calienta al aire; sin embargo las mínimas nocturnas del suelo son más bajas que las del aire.

En general para cálculos de radiación y E_{tr} la temperatura del suelo debería considerarse.

Precipitación efectiva

No toda la lluvia que cae al suelo es aprovechada por los cultivos. La precipitación efectiva es aquella que queda después de una lluvia, sustrayendo de ésta, la lluvia escurrida, la infiltrada y la evaporada.

Queda determinada por la siguiente ecuación (SCS, 1987):

$$Pe = P_t - (P_{es} + P_i + P_{ev}) \dots (37)$$

donde:

Pe = precipitación efectiva (mm)

P_t = precipitación total (mm)

P_{es} = precipitación escurrida (del área de interés, mm)

P_i = precipitación infiltrada (fuera de la rizósfera, mm)

P_{ev} = precipitación evaporada (mm)

Para el caso en estudio (valle del Yaqui), dicha región se encuentra ubicada en una zona semiárida, por lo que la precipitación infiltrada P_i en estas zonas profundizan muy poco (no rebasa la rizósfera), por lo tanto se desprecia de la ecuación (37).

De igual forma se desprecia la parte de la precipitación evaporada P_{ev} , dado que, parte de energía o calor disponible, se utiliza para la evaporación del agua en la superficie de las plantas o del terreno, por lo que se reduce la evapotranspiración de manera proporcional.

De tal forma que la ecuación (37) queda como:

$$P_e = P_t - P_{es} \dots (38)$$

El Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de América (SCS, 1987) propone la siguiente ecuación para calcular P_e :

$$P_e = f(1.252474 P_t^{.82416} - 2.935224) 10^{-.00095uc} \dots (39)$$

donde:

P_e = precipitación efectiva (mm)

$f = 0.531747 + 0.011621 D - 0.000089 D^2 + 0.00000023 D^3$

D = capacidad de almacenamiento (mm)

P_t = precipitación total (mm)

Uc = uso consuntivo o evapotranspiración mensual (Etr)

La capacidad de almacenamiento se calcula con:

$$D = \frac{CC - PMP}{100} Pr Da \dots (40)$$

donde:

CC = capacidad de campo

PMP = punto de marchitamiento permanente

Pr = profundidad radicular

Da = densidad aparente del suelo

Humedad del suelo

El riego depende de los niveles de humedad de suelo como se observa en la ilustración 23.

Cambios de humedad del suelo con cultivo y sin cultivo:

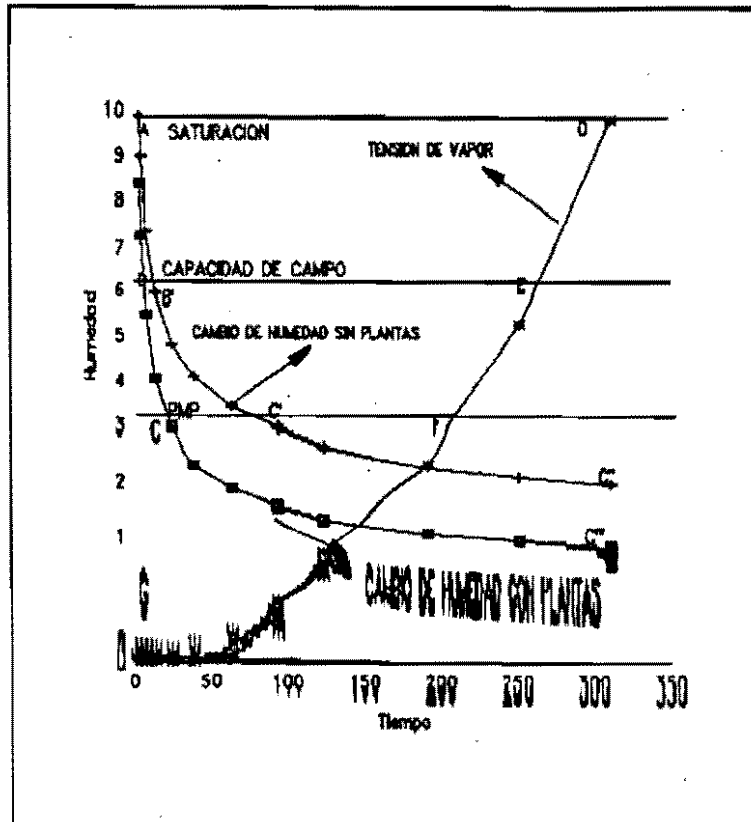


Fig. 23 Disponibilidad de agua en el suelo

Punto A

El suelo está saturado con la máxima cantidad de agua, inmediatamente después del riego (instantes antes de que empiece a drenar). Para esa saturación la presión de vapor será también máxima (punto D).

Punto B

El agua empieza a drenar por gravedad, si no existe cultivo sobre el suelo la humedad se comportará como la curva $AC'C''$. Por el contrario, con cultivo, la humedad se comportará como la curva $ABCC''$.

Después del drenaje la cantidad máxima de agua retenida por el suelo en contra de la acción de las fuerzas de gravedad, se denomina capacidad de campo punto B.

Se puede observar que la tensión o presión de vapor varía muy poco a capacidad de campo (Kramer, 1974) (Thorne y Paterson, 1981) punto E.

La razón fundamental de que la curva $ABCC''$ desciende más rápidamente que la $AC'C''$ es que, parte del agua del suelo es usada por las plantas para su proceso evapotranspirativo.

Punto C

Las plantas siguen usando el agua disponible para sus funciones biológicas y de evapotranspiración, por lo que pronto, si no se restituye el agua perdida (lluvia o riego), ésta llegará al punto de marchitamiento permanente PMP .

Aún en estado de PMP las plantas siguen usando la poca agua disponible curva CC'' , aunque ya no se recuperarán de su marchitez.

En este punto es importante hacer notar que, la presión o tensión de vapor decrece rápidamente curva *FG*.

Es claro que la condición de humedad del suelo varía con la temperatura, régimen térmico del suelo, riego o lluvia, humedad del aire, radiación solar, viento, etc., variables importantes que ya han sido estudiadas en éste trabajo.

La cantidad de agua disponible para las plantas o humedad aprovechable se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. La cantidad de agua se reduce a medida que aumenta la temperatura del suelo.

Por ejemplo: la humedad aprovechable para el maíz será:

$$Ha = \frac{CC - PMP}{100} Da Pr \dots (41)$$

Una forma de determinar la cantidad de agua disponible para las plantas, poniendo como ejemplo el tipo de suelo arcilloso de buena parte de la superficie del valle del Yaqui es:

suelo = arcilla

CC = 37% (0.1 atmósferas de tensión hídrica)

PMP = 17% (15 atmósferas de tensión hídrica)

La lámina de agua a reponer en el suelo por efecto de incrementos de temperatura es:

$$Lr = \frac{CC - PMP}{100} * Da * Pr \dots (42)$$

donde:

Lr = lámina de riego a reponer

CC = capacidad de campo

PMP = punto de marchitamiento permanente

Da = densidad aparente

Pr = profundidad radicular

Balance hídrico

El concepto de más importancia para definir cuándo y cuánto regar, es el balance hídrico.

Este concepto define el estado o balance de agua del suelo, y queda determinado por la evapotranspiración real de los cultivos, la precipitación efectiva y el agua aportada al suelo, mediante la siguiente ecuación (SCS, 1987):

$$Bh = E_{tr} - (P_e + A_a) \dots (43)$$

donde:

Bh = balance hídrico (mm)

E_{tr} = evapotranspiración real (mm)

P_e = precipitación efectiva (mm)

A_a = agua aportada por riego (mm)

El primer término de la ecuación (43) son pérdidas y el segundo son ganancias de agua por el suelo.

De tal forma que, si Bh es negativo, el valor calculado se considerará como agua para el siguiente mes; por el contrario, si Bh es positivo el valor calculado es el déficit de agua del suelo que habrá que reponer mediante el riego.

Debe notarse que para ciertas condiciones de las variables climáticas, ante escenarios críticos de cambio climático (baja humedad relativa, baja nubosidad, incremento de temperatura y elevados índices de radiación) el déficit de agua de un suelo podría ser elevado y agotar los cultivos, sobre todo en zonas áridas, donde el recurso agua es limitado.

Por ejemplo, citando la zona de interés de este estudio, el Valle del Yaqui (considerada como zona árida), si se conjugan niveles elevados de temperatura, bajos índices de nubosidad y humedad relativa y una disminución de la precipitación en la región, por efectos de cambio climático en cualquiera de los cuatro escenarios manejados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de la ONU, los efectos de déficit hídrico podrían ser importantes, ya que la *disponibilidad de agua en el suelo* se reduciría drásticamente y los índices evapotranspirativos se elevarían, sobre todo en los escenarios críticos manejados en este trabajo, ya que los niveles de E_{tr} (pérdidas) de la ecuación (43) crecerían y las ganancias disminuirían P_e , A_c .

APENDICE B

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS (ESCENARIO CERO), SU RELACION CON LA TENDENCIA GLOBAL Y SUS EFECTOS EN LOS RECURSOS HIDRICOS Y LA PRODUCCION AGRICOLA DEL VALLE DEL YAQUI, SONORA

Los cambios climáticos globales actualmente reconocidos han provocado daños en las diferentes actividades del hombre, particularmente en la agricultura. Inundaciones, sequías, olas de calor, incremento en la incidencia de huracanes, incendios, son algunas de las consecuencias de la variación local, regional o global del clima.

El *niño* que junto al fenómeno de oscilación del sur (fenos) son los mejores ejemplos de lo anteriormente afirmado. En el caso del *fenos*, este ha provocado severos daños en algunas zonas de la tierra y beneficio en otras, ya que su alcance es global (Acosta, 1988). El *fenos* modifica los patrones de precipitación de algunas zonas del planeta (lluvias torrenciales o sequías intensas), cuyos efectos se recienten inmediateamente en la agricultura. El *fenos* de 1982-1983 ha sido uno de los más intensos registrados hasta ahora y tuvo efectos severos en algunas partes del planeta (Llunch et al, 1992).

La escasez de lluvia, el decremento en los niveles de las presas, el incremento en la evapotranspiración de los cultivos y la deficiencia en la humedad del suelo, preocupa y angustia a un sector importante de la población cuya actividad económica depende de la agricultura. Por la razón anterior es necesario prever -en la medida de lo posible- los efectos del clima cambiante, en una actividad tan primordial como lo es la agricultura. En este marco es necesario analizar el comportamiento local y regional del clima (con los datos disponibles), su relación con la tendencia global del clima y sus efectos reales en los recursos hídricos y la producción agrícola del Valle del Yaqui, Sonora.

El estudio que a continuación se presenta se divide en cuatro partes:

- 1) Análisis de la tendencia global de temperatura y su relación e influencia en las series de tiempo (temperaturas) del Valle del Yaqui.
- 2) Análisis estadístico del comportamiento de las series de tiempo de la temperatura global y la serie de tiempo de la temperatura del Valle del Yaqui, con base en la variabilidad interanual, tanto variabilidad de régimen como variabilidad quasi-periodica (eventos fríos y cálidos) de las últimas décadas.
- 3) Análisis estadístico (correlación y contingencia estadística) y la relación e influencia de la temperatura en los recursos hídricos del Valle del Yaqui.

4) Análisis de tendencia, relación e influencia de la temperatura en la producción agrícola (granos, hortalizas, frutales y textiles) del Valle del Yaqui.

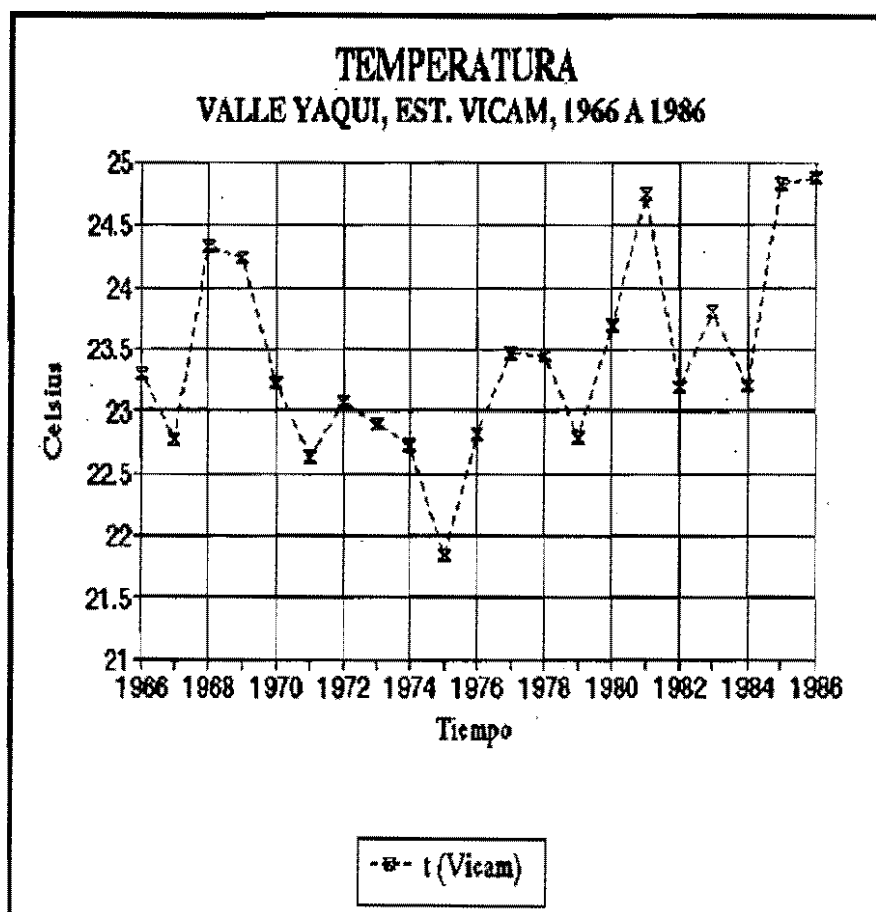
Es importante destacar que el objeto de este anexo es evidenciar la relación de la temperatura media global y su influencia en el Valle del Yaqui (estación Vicam), así como analizar la variabilidad interanual de la temperatura global y regional (de régimen y quasi-perfódica) y su influencia en la disponibilidad de agua y los recursos hídricos de la zona.

Sin embargo, de manera adicional se presentan las tendencias de rendimientos de algunos de los cultivos más importantes de la zona y su relación con la temperatura. En este punto conviene aclarar que los resultados presentados no son concluyentes (merece una investigación aparte), y puede dar origen a estudios más completos, utilizando modelos de simulación biológica, que incluyan efectos del cambio climático en la agricultura (Gordon Y.T. et al, 1994).

● **Análisis de la tendencia global de temperatura y su relación e influencia en las series de tiempo (temperatura) del Valle del Yaqui**

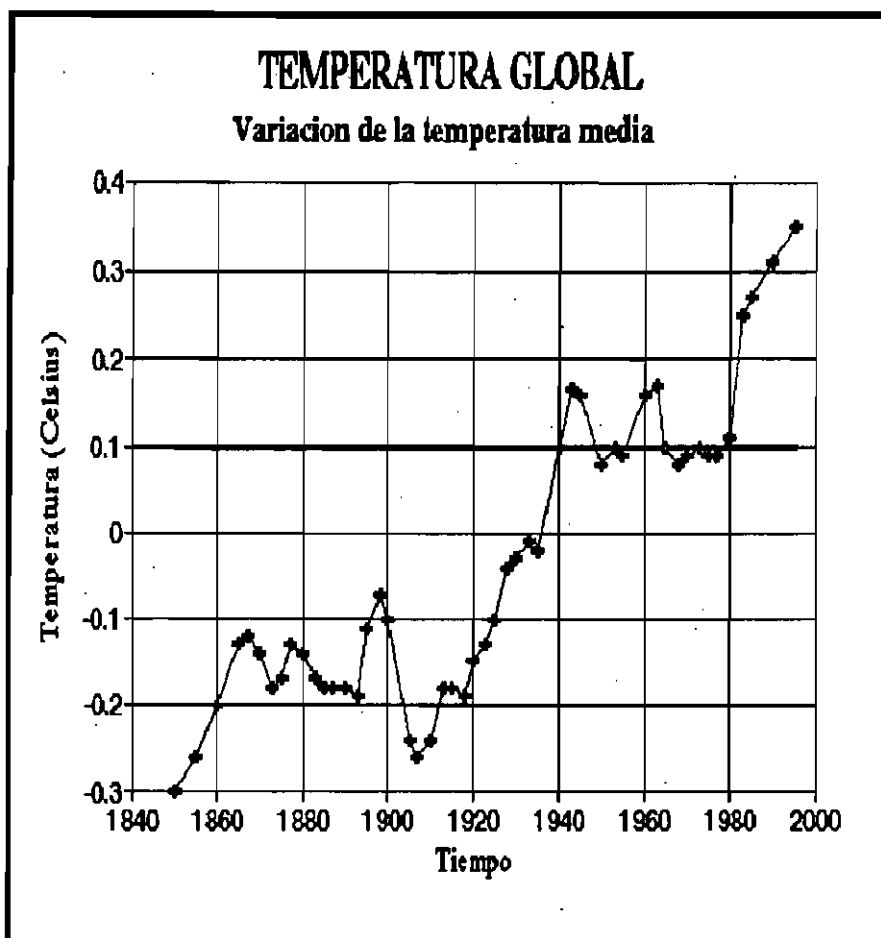
Después de realizar una recopilación y análisis exhaustivo de la información climática del Valle del Yaqui (quince estaciones de diferentes puntos de la cuenca, en la cual se encuentra inserta el Valle), los principales problemas encontrados fueron la falta de datos climáticos completos, series de tiempo interrumpidas y períodos de registro muy cortos.

Por la razón anterior se seleccionó la serie de tiempo de la estación Vicam, la cual cuenta con registros completos de 1966 a 1986 (figura 24).



24. Comportamiento de la temperatura, Valle del Yaqui

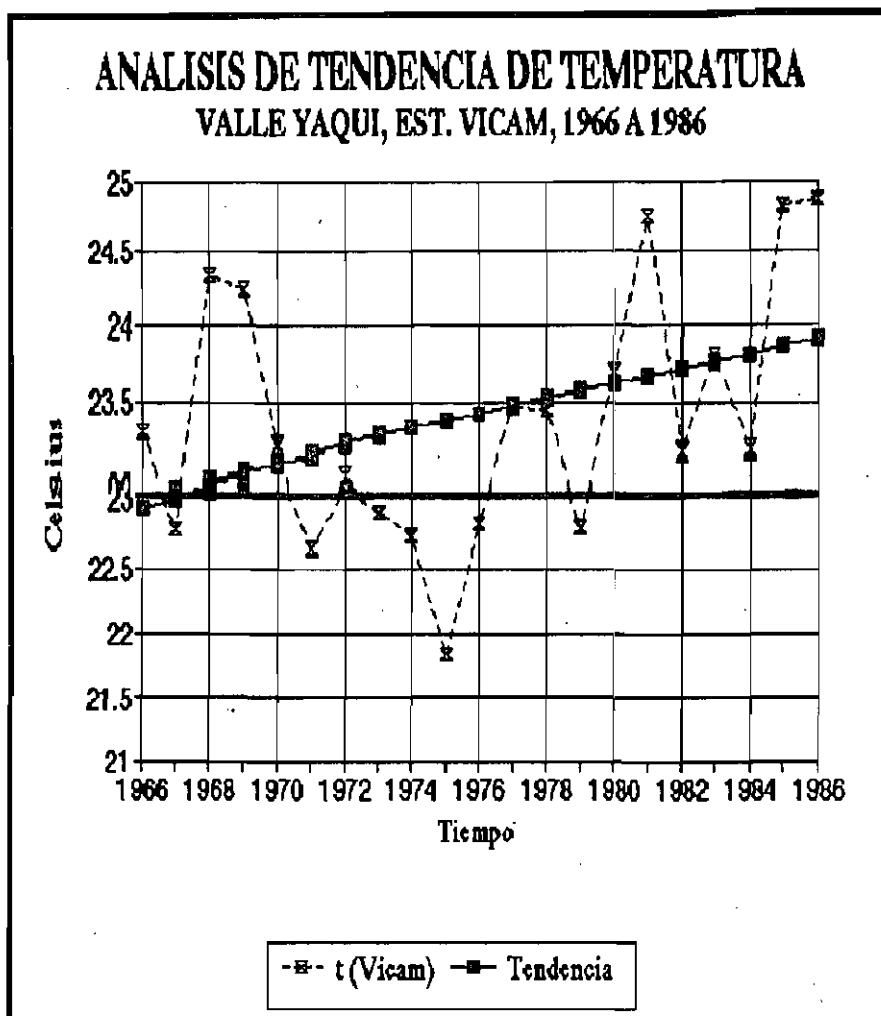
A pesar de que la estación Vicam tiene un período de registro muy corto comparada con los de la tendencia climática a nivel global (fig. 25) se realizó el análisis estadístico correspondiente y se obtuvieron algunos resultados interesantes, los cuales se describen a continuación (ver tablas 8 a 18).



25. Comportamiento de la temperatura media global

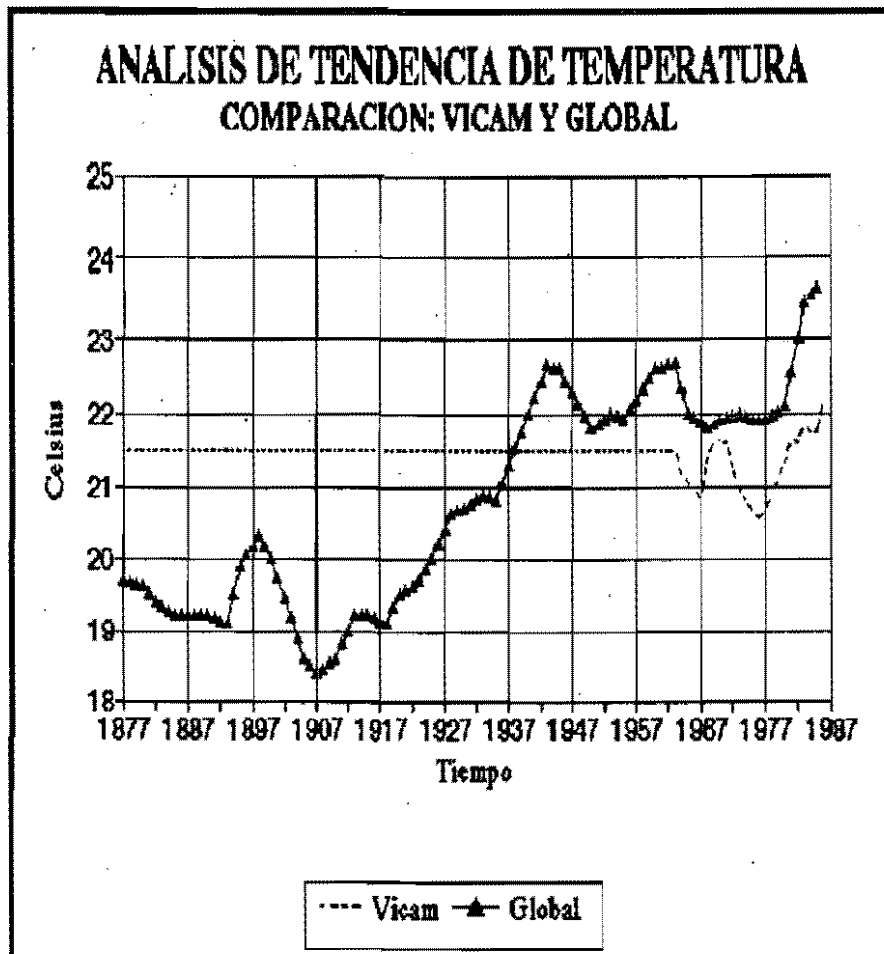
La figura 25 muestra que desde 1850 la temperatura media del mundo se ha elevado 0.5°C (140 años), sin embargo como ya se ha dicho -y según los modelos de circulación general- este incremento será mucho más rápido en las próximas décadas (Schneider, 1991).

Por otro lado realizando el análisis estadístico correspondiente de la serie Vicam, se puede observar que existe una clara tendencia de incremento de la temperatura en el Valle del Yaqui, de la misma magnitud que la tendencia global (0.5°C) (ver figura 26).



26. Tendencia de la temperatura, Valle del Yaqui

Suavizando la serie de tiempo Vicam (promedios móviles, ver anexo C) e insertando dicha serie en la serie suavizada de tendencia global, se puede observar que las variaciones de régimen (enfriamiento-calentamiento) de la serie Vicam en el tiempo, responden a las variaciones de la serie de tendencia global, con una adecuada correlación ($r^2 = 0.60$) (figura 27).

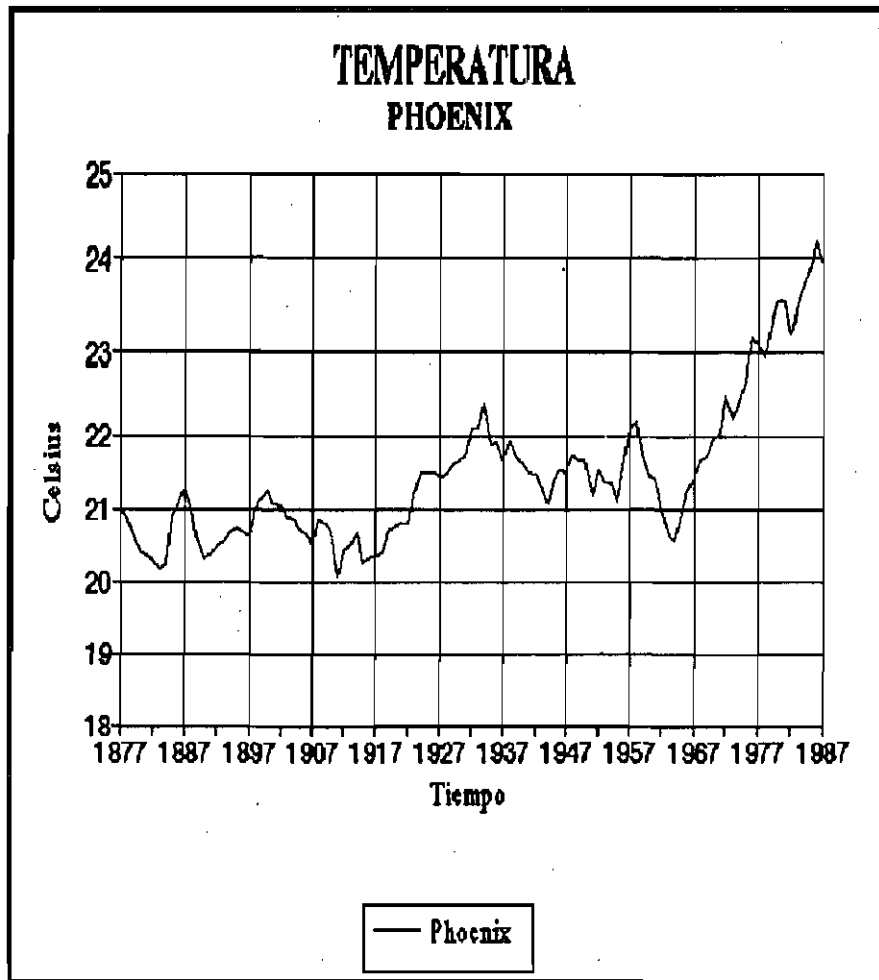


27. Correlación de la temperatura Global y Vicam

Debido a que existía la duda sobre el comportamiento estadístico de la serie Vicam, ya que el período de tiempo de la misma es muy corto (inserta en la tendencia global), se decidió escoger un sitio que tuviera las características del Valle del Yaqui, poniendo especial atención en las siguientes variables:

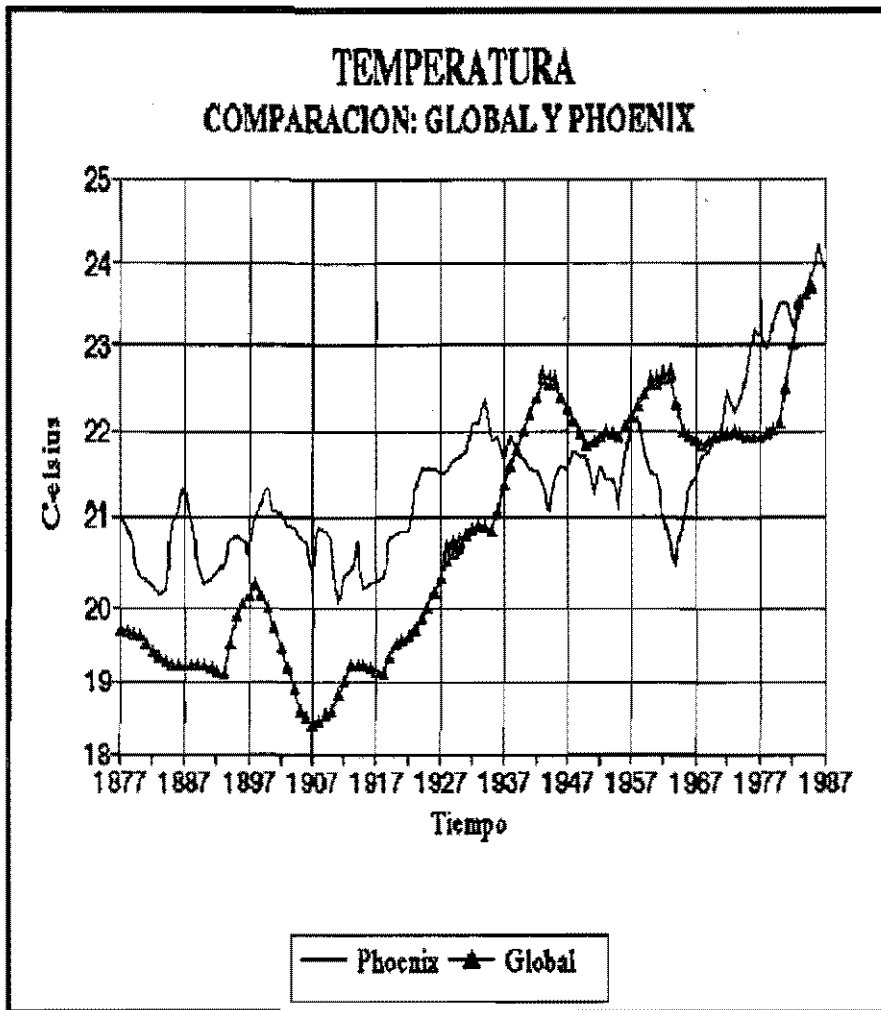
- a) Clima desértico con influencia marítima
- b) Zona agrícola (granos básicos)
- c) Latitud (similar a la del Valle Yaqui)
- d) Orografía (similar)
- e) Zona de circulación (similar)

Se seleccionó una estación climatológica del Valle de Phoenix, Arizona, U.S.A., con un período de registro de 100 años (figura 28).



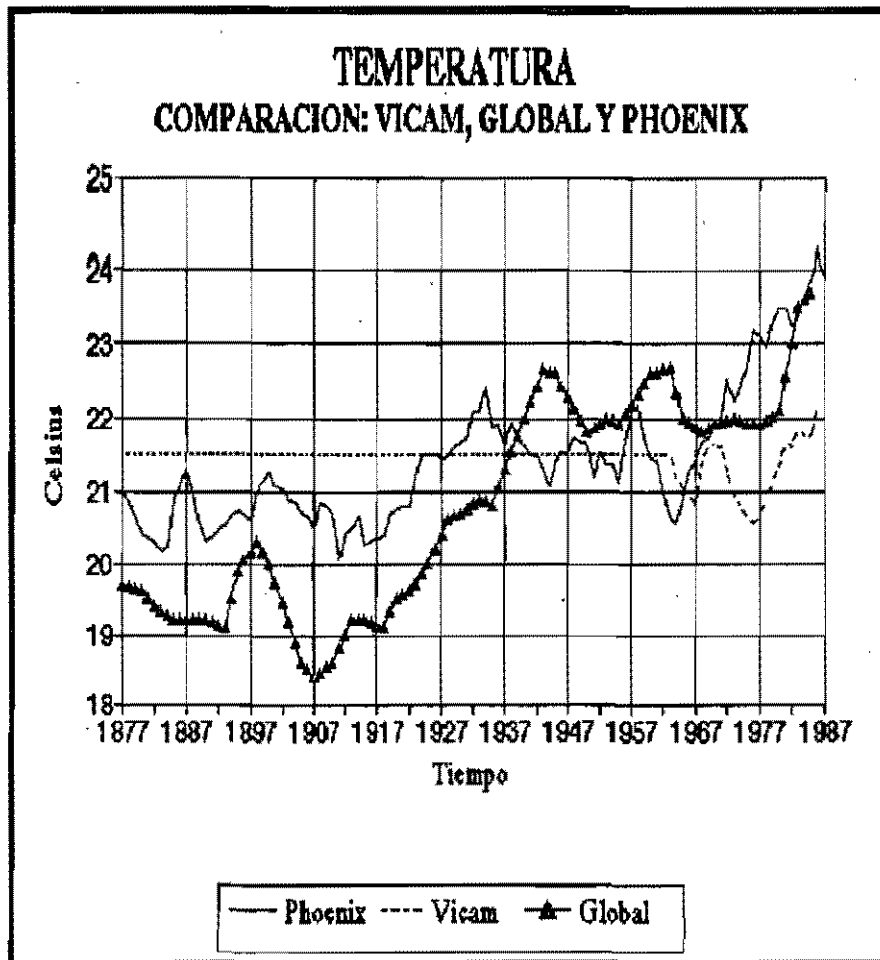
28. Temperatura, Phoenix Arizona U.S.A

Realizando el análisis estadístico entre la tendencia global de la temperatura y la tendencia de temperatura en Phoenix en los últimos 100 años, se encontró una adecuada correlación (considerando que son eventos de escala global) ($r^2=0.52$), además, las variaciones de régimen (enfriamiento-calentamiento) de la serie Phoenix en el tiempo responden a las variaciones de la serie de tendencia global (figura 29).



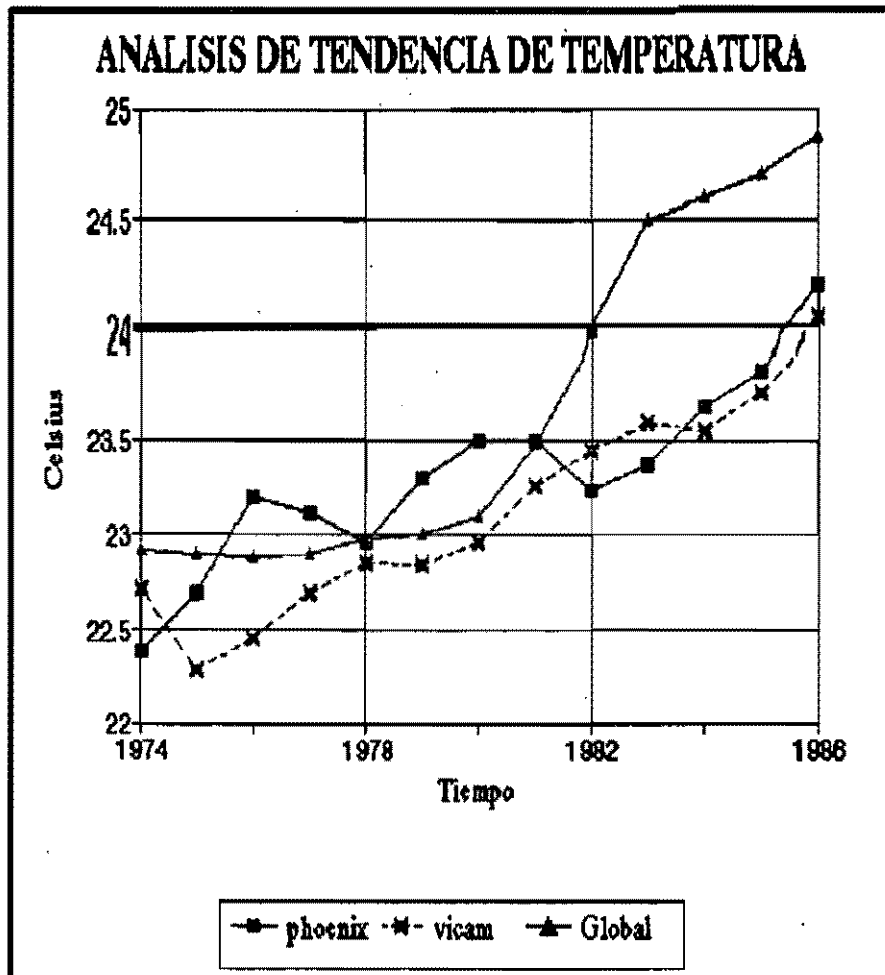
29. Correlación de las tempetaruras Phoenix-Global

En la figura 30 se muestran las series Vicam-Phoenix respecto a la global.



30. Correlación de las temperaturas Vicam-Phoenix-Global

Finalmente en la figura 31 se muestran las tres series de tiempo analizadas (décadas de los 70's y 80's).



31. Tendencias de la temperatura Vicam-Phoenix-Global

En la figura 31 se muestra la variabilidad de régimen que estamos viviendo actualmente (últimos 12 años de registró), (período de calentamiento), mostrando la clara tendencia de incremento de la temperatura, con los factores de correlación mostrados en la tabla 8.

Tabla 8 Comparación estadística de las series de tiempo

SERIE DE TIEMPO	r^2	CARACTERISTICA
Global-Vicam	0.61	El comportamiento de la variabilidad de régimen (períodos de enfriamiento-calentamiento) entre Global-Vicam coinciden.
Global-Phoenix	0.52	El comportamiento de la variabilidad de régimen (períodos de enfriamiento-calentamiento) entre Global-Phoenix coinciden.

● **Análisis estadístico del comportamiento de las series de tiempo de la temperatura global y la serie de tiempo de temperatura del Valle del Yaqui con base en la variabilidad interanual (VI)**

La variabilidad interanual (VI) es causada por variaciones globales, regionales o locales. La VI provoca severas repercusiones en diversas actividades del hombre, especialmente en la agricultura (Llunch B., et al, 1992). En este anexo se analiza la VI en la serie de tiempo global y la del Valle del Yaqui, evaluando su impacto en la producción agrícola, con indicadores estadísticos. Al final del mismo se muestran algunos efectos importantes de la VI en el rendimiento de los cultivos y producción agrícola del Valle, sobre todo en la producción de granos, hortalizas, frutas y textiles.

Los dos tipos de VI analizados son:

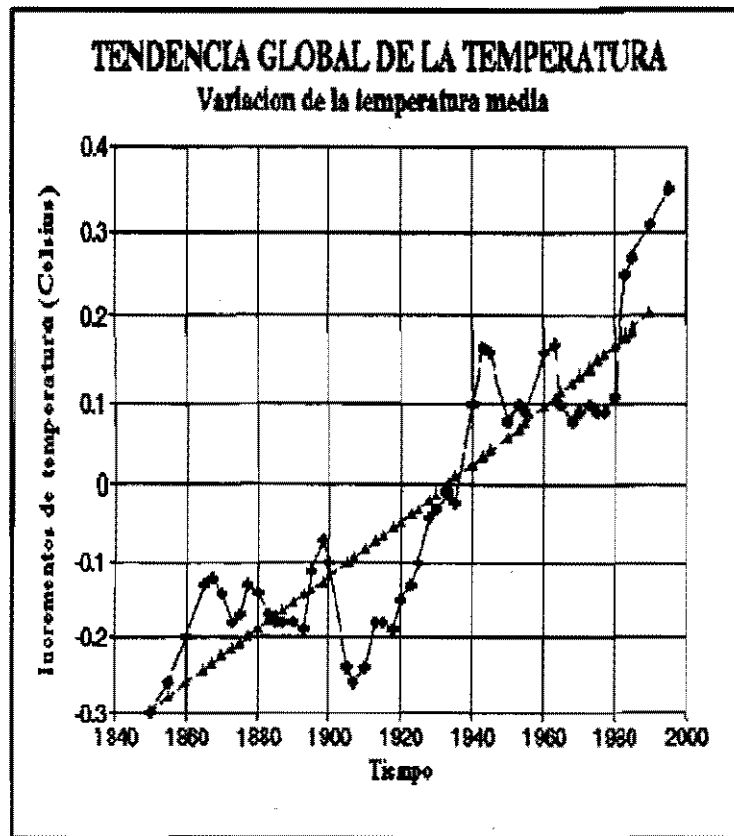
- 1) VIR (variabilidad interanual de régimen)
- 2) VIQ (variabilidad interanual quasi-perfódica de eventos fríos/cálidos)

La VI considerada a menudo como simple ruido contiene información muy importante sobre los cambios que ocurren en la atmósfera y en el océano (Llunch B., et al, 1992).

La VIR es aquella variabilidad interanual que abarca lustros o décadas (períodos de enfriamiento y calentamiento). Los efectos de estas variaciones han sido identificados por diversos investigadores a lo largo de los últimos años, por ejemplo, la VIR de alta temperatura (calentamiento) y baja temperatura (enfriamiento) está estrechamente asociado a la alta y baja abundancia de Anchovetas y Sardinas en el Océano Pacífico (Llunch B. et al, 1992). Los regímenes fríos favorecen el establecimiento de poblaciones de Anchovetas, los cálidos permiten el establecimiento de poblaciones de Sardinas (Llunch B., et al, 1992). También existen indicadores que sugieren que el rendimiento de ciertos cultivos básicos en México responden a la VIR (Llunch B. et al, 1992).

La VIQ es aquella variabilidad interanual de fenómenos quasiperfódicos (por ejemplo el Niño). La VIQ son fenómenos de corta duración (un año) pero muy intensos, y pueden ser extensivos (cubrir un continente). Los "Niños" afectan primordialmente la costa del pacífico de sudamérica, pero su efecto puede sentirse hasta el golfo de Alaska (Llunch B. et al, 1992). El fenómeno de oscilación del sur (fenos) ha provocado severas sequías en zonas del sureste de los Estados Unidos, noroeste y norte de la República Mexicana (Acosta, 1988).

Por otro lado en la serie de temperatura global (figura 32) se puede ver la tendencia de incremento de la misma. Para analizarla se tomó la variación interanual total (VIT), es decir el intervalo entre los valores máximos y mínimos de dicha serie, como el índice comparativo de la VIT.



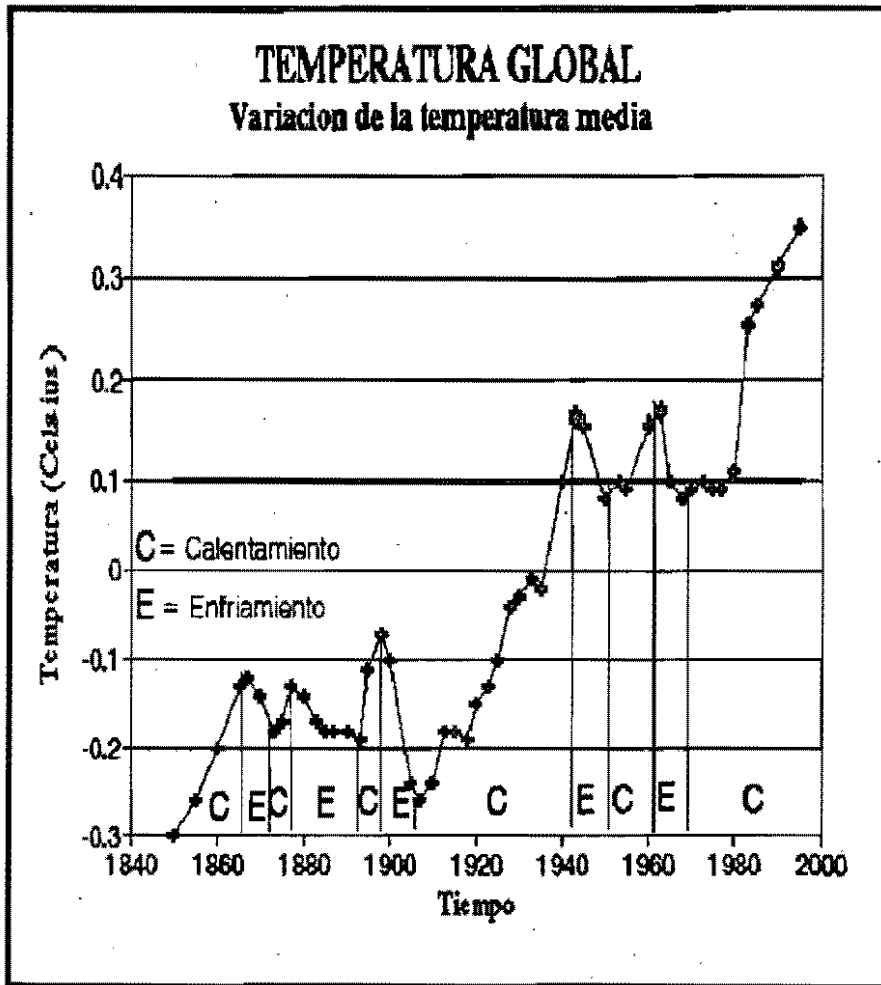
32. Tendencia de la temperatura global

Para esta serie se tiene una VIT de 0.5°C . Tomando como base este valor de la VIT se puede ver que la variación lineal de la serie es de 0.036°C por década, es decir 0.71% de la variabilidad interanual total.

Por otra parte realizando el análisis de la VIR se puede observar en la figura 33 cuatro variaciones de régimen (de alta o baja temperatura) en los últimos 5 décadas (ver tabla 9):

Tabla 9 Variaciones de régimen, temperatura global

DECADA	REGIMEN
1940-1950	Enfriamiento
1950-1960	Calentamiento
1960-1970	Enfriamiento
1980-A la fecha	Calentamiento

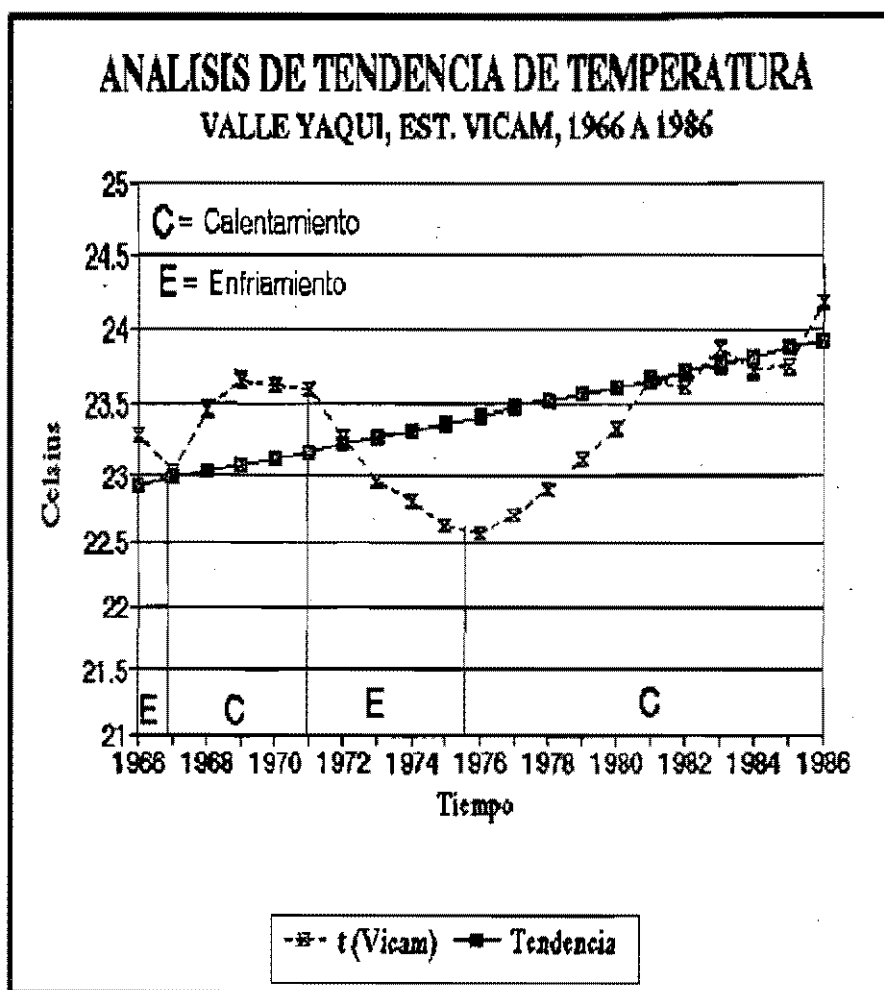


33. Variaciones de régimen de la temperatura Global

La variación promedio de las tres primeras décadas mostradas en la tabla 9 es del 20% de la VIT, sin embargo en el período de calentamiento (década de los 80's y de los 80's a la fecha) la variación (proceso de calentamiento) es del 48% de la VIT.

En la figura 26 se muestra la tendencia de la temperatura del Valle del Yaqui. La VIT de esta serie es de 3.03°C . Tomando como base este valor de la VIT se puede ver que la variación lineal de la serie es de 1.63% de la variabilidad interanual total, es decir, una variación de incremento de 0.0495°C por año, lo que equivale a 0.495°C por década. Los incrementos anteriores coinciden con los incrementos (por décadas) predichos en los escenarios estudiados por el Panel Intergubernamental sobre estudios de Cambio Climático (OMM, 1990).

Realizando el análisis correspondiente de la VIR se puede observar en la figura 34 tres variaciones de régimen (de alta o baja temperatura), en los lustros del 66-71, 71-76, y en la década de los 80's a la fecha (ver tabla 10):



34. Variaciones de régimen, estación Vicam, Valle del Yaqui

Tabla 10 Variaciones de régimen, temperatura Valle del Yaqui

DECADA	REGIMEN
1966-1971	Calentamiento
1971-1976	Enfriamiento
1980-A la fecha	Calentamiento

La variación promedio de los dos primeros regímenes (lustros) mostrados en la tabla 10 es del orden del 34.65% de la VIT (figura 34), sin embargo la variación de régimen de los dos últimos lustros (1980-a la fecha)(período de calentamiento) es de 59.40% de la VIT.

Si se comparan los valores anteriores con la variación porcentual respecto a la VIT de la tendencia global, se puede observar una variación más alta a nivel regional que global, se puede ver que la variabilidad regional es 1.7 veces mayor (41%) que la global (período 1966-1976) y 1.2 veces mayor (20%) en el período de la década de los 80's a la fecha (ver tabla 11):

Tabla 11 Variabilidad de régimen respecto a la VIT de la tendencia global y la estación Vicam, Valle del Yaqui

PERIODO	GLOBAL	REGIONAL (VALLE DEL YAQUI)	DIFERENCIA
1966-1976	20%	34.65%	41 %
1980-A la fecha	48%	59.40%	20 %

Analizando la variación lineal de la series global vs Vicam (tabla 12) se puede ver que, la variabilidad regional de temperatura es 2.2 veces mayor que la global; mientras que la variación por década de la temperatura global es de 0.04°C, la del Valle del Yaqui es de 0.495°C, es decir doce veces mayor a nivel regional que global. Esta variación regional de temperatura de la estación Vicam coincide con las variaciones por década predicha en los escenarios del PICC de la OMM.

Tabla 12 Variabilidad de la temperatura, tendencia global y regional respecto a la VIT

VARIABILIDAD DE REGIMEN	GLOBAL	VARIABILIDAD REGIONAL (VALLE DEL YAQUI)
Variabilidad	0.71%	1.63%
Variación en °C por década	0.04°C	0.495°C

De la tabla 12 se puede concluir que la VIR regional es más acusada que la global, lo que significa cambios más severos a nivel regional que global.

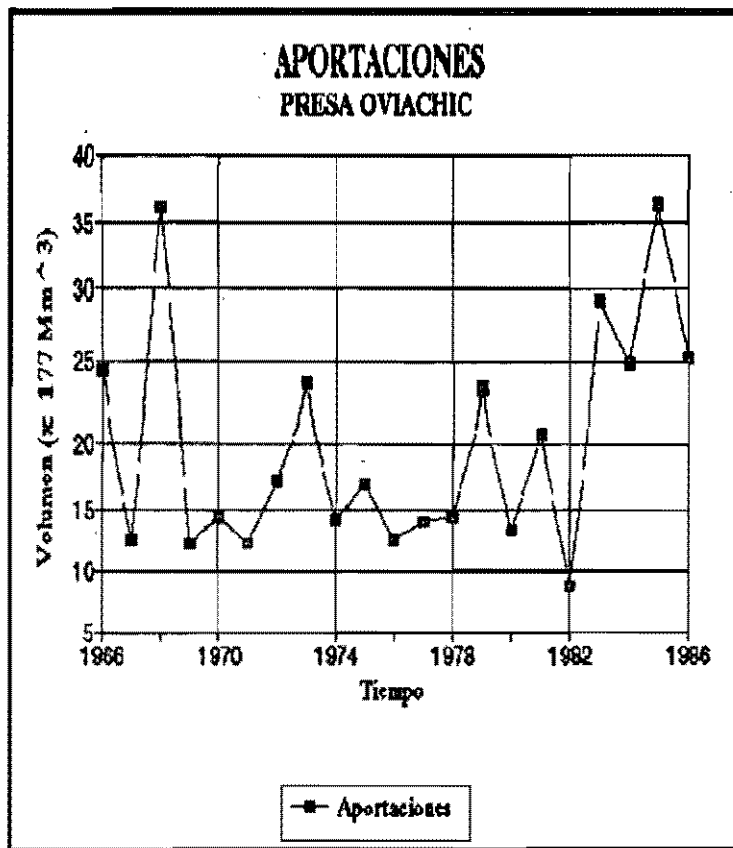
● **Análisis estadístico (correlación y contingencia estadística), relación e influencia de la temperatura en los recursos hídricos del Valle del Yaqui.**

Es ya conocido que para algunas zonas del planeta los períodos fríos están relacionados con menor precipitación y los períodos de calentamiento con mayor precipitación. El primer caso es debido a una menor evaporación en la superficie del mar, un ejemplo de lo anterior son las hambrunas de Sahel, que ocurrieron durante el régimen frío de 1950 a 1970 (Llunch B. et al, 1992).

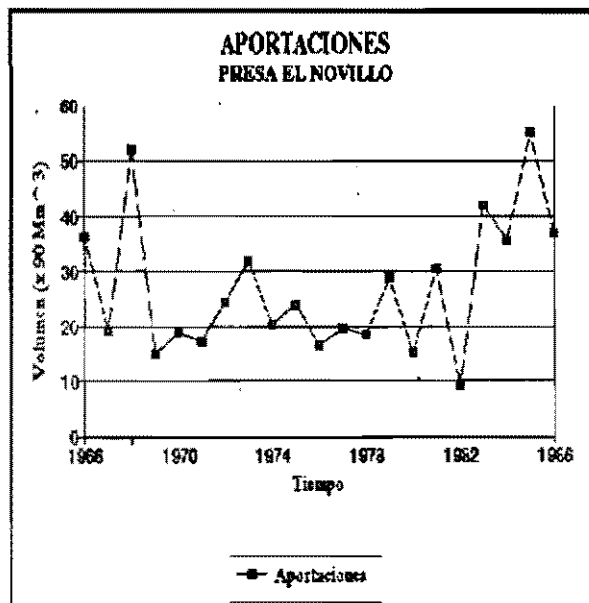
Basado en esta hipótesis y en los resultados descritos en este anexo (que muestran una relación de influencia del calentamiento global en la zona sur de los Estados Unidos -Phoenix- y la zona en la cual se encuentra comprendida el Valle del Yaqui), se procedió a analizar los efectos de este período de calentamiento global y regional y su influencia en los escurrimientos y extracciones de las principales presas del Valle del Yaqui.

El Valle del Yaqui cuenta con tres presas importantes (ver capítulo II): Alvaro Obregón (Oviachic), Plutarco Elías Calles (Novillo) y Lázaro Cárdenas (Angostura), de las cuales se obtuvieron los escurrimientos promedio mensuales (aportaciones deducidas más lluvias) y las extracciones mensuales por ciclo agrícola, desde 1929 a la fecha (diciembre de 1994)(Gerencia Estatal Sonora, 1995).

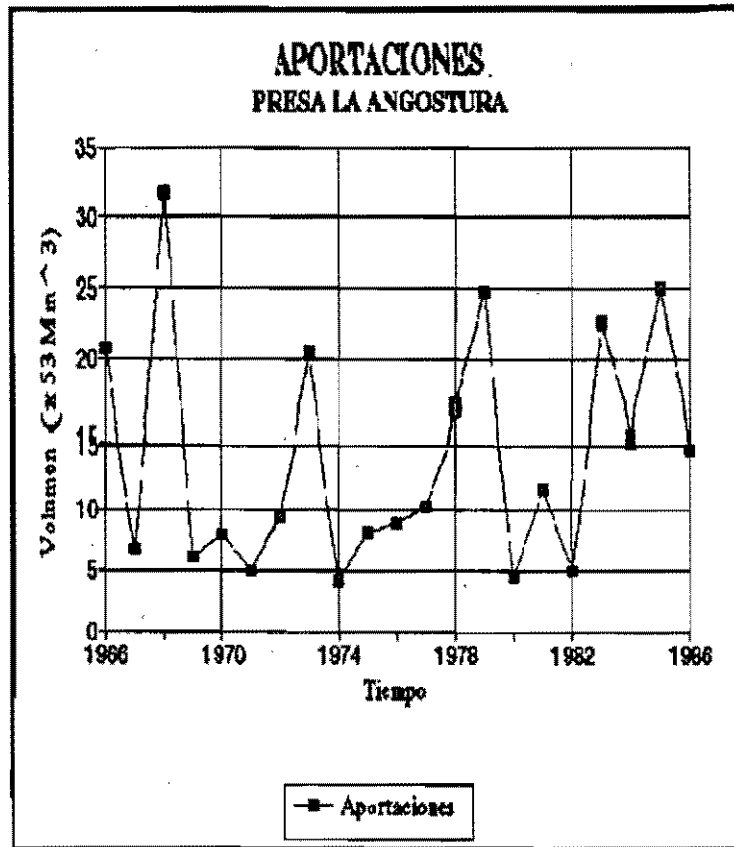
En las figuras 35 , 36 y 37 se puede observar las aportaciones a las tres presas y su variación en el tiempo. Se graficaron los datos de 1966 hasta 1986, con el objeto de hacerlas coincidir y correlacionarlas estadísticamente con los datos de temperatura disponibles de la estación Vicam.



35. Aportaciones a la presa Oviachic



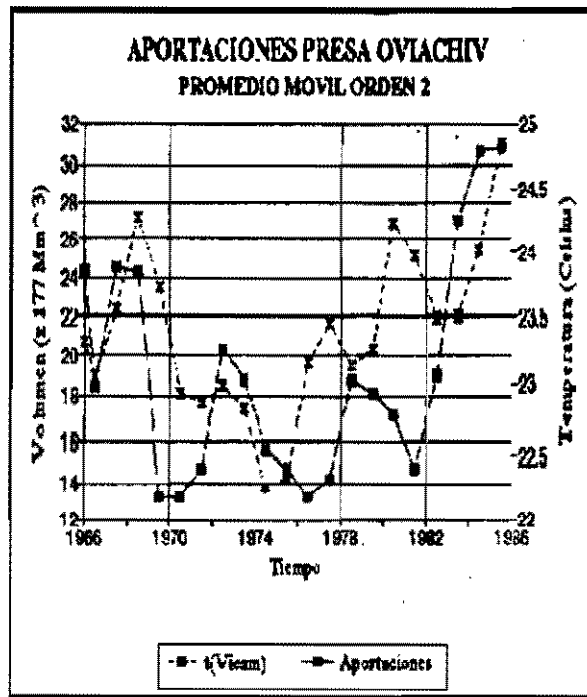
36. Aportaciones a la presa el Novillo



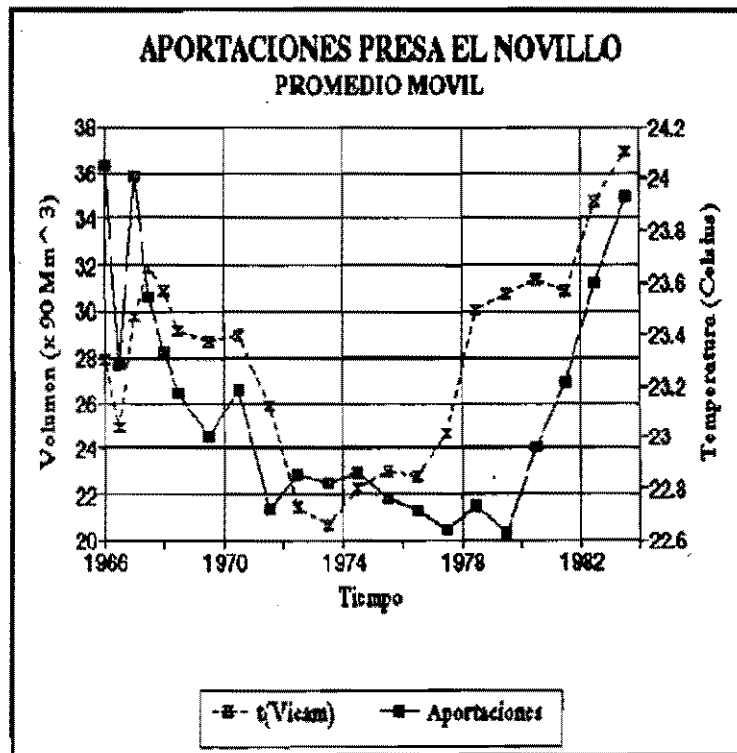
37. Aportaciones a la presa la Angostura

En las figuras 38, 39 y 40 se pueden observar las aportaciones a las tres presas y su variación en el tiempo, suavizadas mediante la técnica de promedios móviles (ver anexo C).

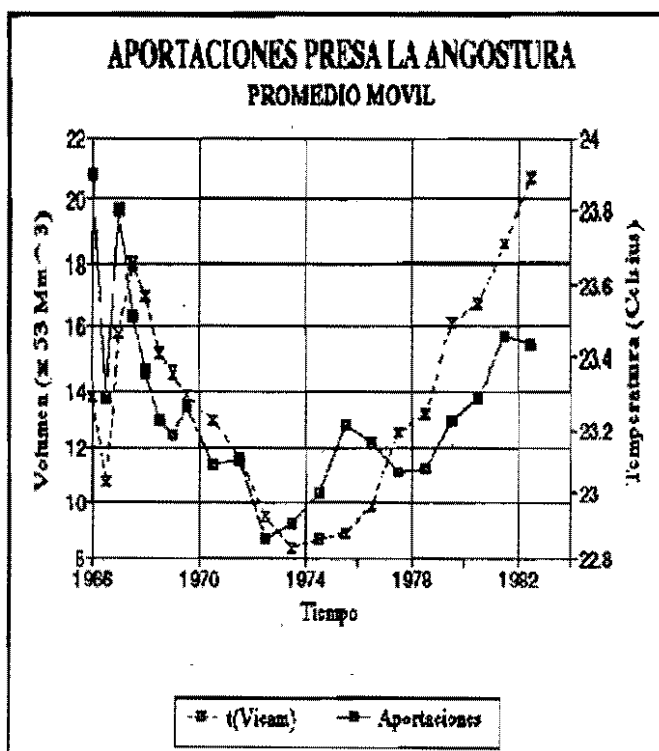
En estas figuras se puede observar la correspondencia de la variabilidad de régimen de la temperatura con las aportaciones, con una pequeña correlación y una adecuada contingencia estadística (ver tabla 13), es decir cuando se incrementa la temperatura se incrementan las aportaciones a las presas, cuando desciende la temperatura disminuyen las aportaciones a las presas. Esto se debe probablemente a la influencia del mar de Cortéz (Golfo de California) en la zona del Valle del Yaqui (ver fig. 2), ya que en los regímenes de enfriamiento disminuye la evaporación del mar y por lo tanto disminuye la humedad transportada (por la acción de los vientos) hacia el continente (Valle del Yaqui).



38. Aportaciones a la presa Oviachic, serie suavizada (promedio móvil)



39. Aportaciones a la presa el Novillo, serie suavizada (promedio móvil)



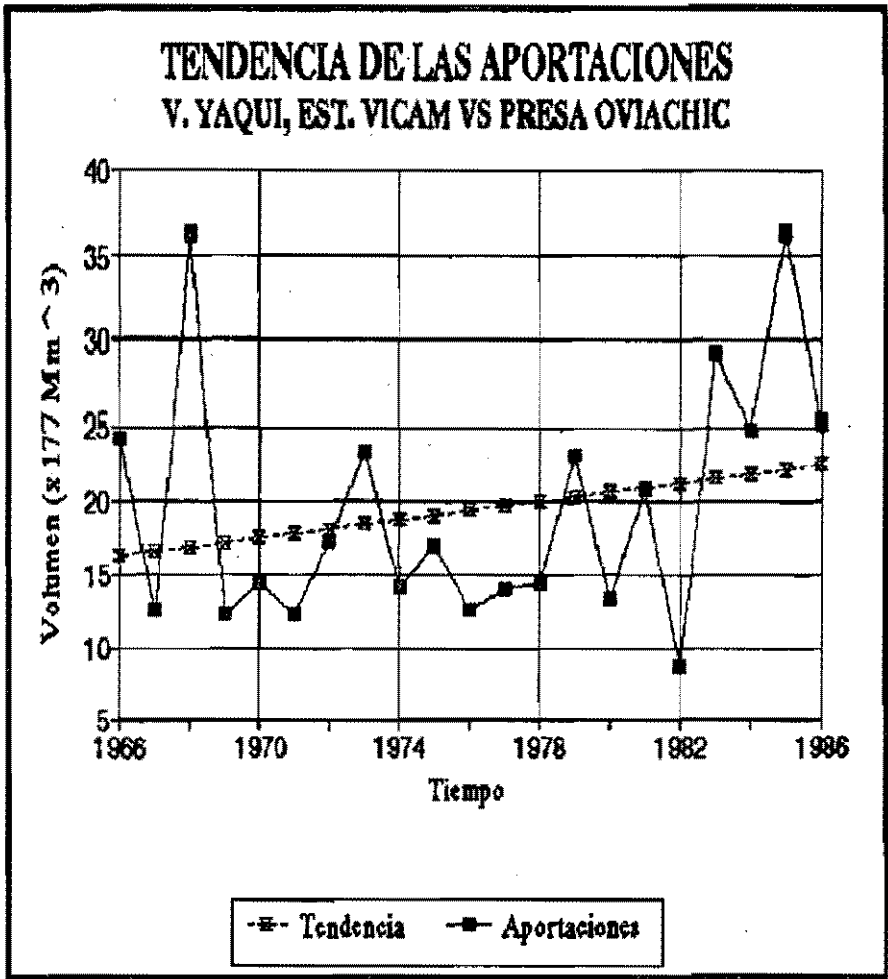
40. Aportaciones a la presa la Angostura, serie suavizada (promedio móvil)

El factor de correlación lineal de las series es bajo (ver tabla 13), sin embargo la contingencia estadística (C) (ver anexo C), indica una relación de dependencia entre las dos variables analizadas.

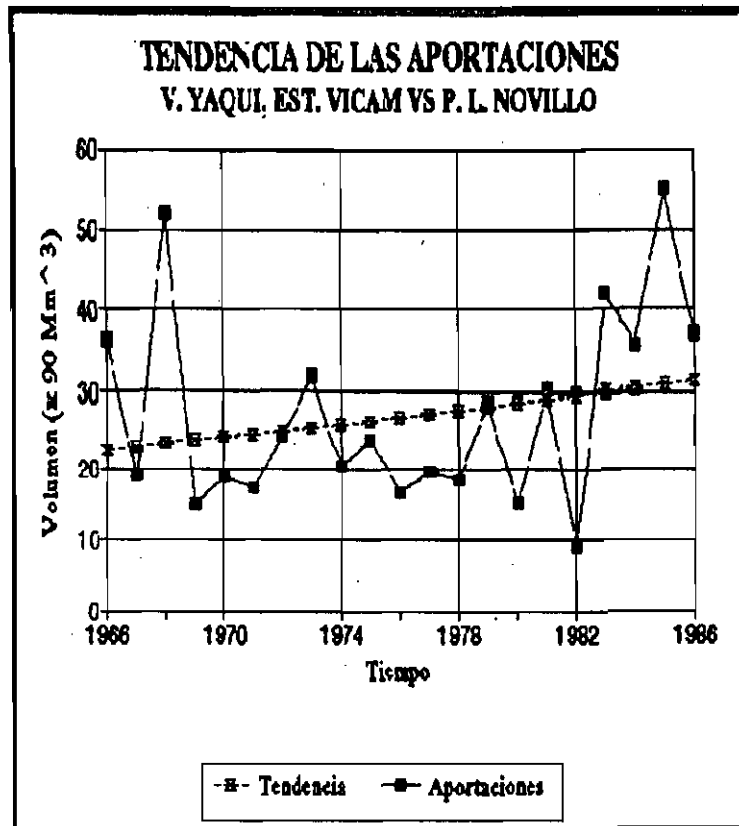
Tabla 13 Correlación lineal y contingencia de la temperatura y escurrimiento, Valle del Yaqui

CORRELACION ESTADISTICA	OVIACHIC	EL NOVILLO	ANGOSTURA
Correlación lineal (r^2)	0.26	0.26	0.13
Contingencia (C)	0.18	0.20	0.26

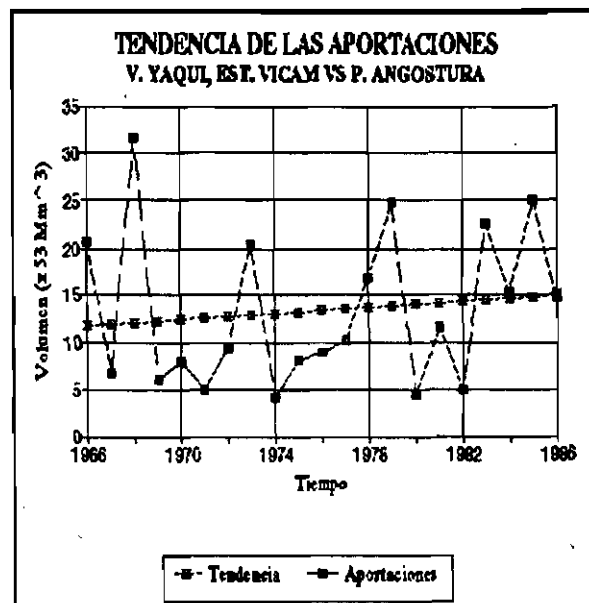
Realizando el análisis de las aportaciones a las presas del valle del Yaqui se puede observar la tendencia de incremento en el tiempo, tanto de la presa Oviachic, el Novillo, así como la presa Angostura (figuras 41, 42 y 43).



41. Tendencia de las aportaciones a la presa Oviachic



42. Tendencia de las aportaciones a la presa el Novillo



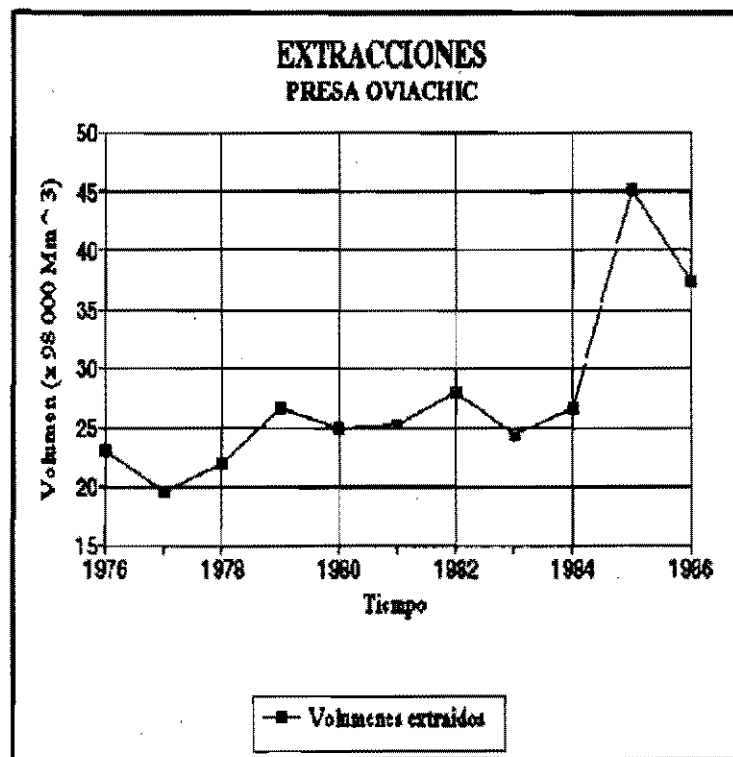
43. Tendencia de las aportaciones a la presa la Angostura

Se realizó un análisis idéntico a las extracciones de las presas. Se obtuvieron datos de dos de las tres presas del Valle (Oviachic y el Novillo), de 1976 a la fecha (figuras 44 y 45).

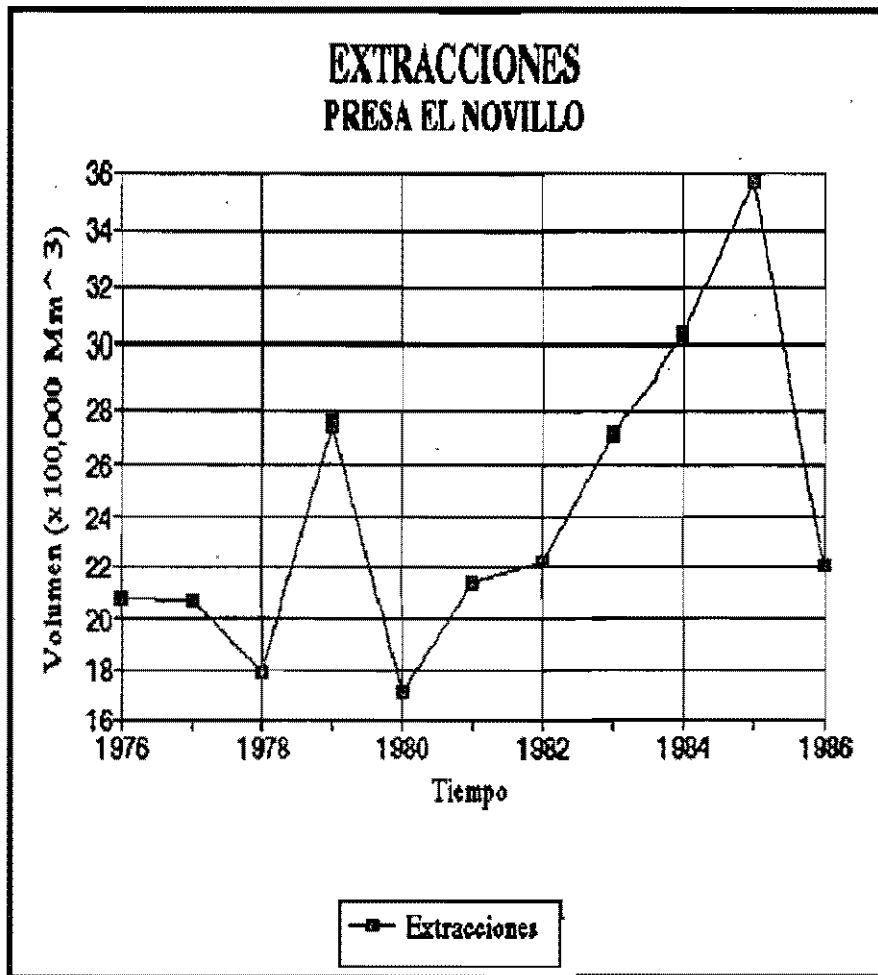
Prácticamente no existe correlación lineal (ver tabla 14), sin embargo la contingencia estadística (C), indica una relación de dependencia entre las dos variables analizadas.

Tabla 14 Correlación lineal y contingencia de la temperatura y extracciones, Valle del Yaqui

CORRELACION ESTADISTICA	OVIACHIC	EL NOVILLO
Correlación lineal (r^2)	0.41	0.03
Contingencia (C)	0.10	0.11

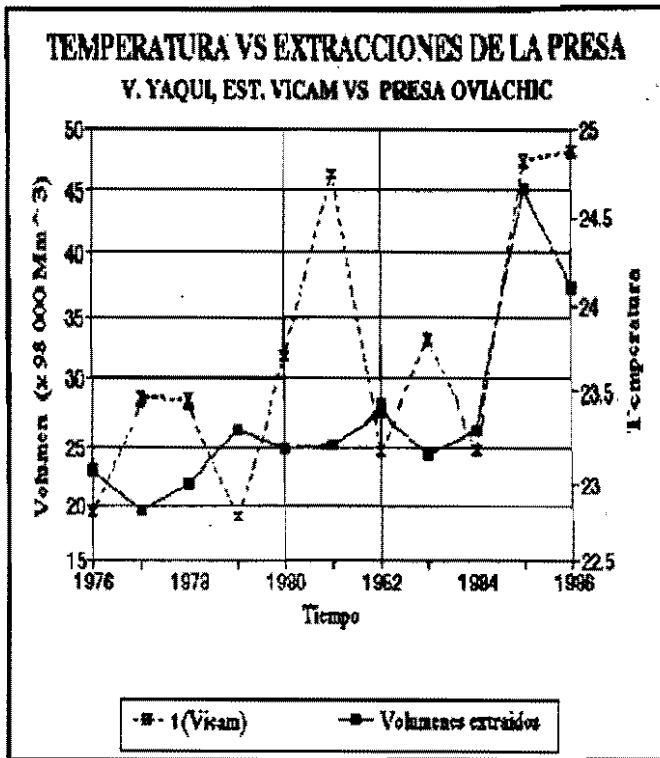


44. Extracciones a la presa Oviachic

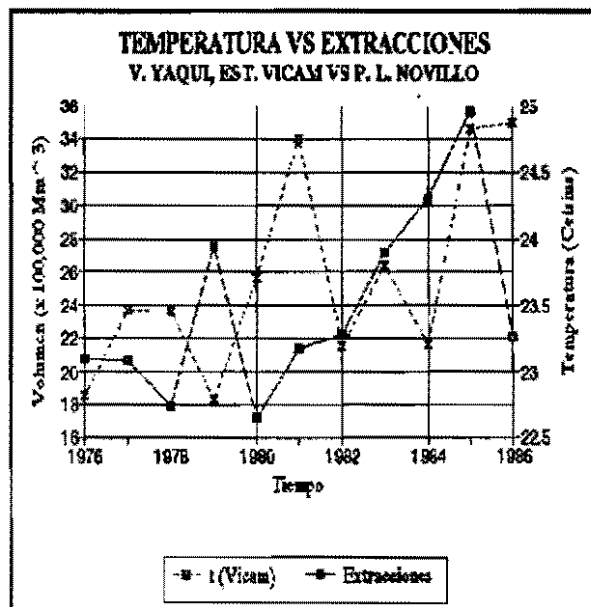
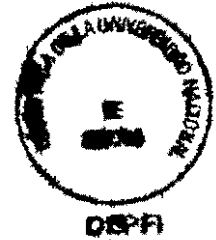


45. Extracciones a la presa el Novillo

En las figura 46 y 47 se puede observar el comportamiento de las extracciones y temperatura (ver tabla 15). En ambas gráficas existe un comportamiento singular de las variables, por ejemplo, en el caso de la presa Oviachic se puede ver que de 1976 a 1983 cuando la temperatura aumenta las extracciones disminuyen. La misma característica se puede observar en el caso de la presa el Novillo (1976-1982), cuando la temperatura aumentan las extracciones disminuyen (lo cual parece contradecir el sentido común).

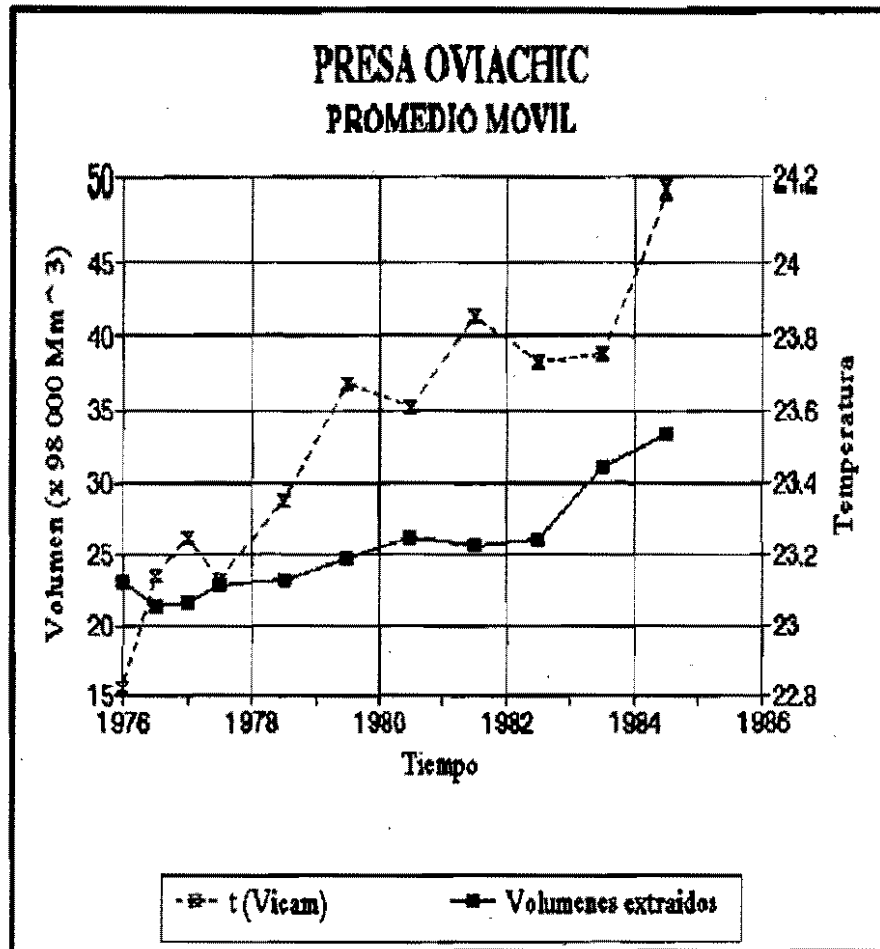


46. Relación de las extracciones y temperatura, presa Oviachic

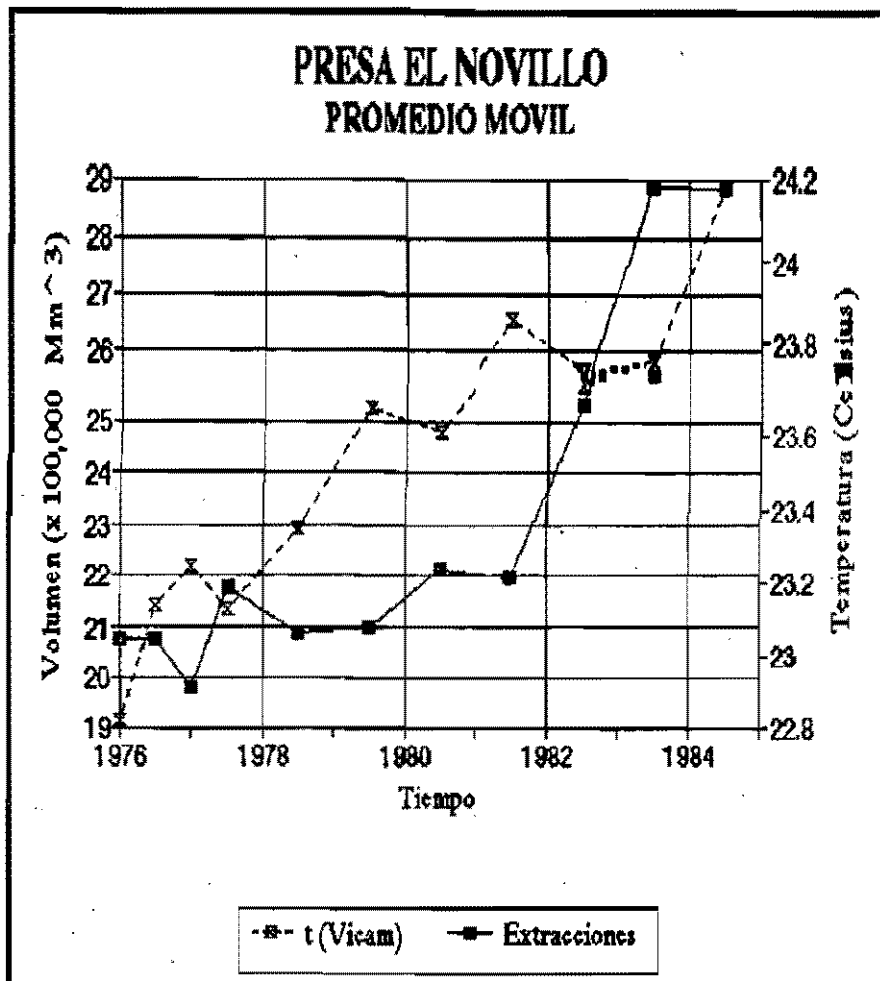


47. Relación de las extracciones y temperatura, presa el Novillo

Sin embargo, para ambos casos, en el período de mayor calentamiento de la historia reciente (década de los 80's) al incrementarse la temperatura las extracciones aumentan (con una pendiente fuerte), situación que se puede ver más claramente en las series suavizadas para ambas presas (figuras 48 y 49).

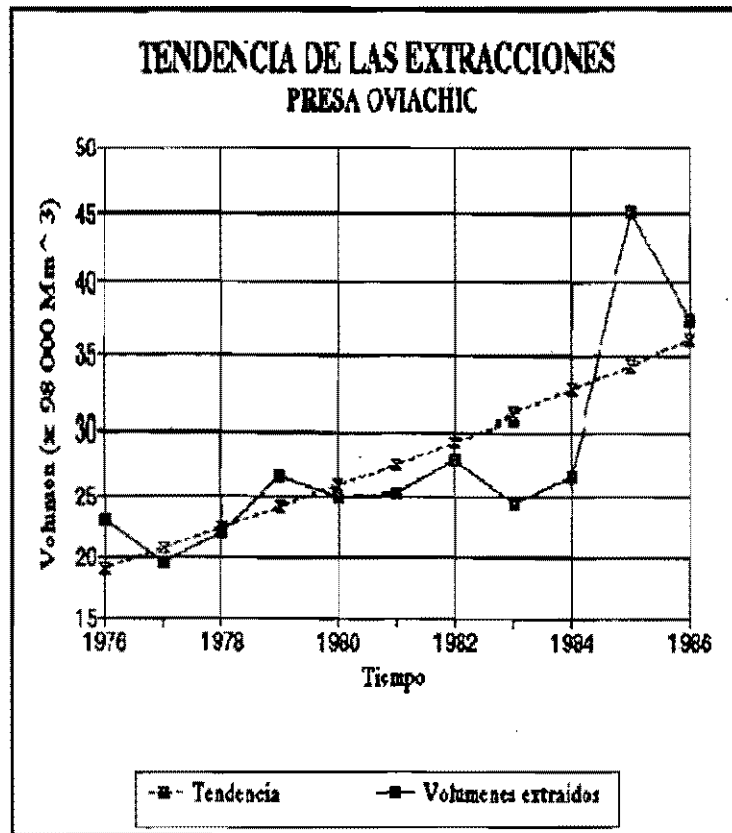


48. Temperaturas y extracciones de la presa Oviachic, series suavizadas (promedio móvil)

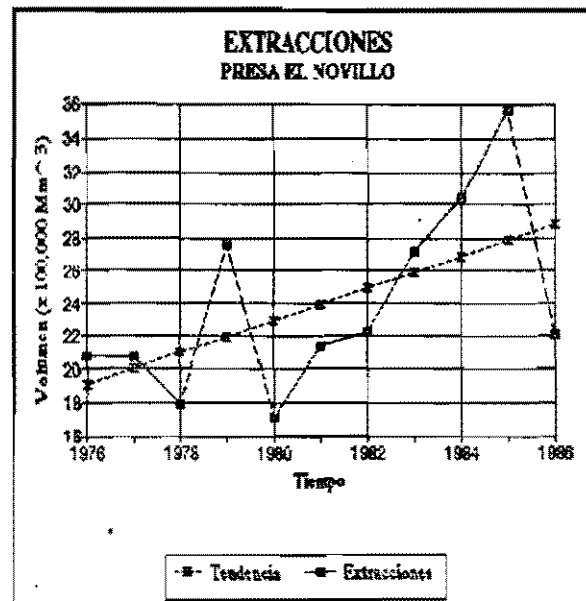


49. Comportamiento de la temperatura y extracciones de la presa el Novillo, suavizadas (promedio móvil)

Realizando el análisis de tendencia de las extracciones a las presas del Valle del Yaqui, se puede observar el incremento de dichas extracciones en el tiempo, tanto de la presa Oviachic como el Novillo. Si se comparan las pendientes de estas rectas contra las pendientes de las rectas de regresión de las aportaciones, se concluye que las pendientes de las extracciones son mayores, es decir, se extrae más agua de la presas de lo que se aporta (figuras 50 y 51), (tabla 15).



50. Tendencia de las extracciones de la presa Oviachic



51. Tendencia de las extracciones de la presa el Novillo

Tabla 15 Valores promedio de aportaciones y extracciones en un lapso de tiempo de 10 años (1976-1986) y pendientes de las tendencias

VARIABLE	OVIACHIC	EL NOVILLO
Extracciones (Mm ³)	1 666 000	1 000 000
Aportaciones (Mm ³)	796.5	540
Pendientes (m), extracciones	1.7	1
Pendientes (m), aportaciones	0.45	0.6

● **Análisis de tendencia, relación e influencia de la temperatura en la producción agrícola (granos, hortalizas, frutales y textiles) del Valle del Yaqui***

Las variaciones de régimen y el incremento de la temperatura influyen en el rendimiento de algunos cultivos (Lunch B., et al, 1992). La producción de los cultivos usualmente ocurre en rangos de temperatura media entre 10°C y 41°C (Ortiz, 1987). Sin embargo cada especie vegetal tiene ciertas temperaturas críticas (máximas, mínimas y óptimas) que norman su desarrollo, crecimiento y producción (temperaturas cardinales).

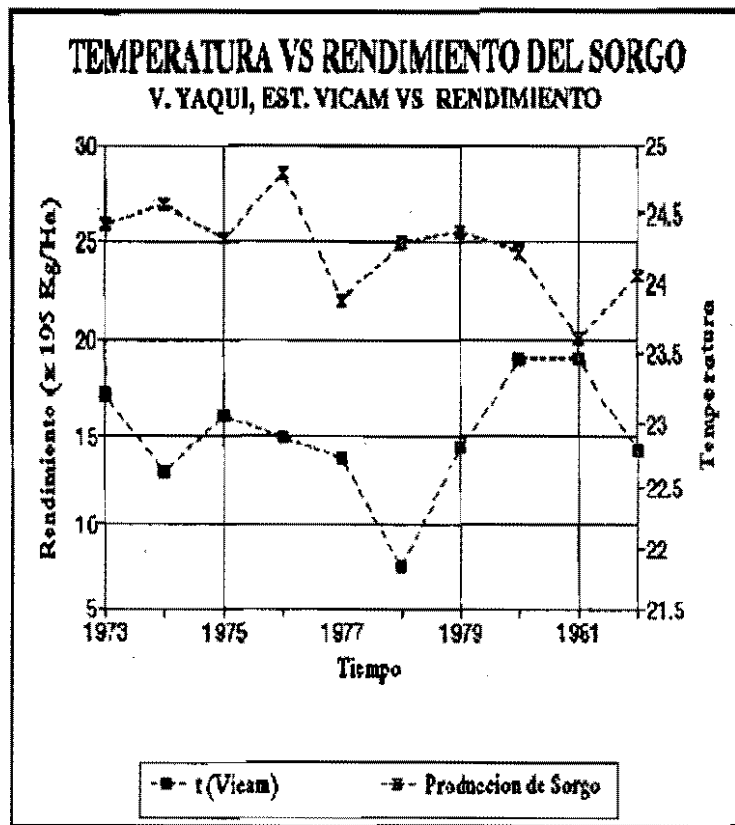
Las temperaturas cardinales definen los requerimientos de calor necesarios para el óptimo desarrollo de los cultivos (Ortiz, 1987).

El rendimiento de los cultivos depende también de otros factores, entre los más importantes podemos mencionar: disponibilidad del recurso agua, régimen de humedad del suelo, factores de manejo (cultura de los agricultores), características físico-químicas y biológicas del suelo, disponibilidad de recursos económicos de los agricultores, disponibilidad de mano de obra para laboreo, etc.

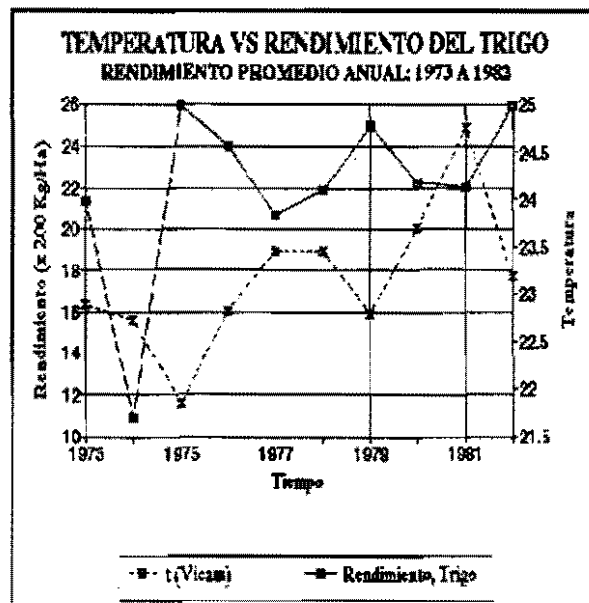
Por otro lado como se ha demostrado en este anexo las variaciones de régimen (enfriamiento-calentamiento) de la serie Vicam responden a las variaciones de la serie de tendencia global ($r^2=0.60$). En el Valle del Yaqui existe una tendencia de incremento de la temperatura de la misma magnitud que la tendencia global (0.5°C), en un tiempo más corto.

Sin embargo, a pesar de la notable tendencia de incremento de la temperatura en el Valle no se puede afirmar que dicha tendencia sea el único factor que influye en la disminución del rendimiento de algunos de los principales cultivos de la región (ver figuras 55 a 61), aunque en algunos de ellos exista una correlación muy pequeña entre el comportamiento de la temperatura y el rendimiento, como es el caso del sorgo, el trigo y la sandía, en cuyas gráficas se puede observar que cuando la temperatura aumenta la producción disminuye, y el efecto contrario, cuando la temperatura disminuye la producción aumenta (figuras 52, 53 y 54 y tabla 16). Este es un tema de investigación que merece un trabajo aparte.

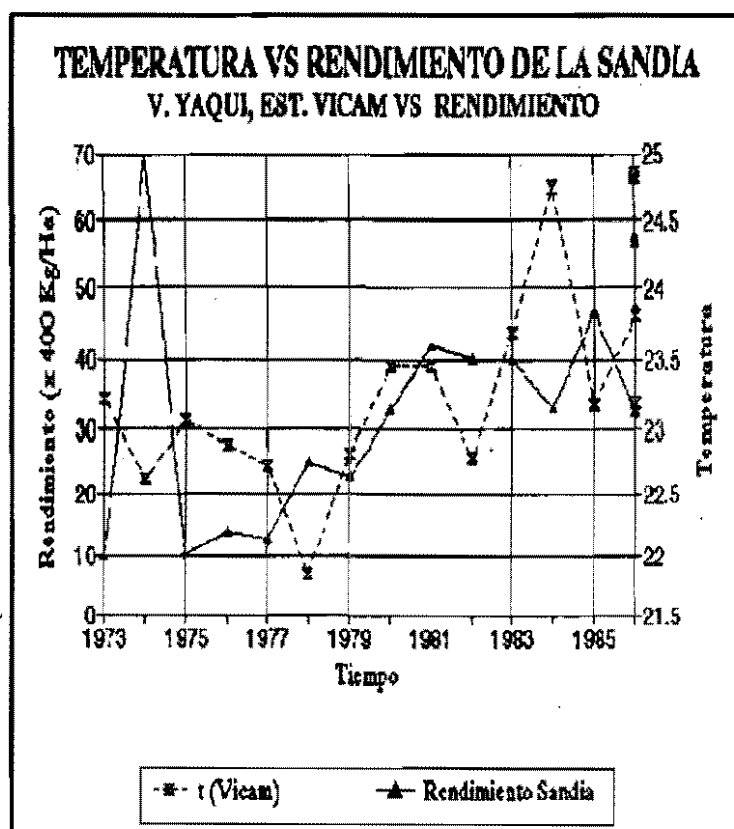
* Datos de rendimiento de cultivos, tomados de la base de datos FAO-CNA, 1994



52. Temperatura y rendimientos del sorgo



53. Temperatura y rendimientos del trigo



54. Temperatura y rendimientos de la sandía

Tabla 16 Correlación entre la temperatura y el rendimiento (Kg/Ha)

CULTIVOS	CORRELACION	PENDIENTE DE LA RECTA
Sorgo	$r^2 = 0.40$	-0.30
Trigo	$r^2 = 0.31$	+0.15
Sandía	$r^2 = 0.14$	+0.21

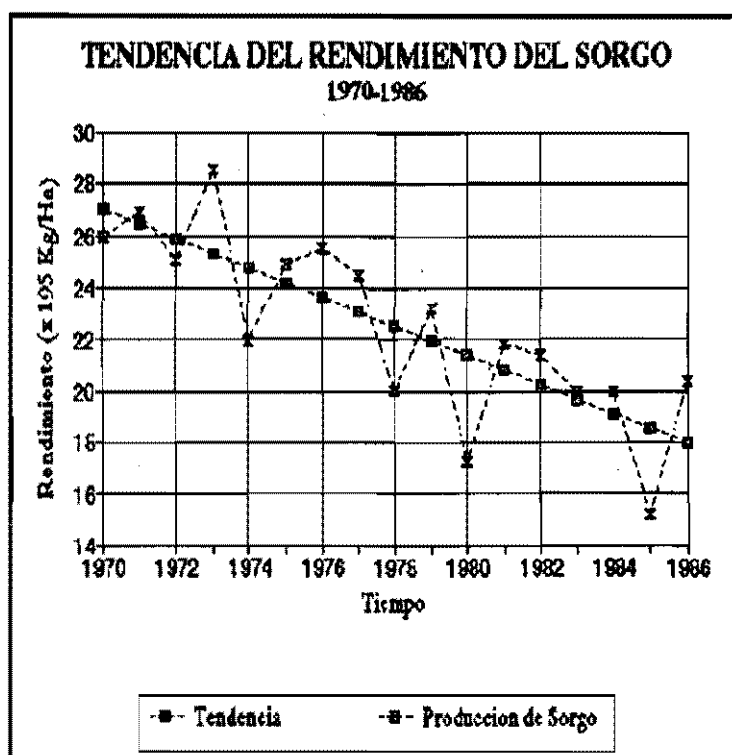
Lo que sí es indiscutible es que el factor climático está implícito y juega un papel importante en el comportamiento del rendimiento, tanto de granos básicos, oleaginosas, textiles así como frutales y hortalizas del Valle del Yaqui, debido a que la energía del sol es el motor de la naturaleza y determina el comportamiento no solo del régimen térmico de la tierra, sino el comportamiento del ciclo hidrológico de la misma, modificando los patrones de precipitación, escurrimiento y los regímenes de humedad del suelo.

En las figuras 55 a 61 se puede observar la disminución en el rendimiento de algunos cultivos de grano como el sorgo, frijol y maíz; oleaginosas como el cártamo, ajonjolí y soya; textil como el algodón. En la tabla 17 se muestran los valores máximos y mínimos de la producción (según la recta de regresión) y los valores de las pendientes

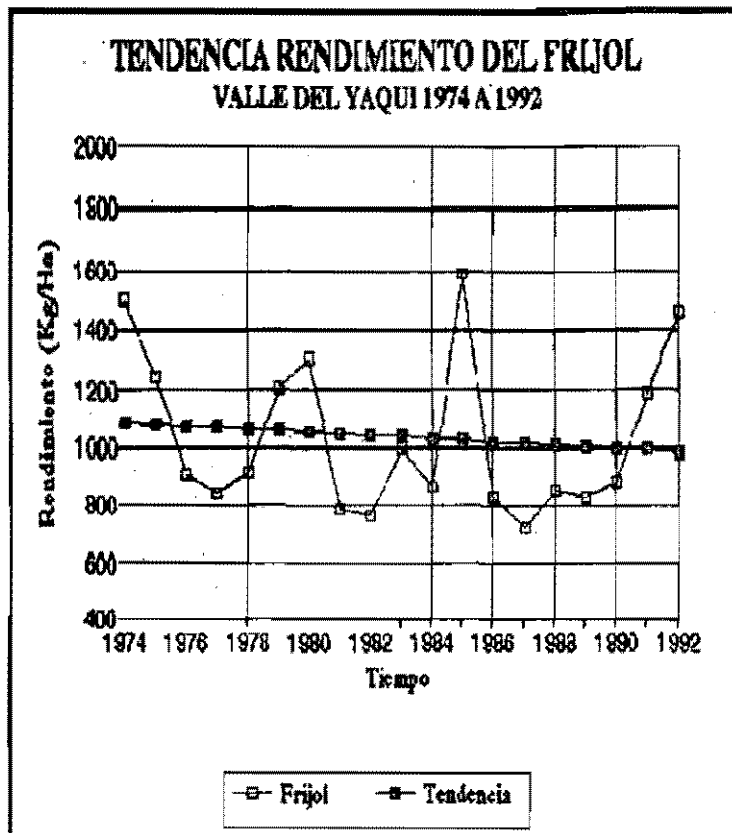
negativas.

Tabla 17 Valores máximos y mínimos del rendimiento y valores de las pendientes de disminución de producción (Kg/Ha) de algunos cultivos analizados, Valle del Yaqui, Sonora

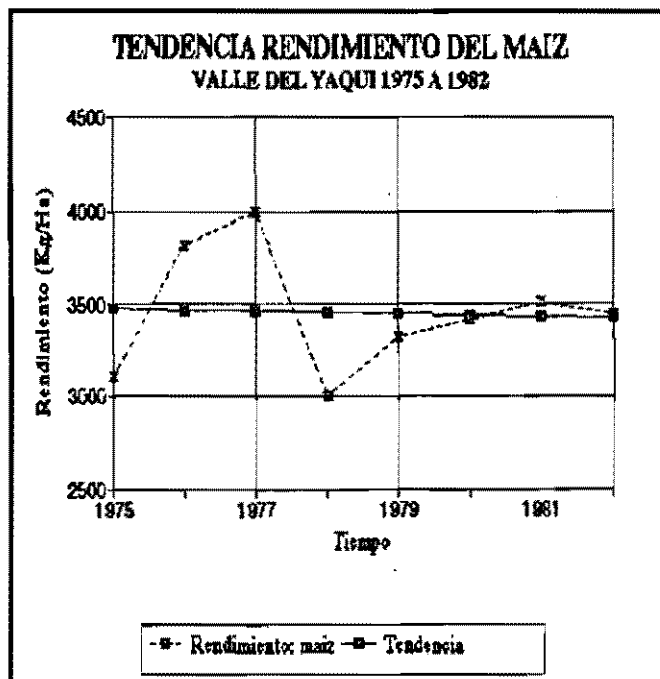
TIPO	CULTIVOS	PRODUCCION MAXIMA KG/Ha	PRODUCCION MINIMA KG/Ha	PENDIENTE DE LA RECTA
GRANOS	Sorgo	5265	3510	- 0.30
	Maíz	3480	3420	- 0.015
	Frijol	1100	980	- 0.04
OLEAGINOSA	Soya	2180	1990	- 0.09
	Cártamo	2200	1890	- 0.08
	Ajonjolí	725	660	- 0.06
TEXTIL	Algodón	3000	2600	- 0.06



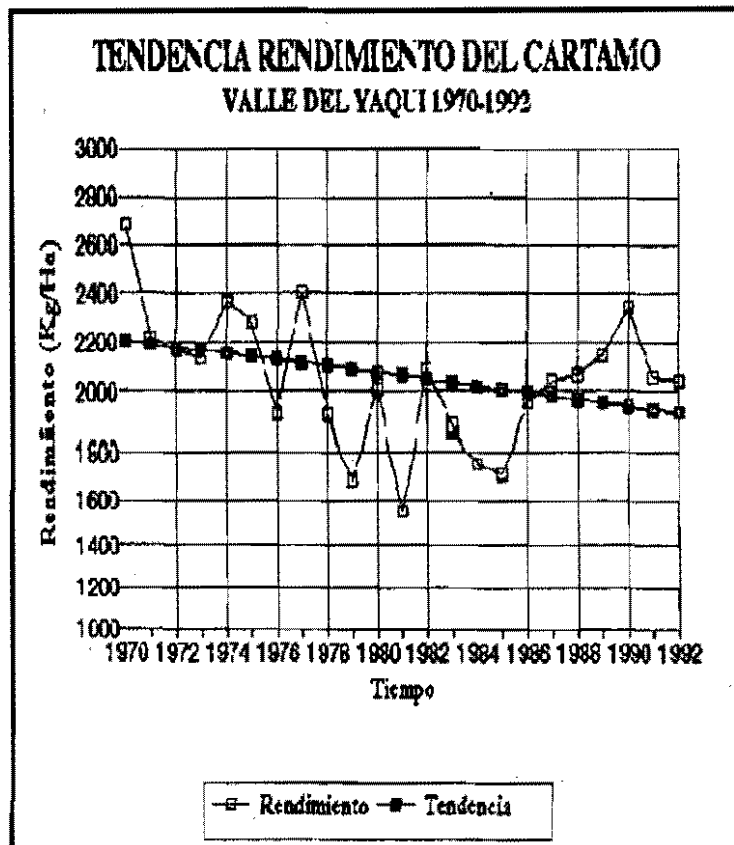
55. Disminución del rendimiento del sorgo



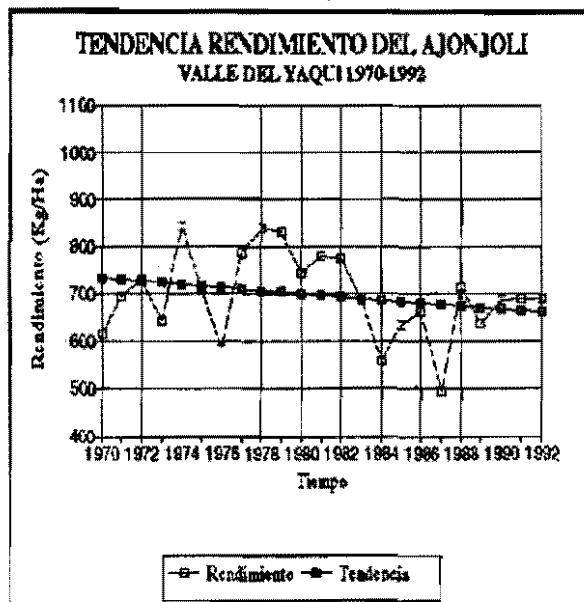
56. Disminución del rendimiento del frijol



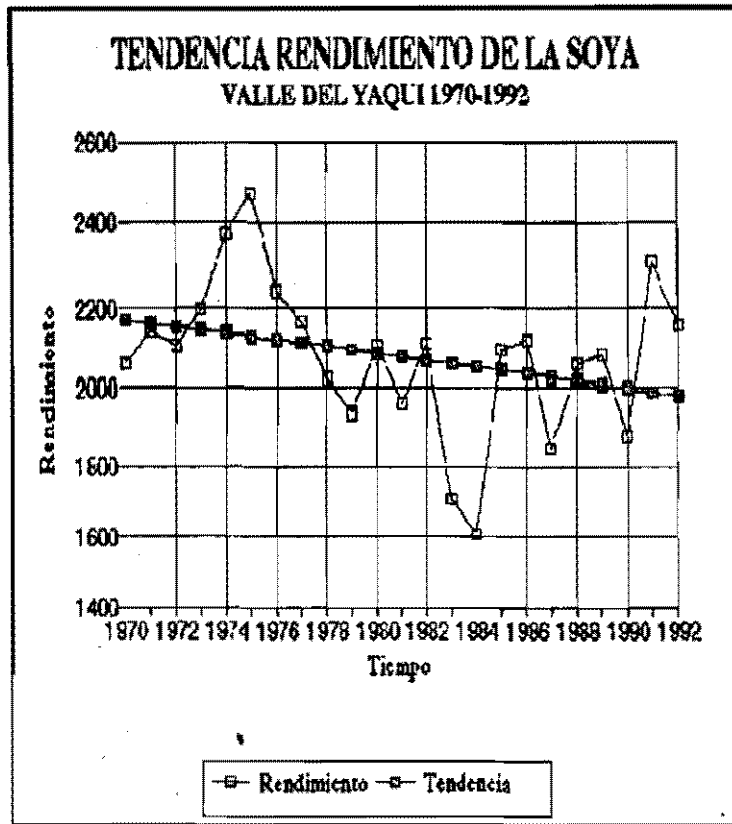
57. Disminución del rendimiento del maíz



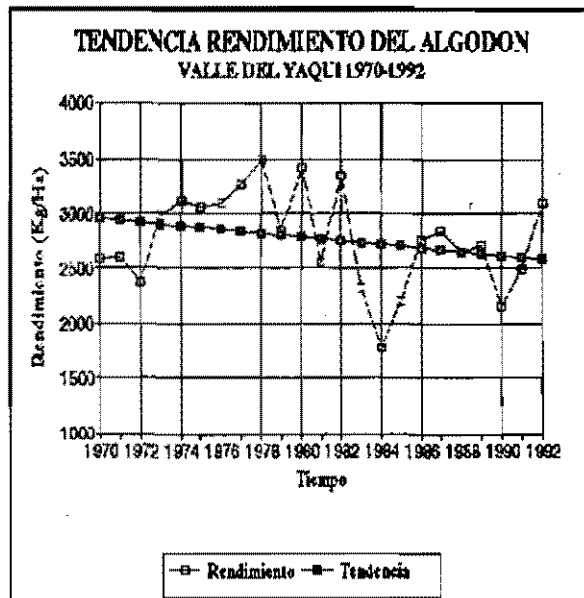
58. Disminución del rendimiento del cártamo



59. Disminución del rendimiento del ajonjolí



60. Disminución del rendimiento de la soya

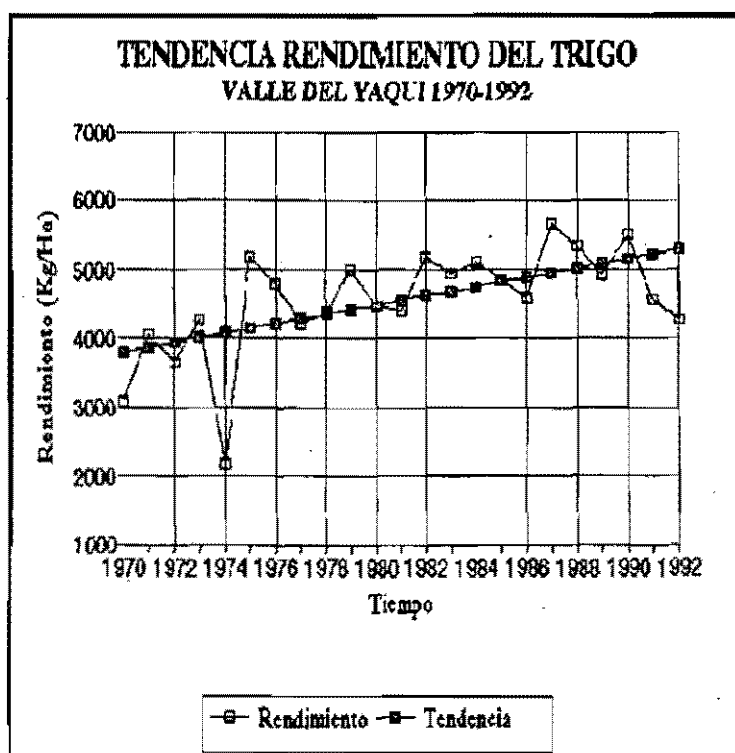


61. Disminución del rendimiento del algodón

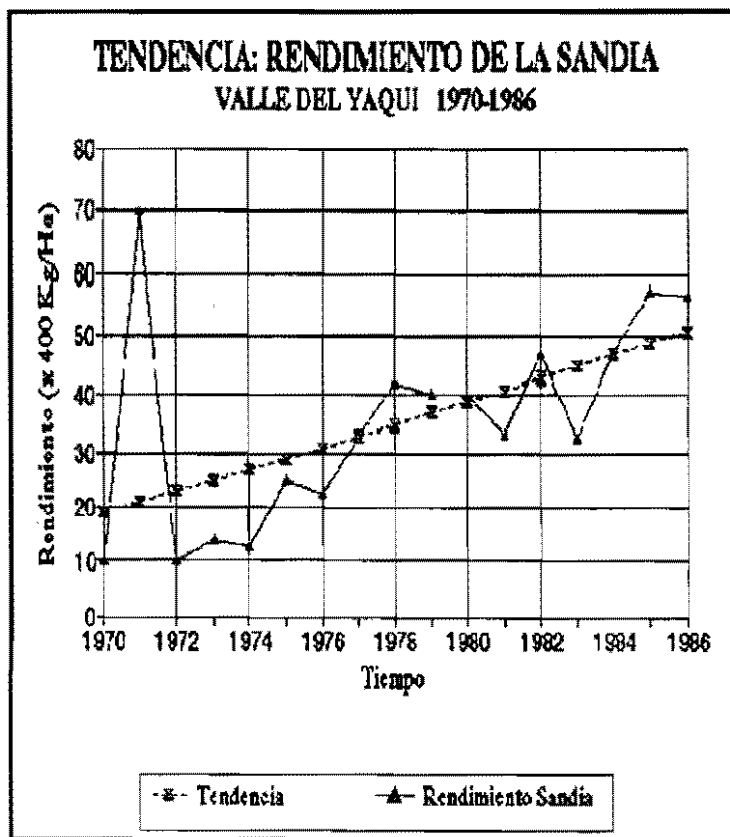
Sin embargo, existen otros cultivos como los frutales, sandía; hortalizas como la cebolla y jitomate, y granos como el trigo cuyo rendimiento se ha incrementado (figuras 62 a 65). En la tabla 18 se puede observar los valores máximos y mínimos de la producción (según la recta de regresión) y los valores de las pendientes positivas.

Tabla 18 Valores de rendimientos máximos y mínimos y pendientes de las rectas de algunos cultivos con tendencia de incrementos

TIPO	CULTIVOS	PRODUCCION MINIMA KG/Ha	PRODUCCION MAXIMA KG/Ha	PENDIENTES DE LAS RECTAS
FRUTA	Sandía	8 000	20 000	+ 0.21
GRANO	Trigo	3 800	5 150	+ 0.15
HORTALIZA	Cebolla	14 000	23 000	+ 0.13
	Jitomate	20 000	23 000	+ 0.07



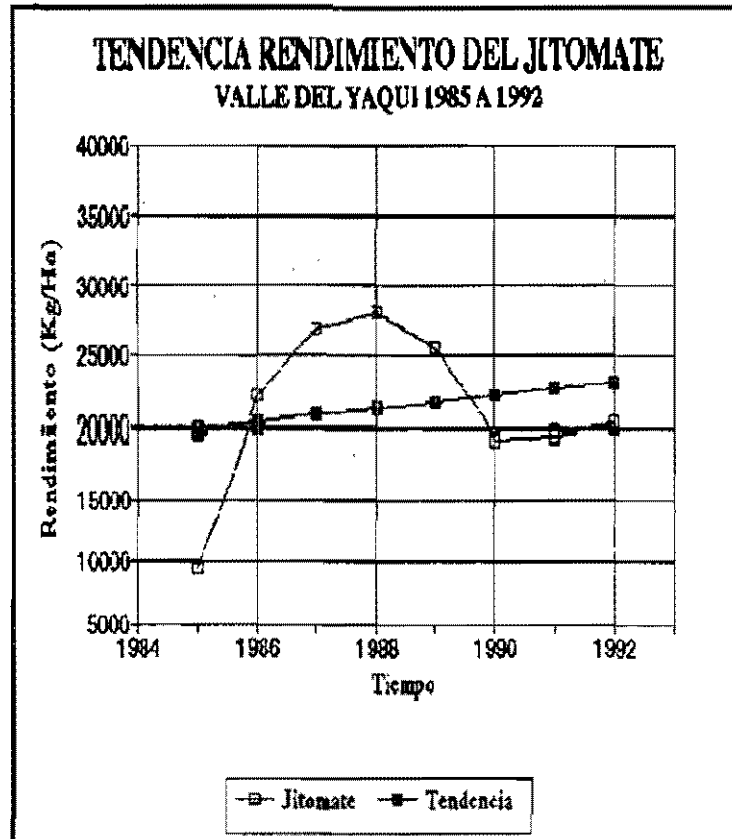
62. Tendencia de incremento en el rendimiento del trigo



63. Tendencia de incremento en el rendimiento de la sandía



64. Tendencia de incremento en el rendimiento de la cebolla



65. Tendencia de incremento en el rendimiento del jitomate

APENDICE C

COEFICIENTES DE CONTINGENCIA Y ANALISIS DE TENDENCIA CON PROMEDIOS MOVILES

• Contingencia estadística

Supóngase dos grupos de valores A y B que no tienen relación entre ellos, por lo tanto se tiene para todo valor de m y n la siguiente ecuación:

$$(A_m B_n) = \frac{\left(\begin{array}{|c|} \hline A_m \\ \hline \end{array} \right) \left(\begin{array}{|c|} \hline B_n \\ \hline \end{array} \right)}{N} = (A_m B_n)_o \dots (44)$$

Si A y B tienen alguna relación de dependencia, $(A_m B_n)$ y $(A_m B_n)_o$ no serán idénticos para todos los valores de m y n . La diferencia se puede representar por:

$$\delta_{mn} = (A_m B_n) - (A_m B_n)_o \dots (45)$$

Las propiedades que se cumplen para la ecuación 45 son:

- a) δ_{mn} es distinto de δ_{nm}
- b) No todas las δ son algebraicamente independientes

Por ejemplo para cada valor de m se tiene:

$$\begin{aligned} \delta_{m1} + \delta_{m2} + \delta_{m3} + \dots + \delta_{mn} + \delta_{mt} &= (A_m B_1) - \frac{(A_m)(B_1)}{N} + (A_m B_2) - \frac{(A_m)(B_2)}{N} \dots + \frac{(A_m B_t)}{N} = \\ &= (A_m) - \frac{(A_m)}{N} [(B_1) + (B_2) + \dots + (B_t)] = 0 \dots (46) \end{aligned}$$

La ecuación 46 se cumple para cada valor de n .

Si hay s cantidades de δ . En función de las ecuaciones 44, 45 y 46 para cada valor de m sólo $t-1$ de las t cantidades δ_{mn} son independientes. De la misma manera, para cada n sólo $s-1$ son independientes. Por lo tanto el número total de δ independientes es: $(s-1)(t-1)$.

La relación anterior indica la extensión de la asociación y se puede expresar a través de un coeficiente, que tiene que ser independiente de los signos de los números δ .

Si se define:

$$X^2 = \sum \left(\frac{\delta^2_{mn}}{(A_m B_n)_o} \right) \dots (47)$$

Donde X^2 es el cuadrado de la contingencia.

También se puede definir el cuadrado medio de la contingencia como:

$$\psi = \frac{X^2}{N} \dots (48)$$

Debe notarse que las relaciones anteriores no pueden ser negativas. Tendrán un valor de cero si todos los valores de δ lo son, entonces A y B serán independientes, es decir su contingencia o relación es nula.

Debido a que los límites de la ecuación 48 varían según el caso, Karl Pearson (G. Udney, Kendall, 1959) propuso el coeficiente de contingencia (C) definido de la siguiente manera:

$$C = \sqrt{\frac{X^2}{N+X^2}} = \sqrt{\frac{\psi^2}{1+\psi^2}} \dots (49)$$

El coeficiente C crece con X^2 y tiende a uno, sin llegar a alcanzar dicho límite (ver tabla 19). En realidad el valor máximo que puede llegar a alcanzar depende de s y t, solo llega a valer la unidad cuando el número de clases es infinito (G. Udney, Kendall, 1959).

Iguando la ecuación 47 y 48, despejando X^2 y sustituyendo δ^2_{mn} por $(A_m B_n)$ y $(A_m B_n)_o$ se tiene:

$$X^2 = \sum \left[\frac{(A_m B_n)^2}{(A_m B_n)_o} \right] - N \dots (50)$$

Sustituyendo la sumatoria por S se tiene la ecuación de contingencia:

$$C = \sqrt{\frac{S-N}{S}} \dots (51)$$

Como se puede observar en la ecuación 51 el valor de contingencia C nunca llega a uno. Se considera que valores de contingencia $0.10 < C < 0.707$ son adecuados (ver tabla 19). Si existe contingencia entre un evento A y un evento B, significa que B tiene cierta dependencia de A.

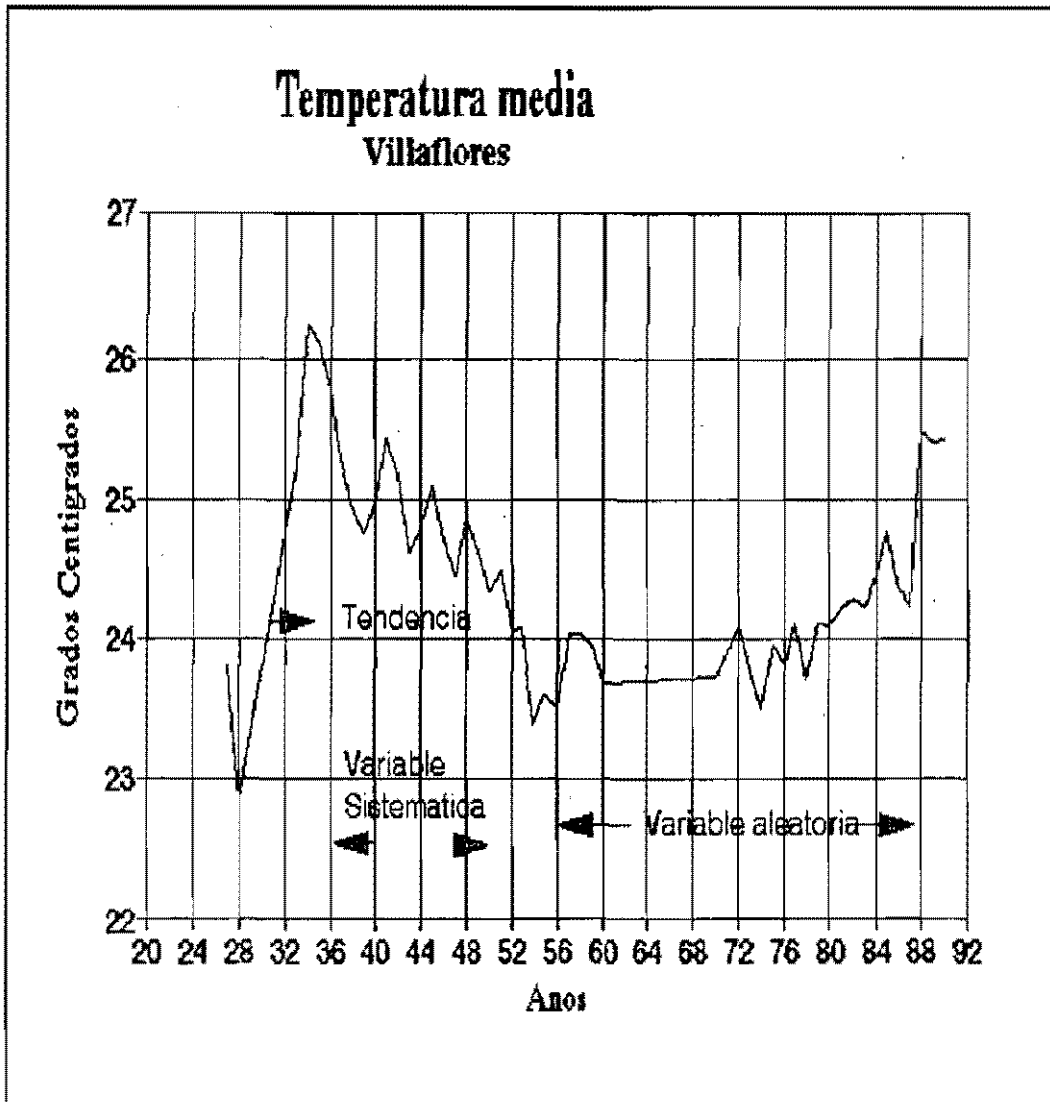
Tabla 19 Valores de contingencia (C)

Número de valores (columnas) a correlacionar	Valores de C
2	0.707
3	0.616
4	0.866
5	0.894
6	0.913
7	0.926
8	0.935
9	0.943

● Análisis de tendencia con el método de promedios móviles

Para analizar las características numéricas de una cierta variable y su comportamiento en el tiempo se pueden utilizar series cronológicas o de tiempo. Una serie de tiempo (t) se caracteriza por tres elementos (G. Undy, Kendall, 1959) (ver fig. 66):

- movimiento a largo plazo (tendencia)(ej. función exponencial: $I = ab^n$).
- movimiento sistemático a corto plazo (picos mas o menos uniformes).
- componente aleatoria (variación no uniforme en los picos).



66 Componentes de una serie cronológica

El primer paso para el análisis de series de tiempo consiste en separar las componentes antes mencionadas.

● Análisis de tendencias

a) Si la variable a analizar tiene una tendencia a largo plazo se puede ajustar por un polinomio del tipo (G. Undy, Kendall, 1959):

$$p = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_{nt}^n \dots (52)$$

b) Sin embargo en el caso de las series de tiempo (información climática) es más conveniente utilizar el **método de promedios móviles**, debido a que ajustan de mejor manera las tendencias. Los polinomios antes mencionados (ecuac. 52) tienden a exagerar las oscilaciones al inicio y al final de una curva.

● Ejemplo de análisis con promedios móviles

Ajustar con promedios móviles la curva de la figura 66 (ver tabla 20):

- a) Definir la variable independiente (col. A)
- b) Definir la variable dependiente (col. D)
- c) Realizar el promedio móvil de la variable dependiente (col. F) mediante la ecuación:

$$Pm_n = \frac{\sum_{t=n}^{n+4} t}{n+4} \dots (53)$$

donde n = 1 hasta el último valor de t_{media}.

La ecuación 53 es aplicable si las variaciones de los picos a través del tiempo es de 5 años. En el caso de la figura 66 se tomó como criterio (solo como caso de ejemplo) realizar un promedio móvil de 7ª (fase de tendencia, fig.66) y luego promedios móviles de 2ª (sumar valores de t_{media} cada dos y dividirlos entre dos, según la ecuación 53).

Tabla 20 Ejemplo numérico

Villaflares				Promedio	división
Año (A)	Tmax (B)	Tmin (C)	Tmed (D)	Móvil (E)	entre 5 (F)
27	29,02	18,59	23,81	175,32 ^a	25,04571
28	30,57	15,13	22,85	49,7 ^b	24,85
33	31,36	19,1	25,23	49,72	24,86
34	33,8	18,65	26,23	50,39	25,195
35	33,58	18,63	26,11	50,6	25,3

36	33,69	17,89	25,79	49,78	24,89
37	36,02	14,58	25,3	49,39	24,695
38	32,59	17,28	24,94	49,88	24,94
39	32,04	17,48	24,76	49,81	24,905
40	32,17	17,75	24,96	49,15	24,575
41	32,41	18,45	25,43	49,31	24,655
42	32,03	18,3	25,17	49,49	24,745
43	31,63	17,58	24,61	48,95	24,475
44	31,92	17,63	24,78	48,8	24,4
45	32,23	17,97	25,1	48,53	24,265
46	31,21	18,2	24,71	48,13	24,065
47	30,43	18,45	24,44	47,45	23,725
48	30,92	18,81	24,87	46,99	23,495
49	30,98	18,25	24,62	47,1	23,55
50	30,62	18,04	24,33	47,52	23,76
51	30,8	18,14	24,47	48,06	24,03
52	31,04	17,07	24,06	47,98	23,99
53	31,36	16,78	24,07	47,63	23,815
54	31,05	15,7	23,38	47,41	23,705
55	31,19	16,03	23,61	47,81	23,905

• Analisis de regresión lineal simple

Después de aplicar promedios móviles se realiza la regresión lineal simple y se obtiene el valor de r^2 (coef. de regresión).

APENDICE D

COEFICIENTES DE CULTIVO K_c CORRESPONDIENTE A CULTIVOS EXTENSIVOS Y DE HORTALIZAS EN DIFERENTES FASES DE DESARROLLO Y SEGUN LAS CONDICIONES CLIMATICAS PREDOMINANTES¹

Cultivo	Humedad (%)	Hr > 70	Hr > 70	Hr < 20	Hr < 20
	Viento (m/s)	0-5	5-8	0-5	5-8
Todos los cultivos extensivos	Fase de desarrollo inicial:1 Desarrollo:2 Medio:3 Final:4	Utilizar las ecuaciones (2) a (17)	Utilizar las ecuaciones (2) a (17)	Utilizar las ecuaciones (2) a (17)	Utilizar las ecuaciones (2) a (17)
Alcachofa (cultivadas limpias)	3 4	0.95 0.90	0.95 0.90	1.0 0.95	1.05 1.0
Cebada	3 4	1.5 0.25	1.1 0.25	1.15 0.20	1.20 0.20
Frijoles verdes	3 4	0.95 0.85	0.95 0.85	1.0 0.90	1.05 0.90
Frijoles secos	3 4	1.05 0.30	1.10 0.30	1.15 0.25	1.20 0.25
Remolacha (de mesa)	3 4	1.0 0.90	1.0 0.90	1.05 0.95	1.1 1.0
Zanahorias	3 4	1.0 0.70	1.05 0.75	1.10 0.80	1.15 0.85
Ricino	3 4	1.05 0.50	1.10 0.50	1.15 0.50	1.20 0.50
Apio	3 4	1.0 0.90	1.05 0.95	1.10 1.0	1.15 1.05
Maíz dulce	3 4	1.05 0.95	1.10 1.0	1.15 1.05	1.20 1.10
Maíz (grano)	3 4	1.05 0.55	1.10 0.55	1.15 0.60	1.20 0.60

Algodón	3	1.05	1.15	1.20	1.25
	4	0.65	0.65	0.65	0.70
Crucíferas (Coliflor)	3	0.95	1.0	1.05	1.10
	4	0.80	0.85	0.90	0.95
Pepino (fresco, cosechado a máquina)	3	0.90	0.90	0.95	1.0
	4	0.70	0.70	0.75	0.80
Calabazas	3	0.90	0.90	0.95	1.0
	4	0.70	0.70	0.75	0.80
Remolacha azucarera	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	0.90	0.95	1.0	1.0
Girasol	3	1.05	1.10	1.15	1.20
	4	0.40	0.40	0.35	0.35
Tomates	3	1.05	1.1	1.15	1.20
	4	0.25	0.25	0.20	0.20
Trigo	3	1.05	1.10	1.15	1.20
	4	0.25	0.25	0.20	0.20

APENDICE E

DURACION DEL PERIODO VEGETATIVO Y FASES DE DESARROLLO DE DETERMINADOS CULTIVOS EXTENSIVOS Y ALGUNAS INDICACIONES AL RESPECTO².

Alcachofas	Perenne, se vuelve a plantar cada 4-7 años; por ejemplo, en el litoral de California, plantada en abril, 40/40/250/30 y (360) ³ ; cultivos subsiguientes cortándose a ras del suelo a finales de la primavera de cada año, al final de la recolección, 20/40/220/30 y (310).
Cebada	Y también el trigo y la avena; cambia mucho en función de la variedad; trigo en el centro de la India: plantación en noviembre 15/25/50/30 y (120); climas semiáridos, 35°-45° de latitud: siembra a principios de primavera, y plantación en noviembre en Corea del Sur 20/25/60/30 y (135); trigo en las tierras altas de Africa Oriental a 2,500 metros de altitud sembrado en julio y en Corea del sur 15/30/75/40 y (150).
Frijoles verdes	Plantación en febrero y marzo en el desierto de California y el mediterráneo 20/30/30/10 y (90); plantación en agosto a septiembre en el desierto de California, Egipto, litoral del Líbano 15/25/25/10 y (75).
Frijoles secos	En climas continentales plantación a finales de la primavera 20/30/40/20 y (110); plantación en junio en el centro de California y en el Pakistán occidental 15/25/35/20 y (95); variedades de más tiempo 15/25/50/20 y (110).
Remolacha de mesa	Plantación en primavera en el mediterráneo 15/25/20/10 y (70); plantación a principios de la primavera en climas mediterráneos y antes del frío en los climas desérticos 25/30/25/10 y (90).
Zanahorias	Estación cálida en climas semiáridos o áridos 20/30/30/20 y (100), en la estación fría hasta 20/30/80/20 y (160); plantación a principios de la primavera en climas mediterráneos 25/35/40/20 y (120) hasta 30/40/60/20 y (150) en los casos de plantación a finales del invierno.
Ricino	Climas semiáridos y áridos, plantación en primavera 25/40/65/50 y (180).

² FAO 24, 1976

³ 40/40/250/30 y (360) corresponden, respectivamente, a las fases inicial, de desarrollo de cultivo, de mediados de período, y de finales de período, en días, y (360) al período vegetativo total, desde la plantación hasta la recolección, en días.

CONTINUACION DEL APENDICE E:

Apio	Plantación antes del frío en climas semiáridos 25/40/95/20 y (180); estación fría 30/55/105/20 y (210); mediados de estación en climas mediterráneos húmedos 30/40/45/15 y (125).
Maíz dulce	En Filipinas, plantación a principios de marzo (final de la estación seca) 20/20/30/10 y (70); plantación a finales de la primavera en el mediterráneo 20/25/25/10 y (80); plantación al final de la estación fría en climas desérticos 20/30/30/10 y (90); plantación a principios de la estación fría en climas desérticos 20/30/50/10 y (110).
Maíz (grano)	Plantación en primavera en las tierras altas de Africa Oriental 30/50/60/40 y (180); plantación a finales de la estación fría en los climas desérticos cálidos 25/40/45/30 y (140); plantación en junio en las tierras subhúmedas de Nigeria, a principios de octubre en la India 20/35/40/30 y (125); plantación a principios de abril en Sevilla (España) 30/40/50/30 y (150).
Algodón	Plantación en marzo en Egipto, en abril-mayo en el Pakistán, en septiembre en el sur de Arabia 30/50/60/55 y (195); plantación en primavera, recolección mecánica en Texas 30/50/45/45 y (180).
Crucíferas	Amplia variación de la estación, debido a las diferencias entre variedades; plantación en primavera en climas mediterráneos y continentales 20/30/20/10 y (80); plantación a finales del invierno en el mediterráneo 25/35/25/10 y (95); plantación en otoño en el litoral mediterráneo 30/35/90/40 y (135).
Pepino	Plantación en junio en Egipto, en agosto y octubre en el desierto californiano 20/30/40/15 y (105); plantación en primavera en climas semiáridos y áridos en la estación fría, en tierras desérticas bajas, 25/35/50/20 y (130).
Berenjena	Plantación en invierno en climas desérticos cálidos 30/40/40/20 y (130); plantación a finales de primavera y principios de verano en el mediterráneo 30/45/40/25 y (140).

CONTINUACION DEL APENDICE E:

Lino	Plantación en primavera en climas de invierno frío 25/35/50/40 y (150); plantación antes del frío en la tierras desérticas bajas de Arizona 30/40/100/50 y (220).
Granos	Plantación en primavera en el mediterráneo 20/30/60/40 y (150); plantación en octubre y noviembre en climas de invierno cálido; en el Pakistán y zonas desérticas bajas 25/35/65/40 y (165).
Lentejas	Plantación en primavera en climas de invierno frío 20/30/60/40 y (150); plantación antes del frío en climas de invierno cálido 25/35/70/40 y (170).
Lechuga	Plantación en primavera en climas mediterráneos 25/35/15/10 y (75) y plantación a finales de invierno 30/40/25/10 y (105); plantación a principios de la estación fría en climas desérticos de tierras bajas a partir de 25/35/30/10 y (100); plantación al final de la estación fría, en tierras desérticas bajas 35/50/45/10 y (140).
Melones	Plantación a finales de primavera en climas mediterráneos 25/35/40/20 y (110); plantación a la mitad del invierno en climas de tierras desérticas bajas 30/45/65/20 y (130).
Mijo	Plantación en junio en el Pakistán 15/25/40/25 y (105); en las llanuras centrales de Estados Unidos plantación en primavera 20/30/55/25 y (140).
Avena	Véase cebada.

CONTINUACION DEL APENDICE E:

Cebollas secas	Plantación en primavera en climas mediterráneos 15/25/70/40 y (150); plantación antes del invierno cálido, en climas desérticos semiáridos y áridos 20/35/110/45 y (210).
Cebollas verdes	25/30/10/5 y (70), y 20/45/20/10 y (95) respectivamente.
Maní (cacahuete)	Plantación en la estación seca en Africa Occidental 25/35/45/25 y (130); plantación a finales de primavera en las llanuras del litoral del Líbano e Israel 35/45/35/25 y (140).
Guisantes (arvejas)	En climas marinos fríos, plantación a principios del verano 15/25/35/15 y (90); a principios de la primavera en climas mediterráneos y climas desérticos de invierno cálido 20/25/35/15 y (95); plantación a finales del invierno en el mediterráneo 25/30/30/15 y (100).
Pimientos	Plantación a principios de primavera en climas mediterráneos frescos y a principios del verano en climas continentales 30/35/40/20 y (125); plantación a mediados de primavera en climas continentales costeros fríos 25/35/40/20 y (120); plantación al principio de inviernos cálidos en climas desérticos 30/40/110/30 y (210).
Patata Irlandesa	Plantación completa en climas desérticos, en inviernos cálidos, 25/30/30/20 y (105); plantación a finales de invierno en climas áridos y semiáridos y plantación a finales de primavera y principios de verano en climas continentales 25/30/45/30 y (130); plantación a principios ó a mediados de primavera en Europa central 30/35/50/30 y (145); una nacencia lenta puede aumentar la duración de la fase inicial en 15 días durante las primaveras frías.
Rábanos	Plantación a principios de la primavera en el mediterráneo y en el verano en climas continentales 5/10/15/5 y (35); plantación a finales de invierno en el litoral mediterráneo y en los climas desérticos, en invierno cálidos 10/10/15/5 y (40).

CONTINUACION DEL APENDICE E:

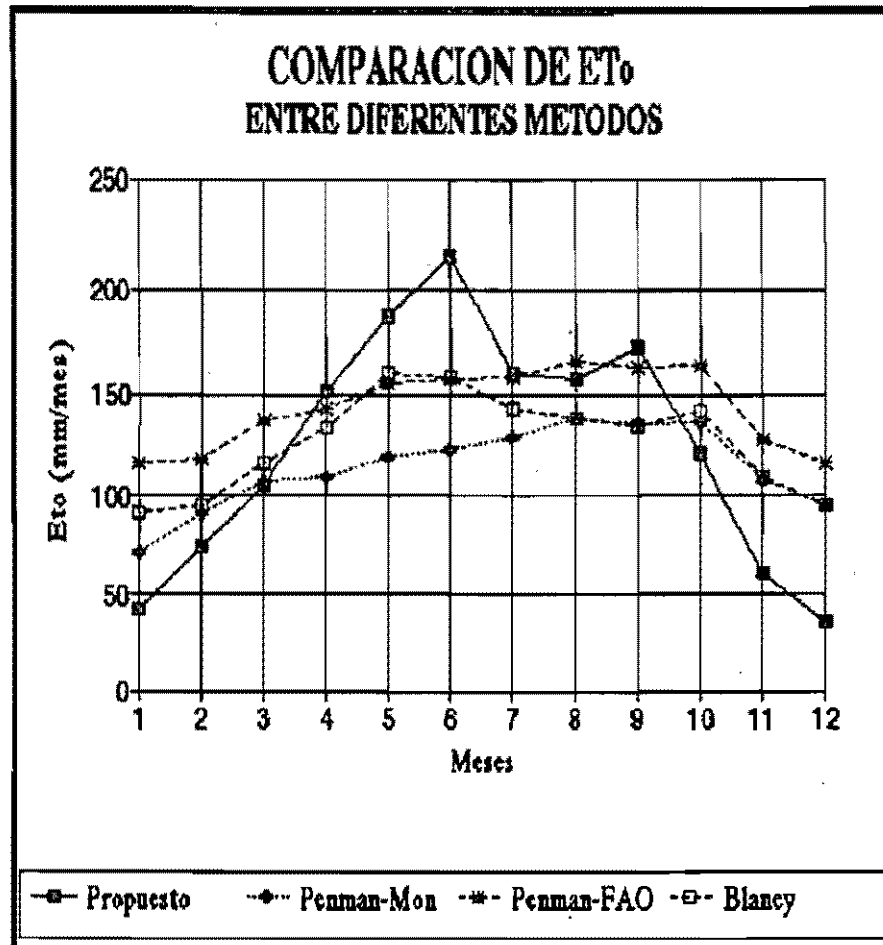
Cártamo	Plantación a principios o a mediados de la primavera en el centro de California 20/35/45/25 y (125) y plantación a finales del invierno 25/35/55/30 y (145); climas desérticos, en invierno cálidos , 35/55/60/40 (190).
Sorgo	En climas desérticos en la estación cálida 20/30/40/30 y (120); plantación a mediados de junio en Pakistán, en mayo en el centro de los EE.UU. y en el mediterráneo 20/35/40/30 y (125); plantación a principios de primavera en climas áridos cálidos 20/35/45/30 y (130).
Soya	Plantación en mayo en el centro de los EE.UU. 20/35/60/25 y (140); en mayo y en junio en el desierto de California 20/30/60/25 y (130); a fines de diciembre en Filipinas, principios de la estación seca; seca: 15/15/40/15 y (85); verde: 15/15/30/- y (60).
Espinacas	Plantación en primavera en el mediterráneo, 20/20/15/5 y (60), en septiembre y octubre y a finales de invierno en el mediterráneo 20/20/25/5 y (70); inviernos cálidos en climas desérticos 20/30/40/10 y (100).
Calabazas de invierno	Plantación a finales del invierno mediterráneo y en inviernos cálidos en los climas desérticos 20/30/30/15 y (95); plantación en los climas desérticos 20/30/30/15 y (95); plantación en agosto en el desierto californiano 20/35/30/25 y (110); a principios de junio en la Europa marítima 25/35/35/25 y (110).
Calabazas vinateras	Plantación en primavera en el mediterráneo 25/35/25/15 y (100); a principios de verano en el mediterráneo y Europa marítima 20/30/25/15 y (90+); plantación en invierno en climas desérticos cálidos 25/35/25/15 y (110).
Remolacha azucarera	Litoral del Líbano: plantación a mediados de noviembre 45/75/80/30 (230), a principios de verano 25/35/50/50 y (160); a principios de primavera en el Uruguay 30/45/60/45 y (180); a finales de invierno en climas desérticos, en invierno cálidos, 35/60/70/40 y (205).

CONTINUACION DEL APENDICE E:

Girasol	Plantación en primavera en el mediterráneo 25/35/45/25 y (130); plantación a principios del verano en el desierto californiano 20/35/45/25/ y (145).
Tomate	Inviernos cálidos en climas desérticos 30/40/40/25 y (135) y a finales de otoño 35/45/30/30 y (150); plantación en primavera en climas mediterráneos 30/40/45/30 y (145).
Trigo	Véase cebada.

APENDICE F

COMPARACION DE ET₀ ENTRE DIFERENTES METODOS



67. Comparación de Eto entre diferentes métodos

Tabla 21. Comparación de Eto total (mm/mes) entre diferentes métodos

METODO	ET ₀ (mm/mes)	% ERROR RESPECTO A 1
1. PENMAN-MONTEITH	1358.02	0 %
2. PROPUESTO	1480.491	8 %
3. PENMAN-FAO	1716.87	20 %
4. BLANEY-CRIDDLE	1512.24	10.19 %

REFERENCIAS

1. A. Benz Gerhard. (1991). Global warming and insurance industry. Nature and Resources., Vol.27, # 1.
2. Acosta G.A. (1988). El niño: sus efectos sobre el norte de México. Revista de Ingeniería Hidráulica en México. 2a. época., Vol., III, # 1. Enero-Abril.
3. Baver L.D., Gardner W.H, Gardner W.R. (1980). Física de suelos. México: UTEHA S.A de C.V. Pag. 291.
4. Bruce J.P. (1990). La atmósfera de la tierra planeta viviente. Organización Meteorológica Mundial. Págs. 5,6,7,12,20,43.
5. Biswas A.K. (1991), Water for sustainable development in the 21st. Water Resources Association, vol.16, No.4, Urbana, Ill., U.S.A.
6. Chavez Adolfo. (1977). Estudio del clima solar en la República Mexicana. Instituto de Geofísica de la UNAM: México.
7. FAO 24. (1976). Las necesidades hídricas de los cultivos. Estudio de FAO, Riego y Drenaje. Roma, Italia.
8. FAO-CNA. (1994). BD distritos de riego. México.
9. Gerencia Estatal de Sonora. (1995). Datos de aportes y extracciones a las presas del distrito de riego 041, Valle del Yaqui, Sonora. Reporte enviado a solicitud expresa del autor.
10. Gleick, P. (1987). Regional Hydrologic consequences of increases in atmospheric CO₂ and other trace gases, Climatic Change, num. 10, pp-137-161.
11. Gordon Y.T. et al. (1994). A Decision Support System for Agrotechnology Transfer. University of Hawaii: USA.
12. G. Udney and Kendall. (1959). Estadística matemática. Aguilar: Madrid, España.
13. Jensen, M.E., (1990). Arid lands-impending water population crises. Hydraulics/Hydrology of Arid Lands, Proceedings of the International Symposium, St. Diego California, July 30-August 2, ASCE.
14. Kramer J. Paul. (1974). Relaciones hídricas de suelos y plantas. EDUTEX: México.
15. Jromov S.P. (1983). Meteorología y climatología. Vneshtorgizdat: Moscú.

16. Liverman Diana., Dilley Max., O'Brien Karen., Menchaca Leticia. (1991). The impacts of climate change on maize in México. Progress Report, Department of Geography, Atmosphere Science Center, UNAM, México.
17. Llunch B.D. et al. (1992). La variación oceánica interanual en el marco del cambio climático global. Revista ciencia, # 43, núm. especial.
18. Lluch B.D., Hernández V.S., Salinas Z.C., Magallón B.F., Lachica B.F. (1991). Variación climática y oceanográfica global: sus efectos en el noroeste mexicano. Revista Ciencia y Desarrollo. Págs. 80,81,87.
19. Macera C. Omar. (1991). México y el cambio climático global: un balance crítico. Revista Ciencia y Desarrollo. Pág. 55.
20. Marcombo. (1986). Energía solar fotovoltaica. Orbis: Barcelona, España.
21. Mimikou M.A., Kouvopoulus Y.S. (1991). Regional climate impacts: Impacts on water resources. Paper presented in Open Sesion O.H.1: Hidrology at the 15th General Assembly of the European Geophysical Society, in Copenhagen, Denmark.
22. Mundo Molina Martin D. (1990). Estudio de integración y desarrollo de la zona Selva Lacandona-Marquéz de Comillas, Municipio de Ocosingo Chiapas. Primer Simposio Internacional sobre Manejo del Trópico Húmedo.
23. Mundo Molina, Martín D. y P. Martínez Austria. (1993). "Cambio climático: posibles consecuencias y algunas sugerencias para disminuir su efecto en México". Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol. VIII, No.1, 2a. Época. P.p. 14-28.
24. ONU, (1972). Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil, 3 a 14 de junio.
25. Organización Meteorológica Mundial. (1990). La OMM y el recalentamiento global. Publicación basada en el primer informe del Grupo de Trabajo I, Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC). Págs.11,24.
26. Organización Meteorológica Mundial. (1992). Cumbre de la tierra. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio Ambiente y Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil.
27. Ortiz Solorio Carlos. (1987). Elementos de agrometeorología. Universidad Autónoma de Chapingo: México.
28. Schneider S. (1991). El clima en peligro. Aguilar: México.

29. Soil Conservation Service, USA. (1987). Relación agua-planta-suelo. Diana: México.
30. IG-BP. (1991). The International Geosphere-Biosphere Programme. International Council of Scientific Union. Plant-Water interactions in large-scale hidrological modelling. Report # 17, Stockholm.
31. Thorne D.W. and Peterson H.B. (1981). Técnica del riego. C.E.C.S.A: México.
32. Torres R.E. (1984). Agrometeorología. México: Diana.