

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del Valle del Yaqui, Sonora, México (estudio preliminar indicativo).
<i>Autor / Adscripción</i>	Martín D. Mundo Molina Poliopro Martínez Austria Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 9(1): 13-33
<i>Fecha de publicación</i>	1994
<i>Resumen</i>	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. 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_{tp} y la evapotranspiración real, E_{tr} . Este incremento 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 hídrico y evitar el riesgo de stress.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1195

El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del valle del Yaqui, Sonora (estudio preliminar indicativo)

Martín D. Mundo Molina
Polioptro Martínez Austria

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

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_{to} y la evapotranspiración real, E_{tr} , 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_{to} y en E_{tr} 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 hídrico y evitar el riesgo de stress. En cuanto a las condiciones de humedad del suelo, este tendrá un déficit en los escenarios críticos de hasta un 15%. Estos resultados únicamente son indicativos, pero justifican la necesidad de realizar estudios más profundos. El modelo propuesto en este trabajo fue alimentado con datos climatológicos del observatorio ubicado en Guaymas, Sonora, México. El periodo de los datos considerados es de treinta años.

Palabras clave: cambio climático, gases de invernadero, efecto de invernadero, radiación, evapotranspiración, balance hídrico, evapotranspiración potencial.

Introducción

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 más controvertidos en la reciente Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, Brasil (OMM, 1992).

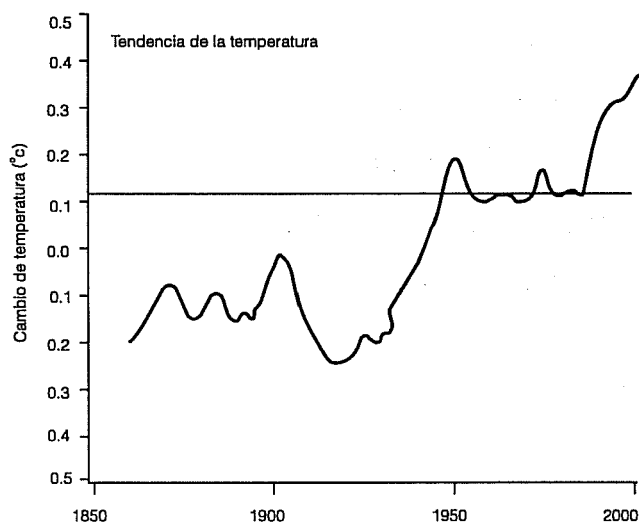
El calentamiento global, es decir, el incremento en la temperatura promedio de nuestro planeta y sus efectos potenciales, necesitan ser precisados con mayor detalle por ejemplo, en el ciclo hidrológico y la

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°C en los últimos cien años (Bruce, 1990) (OMM, 1990), como se puede observar en la ilustración 1.

El calentamiento esperado de la Tierra según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, PCCC, 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

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



próximos cuarenta o cincuenta años (OMM, 1990), dependiendo de las cantidades de CO_2 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 influyen en los cultivos a través de cuya 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 es-

tas condiciones, para evitar hasta donde sea posible sus efectos adversos y, si es el caso, aprovechar sus efectos benéficos (Mundo y Martínez-Austria, 1993).

En este trabajo se presentan diversos cálculos preliminares 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.

Área 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 ilustración 2– ubicadas entre los $26^{\circ}58'$ y los $27^{\circ}50'$ de latitud norte y entre los $109^{\circ}31'$ y los $110^{\circ}23'$ 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.

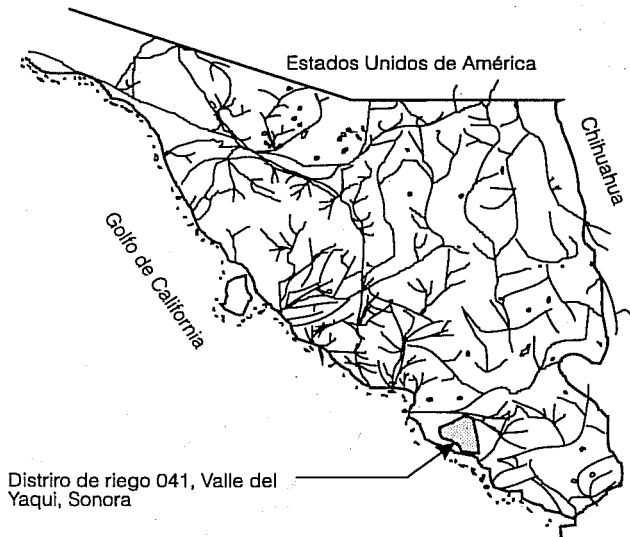
Los principales cultivos son los siguientes: trigo, cártamo, soya, ajonjolí y maíz. En el ciclo de verano se siembran, entre otros productos, soya, ajonjolí y maíz. La mayor parte de la producción agrícola se destina al consumo nacional.

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

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



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 milímetros.

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 conservación de 2989 Mm³, 2925 Mm³ y 864 Mm³ respectivamente, sumando una capacidad total de 6778 millones de metros cúbicos.

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 a la disponibilidad de agua en las presas durante el ciclo referido.

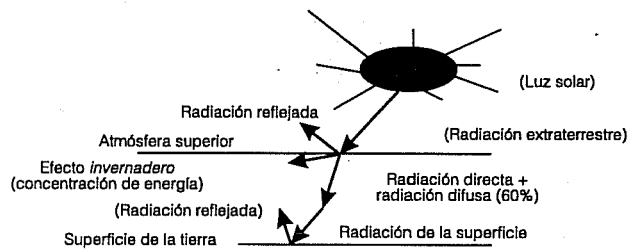
Cambio climático

Cierta radiación de onda corta reemitida por la superficie terrestre, es atrapada en la atmósfera por tres gases, principalmente: bióxido de carbono CO₂, vapor de agua y ozono O₃; pero además existen otros que atrapan dicha radiación y que también se encuentran presentes en la atmósfera como: óxido nítrico NO₂, metano CH₄, y clorofluorocarbonatos CFC, que producen el efecto *invernadero*. Ver ilustración 3.

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

3. Efecto invernadero



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 se refiere a que transitamos por un periodo de calentamiento, debido a la creciente concentración de CO₂ en la atmósfera (Lluch, 1991).

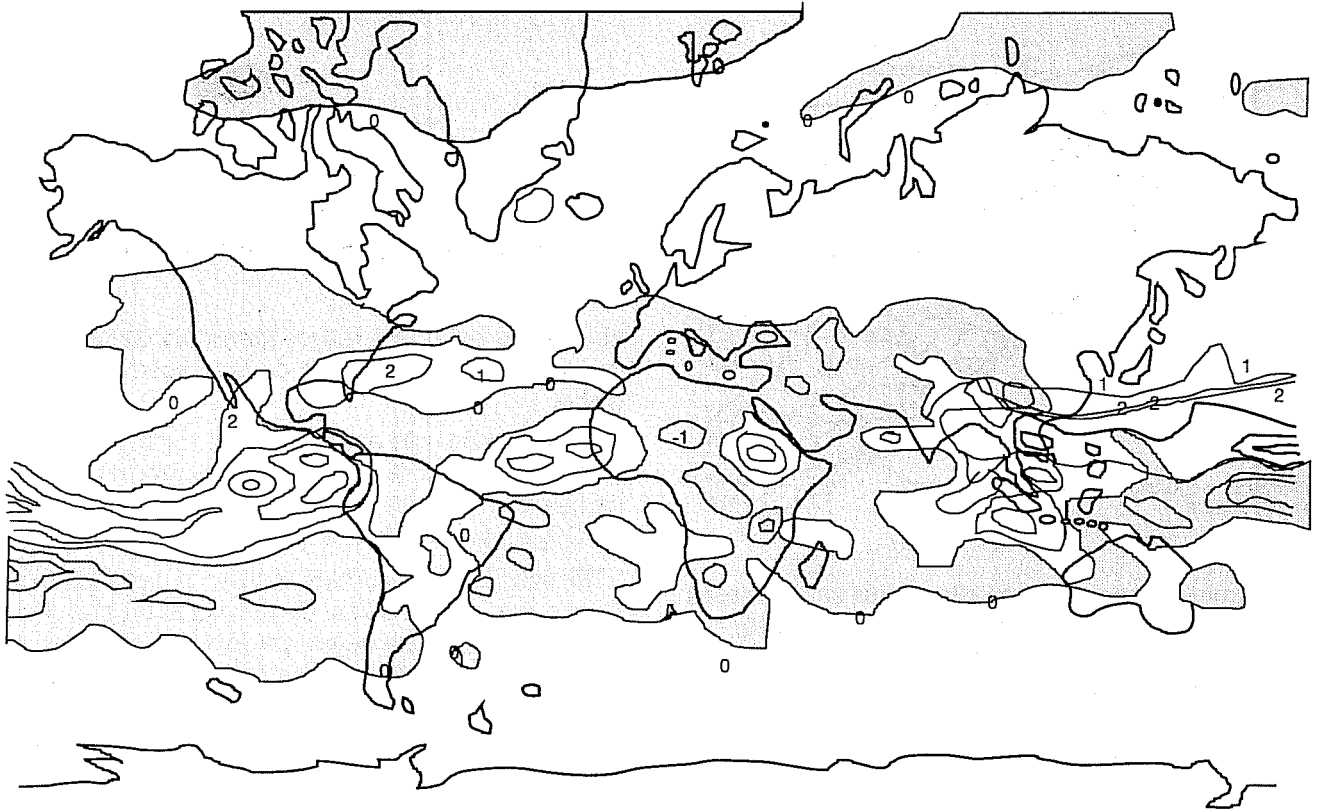
El uso de combustibles fósiles, la deforestación, ciertas técnicas agrícolas, el incremento en la producción industrial, el uso ineficiente de diversas fuentes de energía, el uso de transportes consumidores de combustibles fósiles (terrestres y aéreos), termoeléctricas, extensión de zonas ganaderas, 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 nítrico y clorofluorocarbonatos.

Como se puede apreciar en las ilustraciones 4 y 5, México se encuentra localizado en una zona en la que probablemente disminuiría la precipitación en invierno (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.

En México y América Central se esperan incrementos de 3.3 a 4.5°C (si se duplica el CO₂ atmosférico actual), 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

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



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



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 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 Kouvooulous, 1991).

Escenarios

En las simulaciones realizadas con el modelo propuesto en este trabajo, se utilizaron cuatro escenarios de cambio climático, consistentes con los presentados por el PICC (Bruce, 1990). Las hipótesis de trabajo son:

- El cambio climático es un proceso en marcha
- Se producen cambios en los patrones de precipitación, con una disminución de hasta un 10% en las zonas semiáridas del norte de México y sur de los Estados Unidos de América. Ver ilustraciones 4 y 5
- 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.

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.

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 las restricciones en las emisiones de clorofluorocarbonatos.

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 clorofluorocarbonatos.
- Se pone en marcha el concepto de desarrollo agrícola sustentable.

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 siguiente 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, 1990).

Escenario cero

Situación actual

Método propuesto para el cálculo de necesidades hídricas ante cambio climático

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 entre los antes mencionados.

En la literatura especializada se pueden consultar varios métodos para predecir las necesidades de agua de los cultivos. Su aplicación dependerá del tipo de los 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, son atrapados por los gases de invernadero (CO_2 , NH_4 , CFC , NO_2), vapor de agua (evapotranspiración) y ozono principalmente, lo cual sugiere un balance de radiación que incluya, ante diversos escenarios de cambio climático, a la temperatura como factor principal en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, y a las condiciones de balance de radiación en la superficie terrestre.
- Disponibilidad de datos. Sólo se cuenta con datos medidos de temperatura e insolación y datos estimados de humedad y viento.

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

$$Eto = a + b.(w.Rs') \quad (1)$$

donde:

Eto = evapotranspiración de los cultivos (mm/día)
 a, b = constantes de la ecuación.
 $w.Rs'$ = factor de radiación (langley).

Para obtener la Eto de los cultivos, FAO 24 recomienda una serie de relaciones (FAO 24, 1976) 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):

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

vientos diurnos moderados (2–5 m/s):

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

vientos diurnos fuertes (5–8 m/s):

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

vientos diurnos muy fuertes (8 m/s):

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

Humedad 40–55%

vientos diurnos débiles (0–2 m/s):

$$Eto = \frac{(0.974)(w.Rs')(0.65) - 0.2719}{0.65} \quad (6)$$

vientos diurnos moderados (2–5 m/s):

$$Eto = \frac{(1.051)(w.Rs')(0.65) - 0.2493}{0.65} \quad (7)$$

vientos diurnos fuertes (5–8 m/s):

$$Eto = \frac{(1.316)(w.Rs')(0.65) - 0.4618}{0.65} \quad (8)$$

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

$$Eto = \frac{(1.188)(w.Rs')(0.65) - 0.1378}{0.65} \quad (9)$$

Humedad 55–70%

vientos diurnos débiles (0–2 m/s):

$$Eto = \frac{(0.904)(w.Rs')(0.65) - 0.3068}{0.65} \quad (10)$$

vientos diurnos moderados (2–5 m/s):

$$Eto = \frac{(0.965)(w.Rs')(0.65) - 0.2655}{0.65} \quad (11)$$

vientos diurnos fuertes (5–8 m/s):

$$Eto = \frac{(1.035)(w.Rs')(0.65) - 0.2827}{0.65} \quad (12)$$

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

$$Eto = \frac{(1.086)(w.Rs')(0.65) - 0.6520}{0.65} \quad (13)$$

Humedad > 70%

vientos diurnos débiles (0–2 m/s):

$$Eto = \frac{(0.803)(w.Rs')(0.65) - 0.2801}{0.65} \quad (14)$$

vientos diurnos moderados (2–5 m/s):

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

vientos diurnos fuertes (5–8 m/s):

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

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

$$E_{to} = \frac{(0.955)(w.Rs')(0.65) - 0.0248}{0.65} \quad (17)$$

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):

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

donde:

Rs' = radiación solar (langley). En adelante todas las variables que aparecen con unidades de langley=Cal/cm²/día son convertidos a mm/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 mejor evaluación.

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 periodo de treinta años, en el valle del Yaqui.

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

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), tome 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 $w.Rs'$ de las ecuaciones (1) a (17) de la siguiente forma (Torres, 1984):

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

siendo:

$$Rs \cong Rs' \quad (20)$$

donde:

Rs = radiación efectiva o balance de radiación (langley)

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

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

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

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 en 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):

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

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):

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

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):

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

donde:

ϵ = emisividad de la superficie

T_2 = temperatura absoluta, °K (en la superficie o suelo).

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

$$Rs = (R_{dir} + R_{dif})(1 - \alpha) + \left[(0.34 + 0.079\sqrt{\epsilon})\sigma T_1^4 - \epsilon\sigma T_2^4 \right] \times \left(\frac{DD * 0.1 + DMN * .5 + DNC * .85}{DMT} \right) \quad (24)$$

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:

$$Rs = (R_{dir} + R_{dif})(1 - \gamma)1 + \left[(0.34 + 0.079\sqrt{\epsilon} - \epsilon)\sigma T^4 \right] \left[\frac{DD * 0.1 + DMN * 0.5 + DNC * 0.85}{DTM} \right] \quad (25)$$

Sustituyendo (24) si $T_1 > T_2$ 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.

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

$$E_{tr} = E_{t0} K_c \quad (26)$$

donde K_c = coeficiente del cultivo

Este método propuesto fue contrastado con Penman y su error de aproximación en cálculos para el escenario cero (sin incrementos de temperatura) es de más menos dos por ciento.

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 y emisividad terrestre ϵ .

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 y necesita valores medidos de temperatura, humedad relativa y nubosidad.

Análisis 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.

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, 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, 20, 25, 30 y 30%, respectivamente, en cada escenario.

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 periodo de máximas demandas o periodo punta (agosto).

Balance de agua en el suelo o condiciones de humedad

Ante 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 periodo punta (agosto).

Disponibilidad de agua para el riego

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

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

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 ilustración 6 y en el cuadro 1, existe una tendencia de incremento de los valores de E_{to} y E_{tr} entre el escenario cero y el escenario crítico (A y A BIS), de 295.07 mm/mes a 334.14 mm/mes y de 271.46 mm/mes a 307.41 mm/mes, respectivamente.

La diferencia entre estos valores representa el 14% más de evapotranspiración real y potencial del maíz,

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

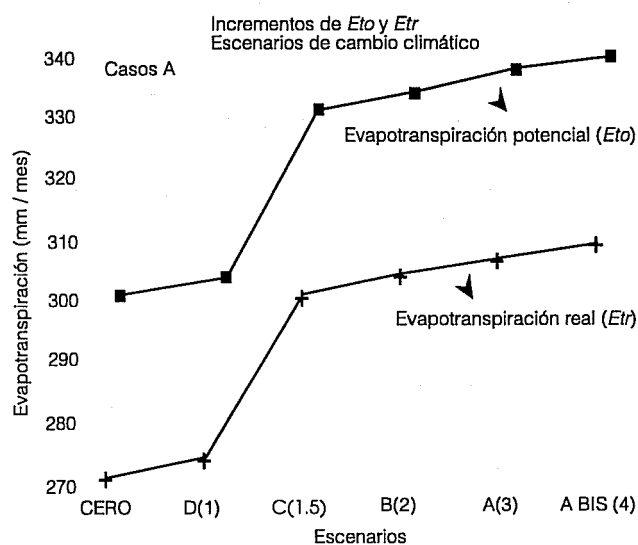
Escenario	E_{to} (mm/mes)	% ^b	E_{tr}	% (mm/mes)
cero ^c	295.07	0.	271.46	0.
D(1) ^d	297.39	10.39	273.60	10.39
C(1.5)	327.05	10.83	300.88	10.83
B(2)	328.39	11.29	302.12	11.29
A(3)	331.20	12.24	304.70	12.24
A BIS(4)	334.14	13.24	307.41	13.14

^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.

6. Incrementos de E_{to} y E_{tr} , casos A



del escenario cero respecto al escenario crítico (A y A BIS).

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 perdida, se pondría a los cultivos en peligro de agotamiento por las siguientes razones:

- Cambio en la frecuencia de los riegos: Dado un incremento de E_{to} y E_{tr} se modifica el balance de agua en el suelo. Ver ecuación 43. Incrementándose el valor de las pérdidas E_{tr} , se incrementa a la vez el valor de balance hídrico B_h , el cual representa la lámina de agua que habrá que reponer al cultivo mediante el riego. Con el incremento del B_h , 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 14% 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 tradicionalmente 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:

- hr, e, E, R_s aumentan con la temperatura
- La precipitación no disminuye en todos los escenarios
- La nubosidad aumenta 10, 20, 25, y 30% para los escenarios D, C, B, A y A BIS respectivamente.

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.

Lo anterior puede notarse en la ilustración 7 y en el cuadro 2, en donde efectivamente, existe una tendencia de incremento de los niveles de evapotranspiración E_{tr} y E_{to} , sin embargo, estos incrementos son del orden del 3%, del escenario cero respecto al crítico (A y A BIS).

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).

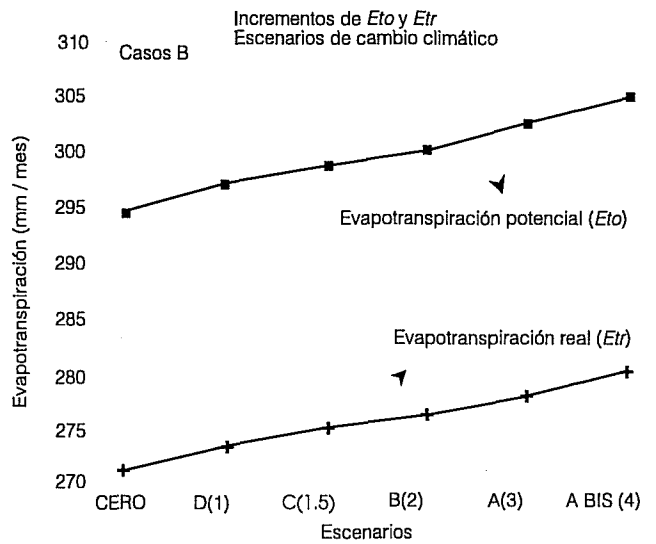
Casos A, condiciones de la simulación:

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

2. E_{tr} y E_{to} , escenarios de cambio climático, casos B

Escenario	E_{to} (mm/mes)	%	E_{tr} (mm/mes)	%
cero	295.07	0	271.46	0
D(1)	297.39	0.78	273.60	0.78
C(1.5)	327.05	1.19	274.71	1.19
B(2)	328.39	1.61	275.85	1.61
A(3)	331.20	2.48	278.21	2.48
A BIS(4)	334.14	3.40	280.70	3.40

7. Incrementos de E_{to} y E_{tr} , casos B



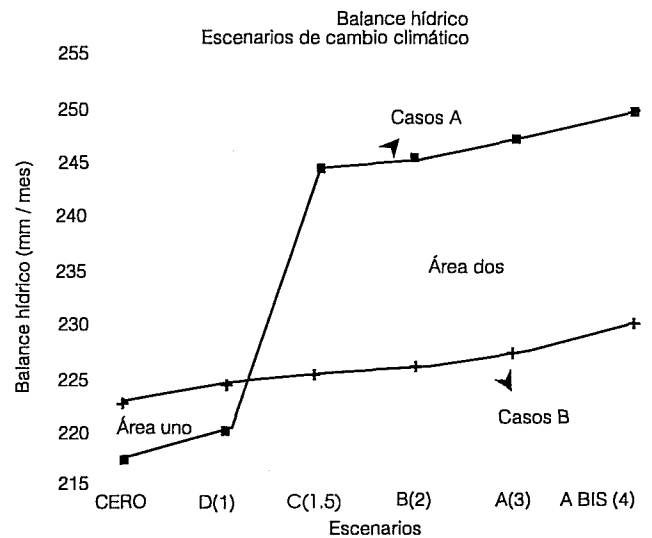
- La nubosidad NU no cambia

Casos B, condiciones de la simulación:

- hr, e, E, R_s aumentan con la temperatura
- La precipitación no disminuye en todos los escenarios
- La nubosidad aumenta 10, 20, 25 y 30% para los escenarios D, C, B, A y A BIS.

Los valores de la ilustración 8 y del cuadro 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 15% aproximadamente, entre el escenario cero (actual) y el crítico (A y A BIS).

8. Incrementos del balance hídrico (Bh)



3. Incrementos del balance hídrico

Escenario	Casos A		Casos B	
	Bh (mm/mes)	%	Bh (mm/mes)	%
cero	218.25	0	222.52	0
D(1)	220.16	0.90	224.46	0.90
C(1.5)	244.53	12.0	225.47	1.32
B(2)	245.63	12.6	226.50	1.80
A(3)	247.92	13.6	228.63	2.8
A BIS(4)	250.33	14.7	230.89	3.8

Sin embargo, bajo condiciones de aumento de nubosidad, humedad relativa y tensión de vapor en la región (casos B), este porcentaje disminuye notablemente. Ver ilustración 8 y cuadro 3. Debe notarse que la diferencia máxima en porcentaje entre el escenario cero y el crítico (A y A BIS) es del 4%, aproximadamente.

Esto indica que en los casos A, se necesitaría más agua que reponer, en un porcentaje de hasta 15%, 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.

El área entre las curvas de los casos A y B de la ilustración 8 (área dos), multiplicado por la superficie sembrada con maíz en el valle del Yaqui, representa el déficit de agua en volumen, en cada escenario de cambio climático.

• 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:

- Periodo 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 ilustración 9 y el cuadro 4 podrán observarse los volúmenes de agua requeridos por el maíz, en el período punta (agosto), para los diferentes escenarios.

Podrá notarse una diferencia de 15% aproximadamente, entre el volumen de agua demandado por el maíz en el período punta para el escenario cero, respecto a los escenarios críticos (A y A BIS). Lo anterior

implica una diferencia de 70 650 000 m³ de agua entre el escenario actual (escenario cero) y el escenario crítico (A y A BIS). El volumen anterior representa el 8% de la capacidad de la presa La Angostura, la cual posee un volumen de conservación de 864 000 000 metros cúbicos.

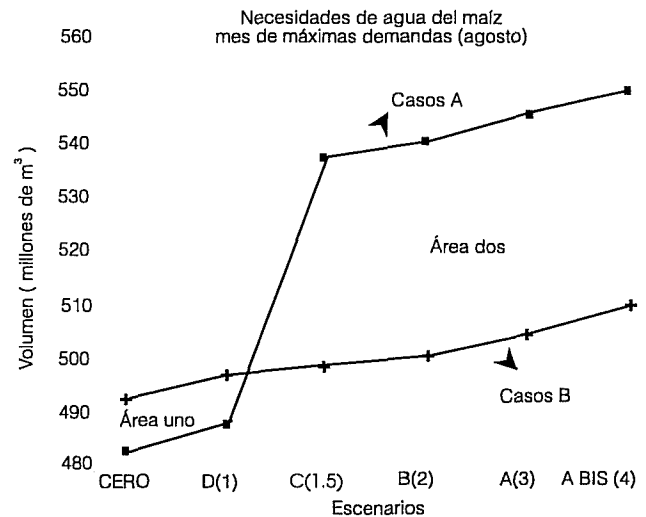
En la ilustración 10 y el cuadro 5 podrán observarse los volúmenes demandados por el maíz en su ciclo vegetativo completo, es decir, desde su plantación hasta su cosecha.

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 267 100 000 m³, que representa el 31% de la 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.

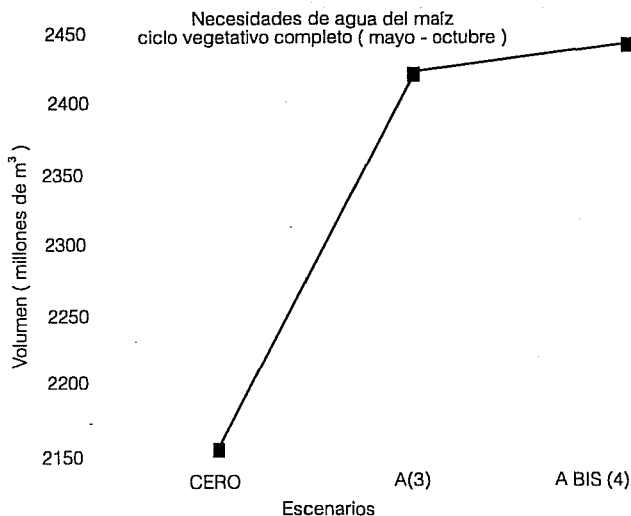
9. Volúmenes de agua requeridos en diferentes escenarios de cambio climático



4. Volúmenes de agua requeridos en los diversos escenarios

Escenario	Mes	Superficie (ha)	Casos A		Casos B	
			Volumen (Mm³)	%	Volumen (Mm³)	%
cero	Agosto	220 000	480.150	0	489.544	0
D(1)	"	"	484.400	0.88	493.812	0.90
C(1.5)	"	"	537.970	12.04	496.034	1.30
B(2)	"	"	540.400	12.54	498.300	1.80
A(3)	"	"	545.500	13.61	502.986	2.80
A BIS(4)	"	"	550.800	14.80	507.958	3.80

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



5. Volúmenes de agua requeridos en los escenarios críticos

Escenario	Mes	Superficie (ha)	Volumen (m³)	%
cero	Ciclo completo	220 000	2158 700 000	0
A(3)	"	"	2425 800 000	12.40
A BIS (4)	"	"	2446 224 000	13.31

Si se dieran 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 será de 33.2% de la capacidad de la presa La Angostura, es decir, 287 524 000 m³ más, respecto al escenario actual, mostrado en el cuadro 5.

Conclusiones

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* 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.

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 quince 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:

- *Periodo de máximas demandas (agosto)*

Se necesitará un volumen de agua deficitario de aproximadamente 8% de la capacidad de la presa La Angostura, lo que representa un volumen de 70 650 000 m³, en el escenario crítico.

- *Ciclo vegetativo completo del maíz*

Se necesitará de un volumen de agua deficitario de aproximadamente 31 a 33.2% de la capacidad de la presa La Angostura, lo que representa un volumen en los escenarios críticos de entre 267 100 000 m³ y 287 524 000 m³, respectivamente.

Estos resultados únicamente son indicativos, pero justifican la necesidad de realizar estudios más profundos. En este estudio preliminar 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 se plantean las siguientes propuestas:

- Iniciar programas de prevención para disminuir efectos futuros de un posible cambio climático. No es necesario esperar a que los modelos tengan una certeza del 100%, cuando se pueden tomar acciones de prevención, estudios e investigaciones, que nos den una perspectiva de cómo enfrentar o adaptarnos mejor a un cambio climático, o por lo menos saber qué podemos esperar del futuro.
- Iniciar programas a corto y a mediano plazos de desarrollo agrícola sustentable.
- Investigaciones sobre nuevas variedades de cultivos, resistentes a: sequías, nuevas condiciones de

humedad, resistencia a plagas y mayores condiciones de salinidad.

- Planes de riego con déficit hídrico
- Adecuación de los modelos de cálculo de necesidades hídricas de los cultivos actuales, ante la perspectiva de cambio climático (modelos de simulación biológica).
- Programas de aplicación directa a corto y a mediano plazos de uso eficiente del agua en actividades de riego.
 - Programas de medición
 - Medición volumétrica
 - Tarifas reales de consumo
 - Operación y manejo de canales
 - Aplicación y distribución del agua por parcela
- Planes de adiestramiento y administración del agua
- Proyectos de investigación sobre la variación de factores climáticos como temperatura y precipitación en zonas áridas, para establecer tendencias de cambio climático por región.
- Intercambio de información con organismos internacionales sobre cambio climático.
- Proyectos de investigación sobre el cambio climático y sus efectos potenciales sobre los recursos hídricos y la agricultura.
- El tema es de interés científico, y además nos incumbe a todos los seres que habitamos este planeta. De la adecuada planeación de nuestros recursos dependerá nuestro bienestar y una mejor adaptación a los cambios del clima.

ANEXO

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 potencial y real 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

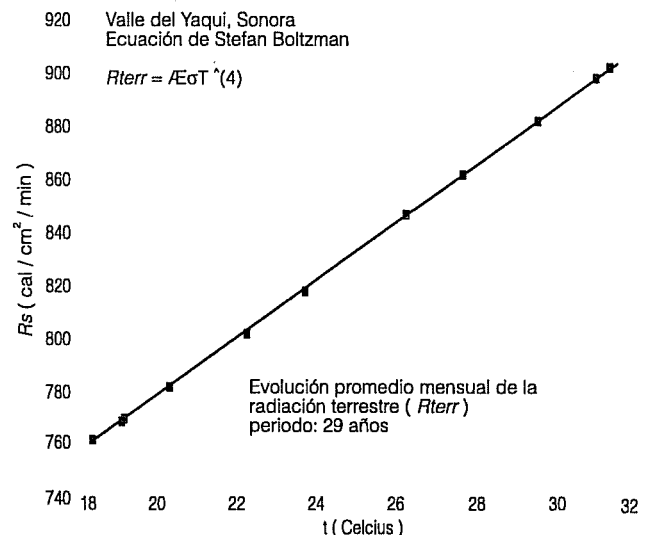
Los niveles de temperatura del suelo y medio ambiente influyen directamente en el balance de radiación terrestre, como se muestra en la ilustración 11, y este, a su vez, en las necesidades de agua de los cultivos y condiciones de humedad del suelo.

El valle del Yaqui tiene una abundante insolación durante casi todo el año y registra temperaturas elevadas durante el periodo junio-agosto principalmente.

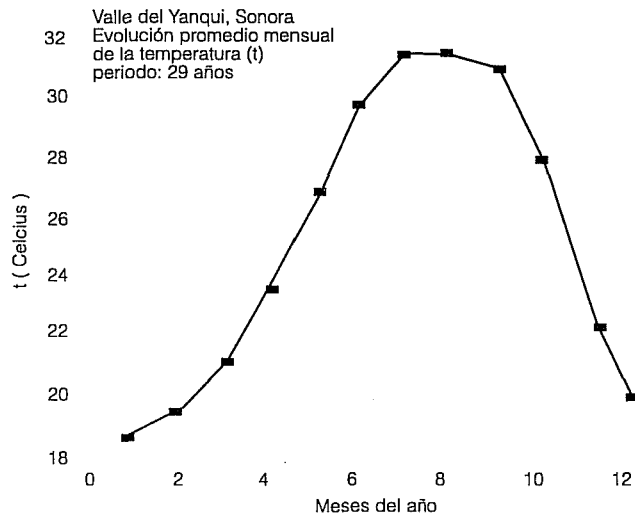
En la ilustración 12 se puede ver la evolución de la temperatura en un lapso de treinta años.

En general, a mayor temperatura, para las mismas condiciones de las otras variables climáticas, mayor evapotranspiración.

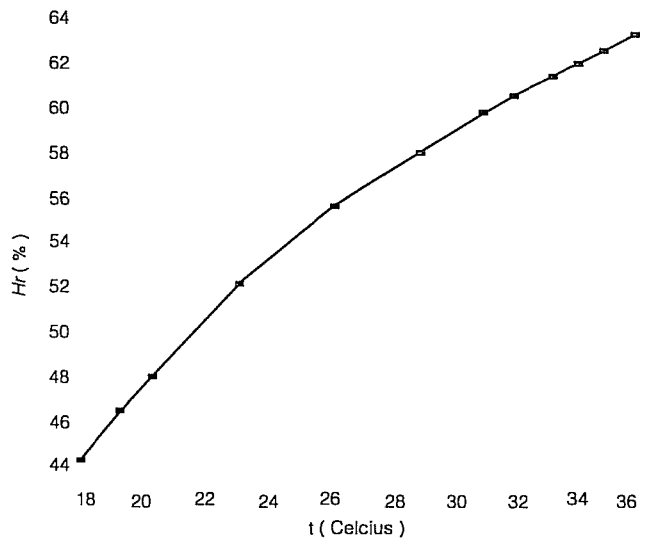
11. Influencia de la temperatura en la radiación



12. Evolución mensual de la temperatura en un periodo de treinta años



13. Variación de la humedad relativa con la temperatura



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:

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

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):

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

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

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

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

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:

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

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):

$$e = E^f - cp(t - t') \quad (31)$$

$$E = 6.11 * 10^n \quad (32)$$

n se puede calcular con:

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

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

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

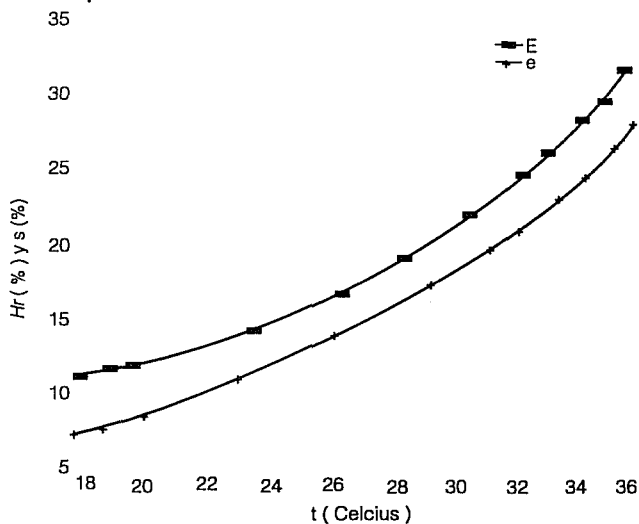
Cuanto más cálido es el aire, mayor será el contenido de vapor de agua, lo cual implica mayor tensión de vapor. Teóricamente si el aire fuera seco: $e = 0$, si está totalmente saturado $e = E$.

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 ilustración 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 ilustración 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



6 Variaciones de E_{to} con distintas intensidades de viento para maíz en el periodo punta en el valle del Yaqui.

Intensidad de viento	E_{to} (mm/mes)	% variación respecto a 1
Débil	365.67	0
Moderado	380.10	4
Fuerte	408.30	11.70
Muy fuerte	434.70	18.90

Viento

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

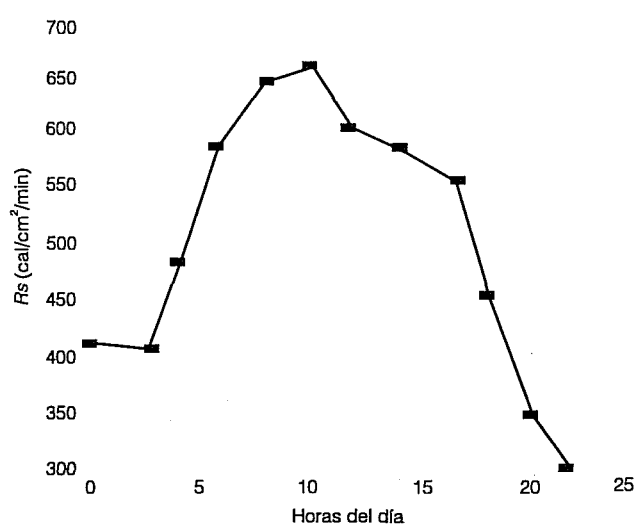
La velocidad del viento es importante, ya que a bajas velocidades facilita las heladas, en latitudes donde es común este fenómeno, lo que repercute en la producción.

Los vientos intensos pueden incluso destruir 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.

Quando el viento es cálido y seco la evapotranspiración de los cultivos aumenta considerablemente, y si este 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).

15. Evolución de R_s con la temperatura en el transcurso del día

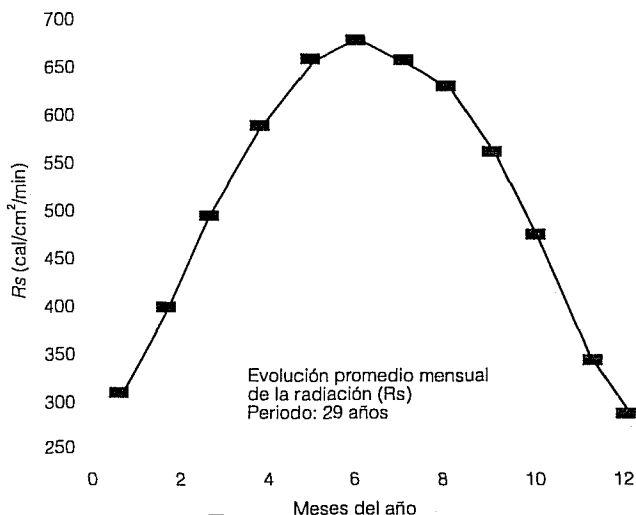


Un escenario crítico de cambio climático, por ejemplo: el A o el B, podría provocar consecuencias negativas en la producción agrícola en cualquier latitud del mundo, bajo condiciones de baja humedad relativa y vientos cálidos, ya que sometería a las plantas y al suelo a elevados índices de evapotranspiración 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.

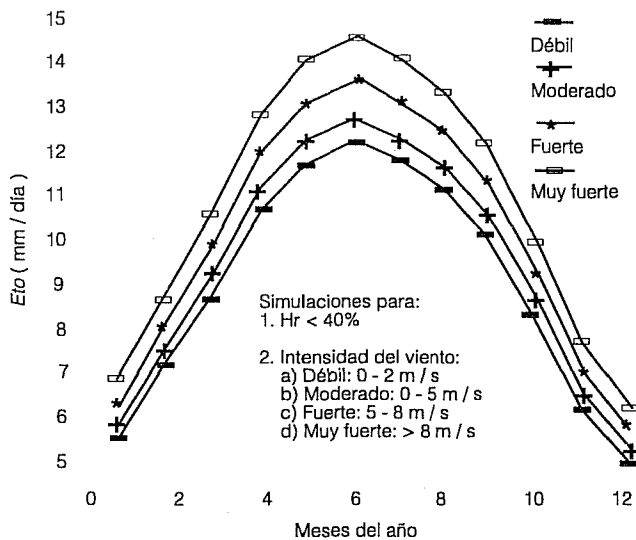
Nubosidad

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

16. Evolución de R_s mensual en un periodo de treinta años en el valle del Yaqui, Sonora



17. Variaciones de E_{to} con distintas intensidades de viento



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 de la cobertura del cielo por las nubes se expresa en décimas, 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 dependen de observaciones 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):

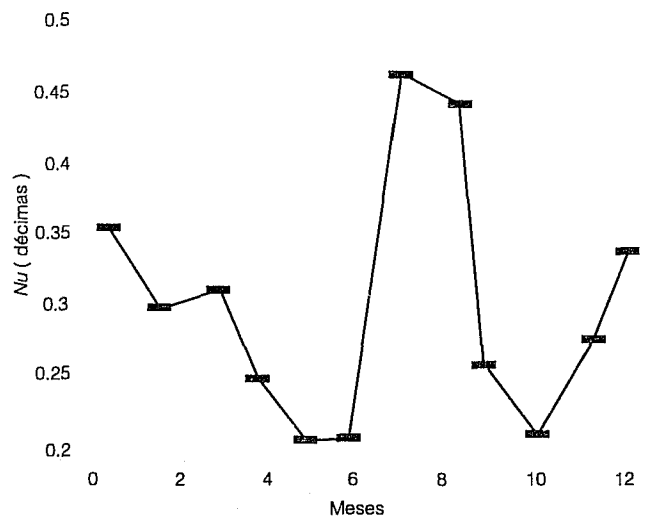
$$NU = \frac{DD * 0.1 + DMN * 0.5 + DNC * 0.85}{DTM} \quad (34)$$

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

La variación de la nubosidad mensual en treinta años de registro en el valle del Yaqui, calculados

18. Variaciones de nubosidad NU promedio, para un periodo de treinta años en el valle del Yaqui, Sonora



con los datos del cuadro 7 y la ecuación (34) es la siguiente:

7. Nubosidad en el valle del Yaqui, Sonora

MES	DD	DMN	DNC	DTM	NU
ENE	16.69	8.69	5.61	31	0.348
FEB	16.74	7.14	3.47	28	0.293
MAR	18.32	8.64	4.03	31	0.308
ABR	20.82	6.51	2.65	30	0.252
MAY	23.83	5	2.16	31	0.216
JUN	22.58	5.72	1.68	30	0.218
JUL	9.37	15.27	6.34	31	0.45
AGO	10.56	14.46	5.96	31	0.43
SEP	20.42	6.82	2.75	30	0.259
OCT	23.44	5.66	1.88	31	0.218
NOV	19.76	6.68	3.56	30	0.278
DIC	18.07	7.48	5.44	30	0.339

Insolación y fotoperiodo

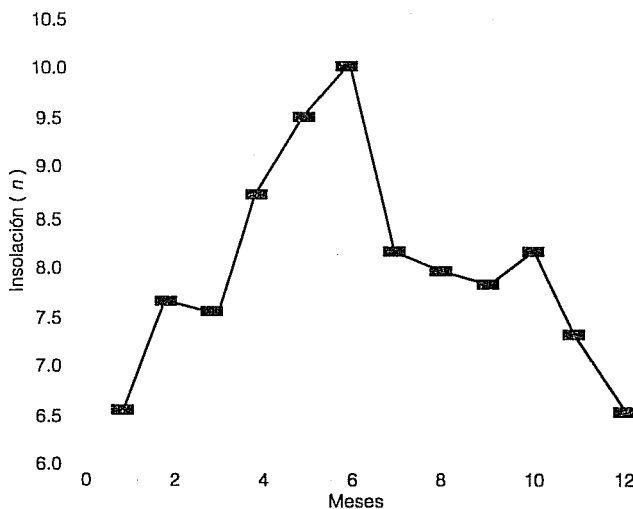
La insolación n es el número de horas que alumbra el Sol durante el día y se puede medir directamente con el heliógrafo.

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).

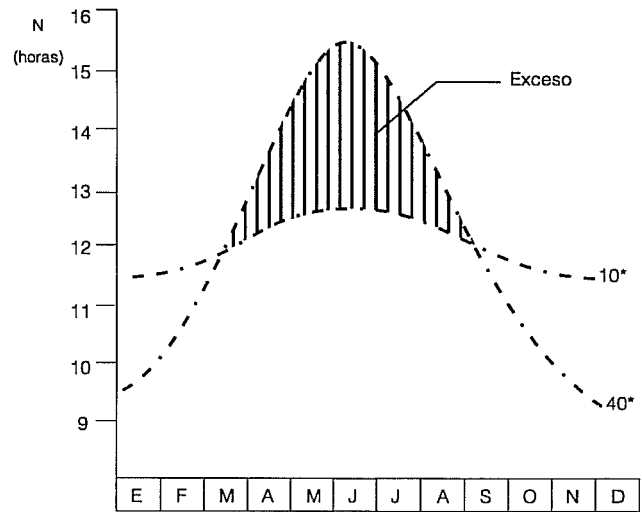
A mayor insolación, mayor es el balance de radiación R_s , por lo tanto se incrementan los índices evapotranspirativos E_{to} de los cultivos.

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.

19. Variaciones de la insolación n mensual, en un periodo de treinta años en el valle del Yaqui, Sonora



20. Variaciones de la insolación n con la latitud



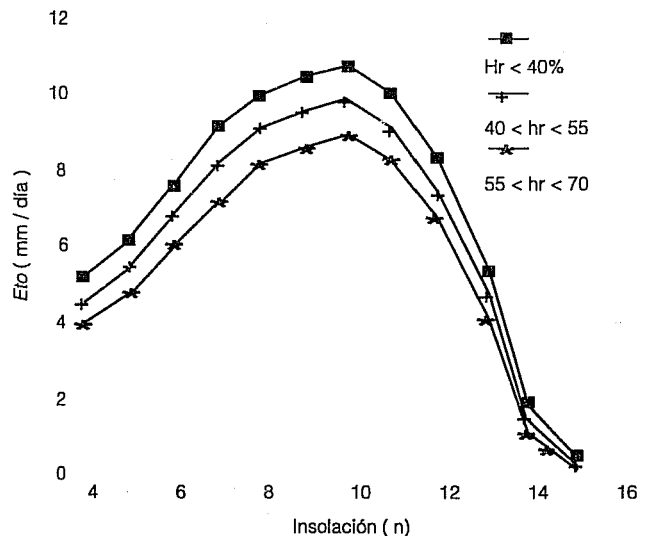
En términos generales, a mayor latitud mayor insolación (Torres, 1984) para una época del año dada. Ver ilustración 20.

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.

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 la soya, necesitan para su adecuado desarrollo vegetativo valores de N menores de 12 horas (plantas de fotoperiodo corto).

21. Aumento de E_{to} con la insolación n



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

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

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

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.

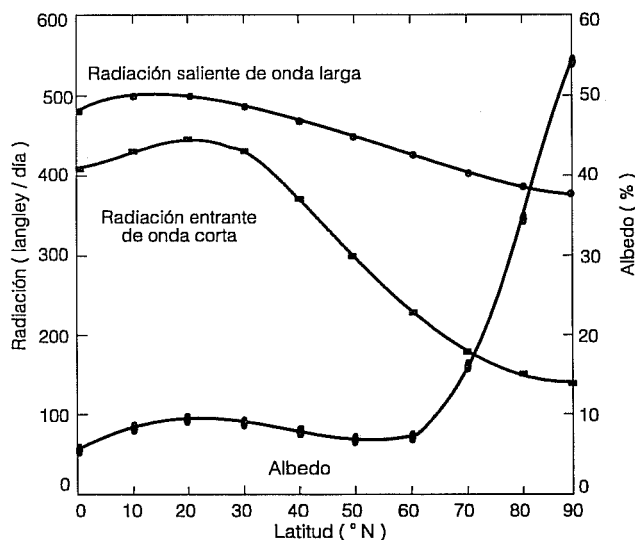
Es una propiedad de reflexión de los cuerpos que se expresa en porcentaje, este varía en función del color y homogeneidad del cuerpo reflejante.

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.

22. Variaciones del albedo con la latitud (Baver et al, 1980)



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 él 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 este calienta al aire; sin embargo las mínimas nocturnas del suelo son más bajas que las del aire.

Por lo tanto para cálculos de radiación con las ecuaciones (24) y (25) la temperatura del suelo debería considerarse mayor que la del ambiente.

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):

$$P_e = P_t - (P_{es} + P_i + P_{ev}) \quad (37)$$

donde:

- P_e = 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 la 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:

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

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

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

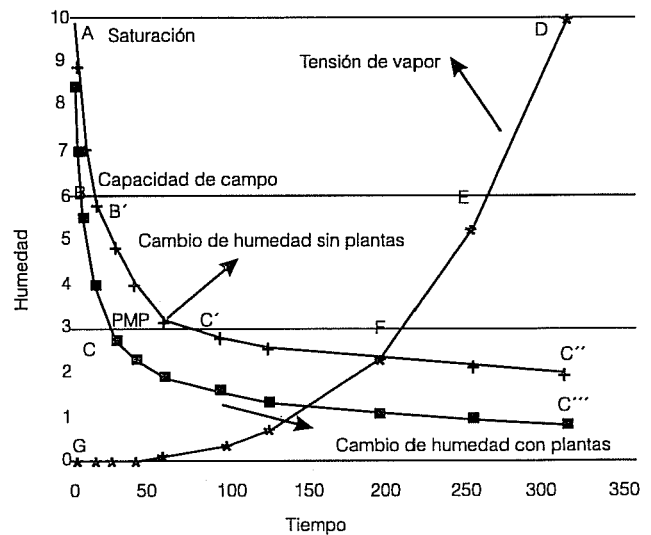
donde:

- P_e = precipitación efectiva (mm)
- $f = 0.531747 + 0.011621D - 0.000089D^2 + 0.00000023D^3$
- D = capacidad de almacenamiento (mm)
- P_t = precipitación total (mm)
- U_c = uso consuntivo o evapotranspiración mensual E_{tr}

La capacidad de almacenamiento se calcula con:

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

23. Disponibilidad de agua en el suelo



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 del suelo como se observa en la ilustración 23.

Cambios de humedad del suelo con cultivo y sin cultivo

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 $AB'C'C''$ descienda más rápidamente que la $AB'C'C'''$ es que las plantas utilizan parte del agua del suelo 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), esta 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 este 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:

$$H_a = \frac{CC - PMP}{100} DaPr \quad (41)$$

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 Yaquí 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:

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

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):

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

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 que se habrá de reponer al suelo 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 Yaquí (considerada como zona árida), si se conjugaran 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 PICC, 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 .

Revisado: octubre, 1993

Referencias

A. Benz Gerhard. 1991. *Global warming and insurance industry*. Nature and Resources., Vol.27, # 1.

- Baver L. D., Gardner W. H., Gardner W. R. 1980. *Física de suelos*. México: UTEHA S. A de C. V. Pag. 291.
- Bruce J. P. 1990. *La atmósfera de la tierra planeta viviente*. Organización Meteorológica Mundial. Págs. 5,6,7,12,20,43.
- Biswas A. K. (1991), *Water for sustainable development in the 21st Water Resources Association*, vol.16, No.4, Urbana, Ill., U. S. A.
- Chavez Adolfo. 1977. *Estudio del clima solar en la República Mexicana*. Instituto de Geofísica de la UNAM: México.
- FAO 24. 1976. *Las necesidades hídricas de los cultivos*. Estudio de FAO, Riego y Drenaje. Roma, Italia.
- Gleick, P. (1987) *Regional hydrologic consequences of increases in atmospheric CO₂ and other trace gases*, Climatic Change, num. 10, pp-137-161.
- Jensen, M. E., (1990), *Arid lands—Impending water population crises*. Hydraulics/Hydrology of Arid Lands, Proceedings of the International Symposium, San Diego, California, July 30–August 2, ASCE.
- Kramer J. Paul. 1974. *Relaciones hídricas de suelos y plantas*. EDUTEX: México.
- Jromov S. P. 1983. *Meteorología y climatología*. Vneshtorgizdat: Moscú.
- Liverman, D., Dilley, M., O' Brien K., Menchaca L. 1991. *The impacts of climate change on maize in México*. Progress Report, Department of Geography, Penn State University and Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.
- 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.
- Macera C. Omar. 1991. *México y el cambio climático global: un balance crítico*. Revista Ciencia y Desarrollo. Pág. 55.
- Mimikou M. A., Kouvopoulos Y. S. 1991. *Regional climate impacts: I. Impacts on water resources*. Paper presented in Open Sesion O. H.1: Hydrology at the 15th General Assembly of the European Geophysical Society, in Copenhagen, Denmark.
- Mundo M. M. D. 1990. *Estudio de integración y desarrollo de la zona Selva Lacandona–Marqués de Comillas, Municipio de Ocosingo Chiapas*. Primer Simposio Internacional sobre Manejo del Trópico Húmedo.
- Mundo M., M., D. y P. Martínez-Austria. "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.
- 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.
- 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.
- Organización Meteorológica Mundial. 1992. *Cumbre de la tierra*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio Ambiente y Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil.
- Ortiz-Solorio, C. 1987. *Elementos de agrometeorología*. Universidad Autónoma de Chapingo: México.
- Soil Conservation Service, USA. 1987. *Relación agua-planta-suelo*. Diana: México.
- The International Geosphere-Biosphere Programme. International Council of Scientific Union. 1991. *Plant-Water interactions in large-scale hydrological modelling*. Report # 17, Stockholm.
- Thorne D. W. and Peterson H. B. 1981. *Técnica del riego*. C.E.C.S.A: México. Torres R. E. 1984. *Agrometeorología*. México: Diana.

Abstract

Mundo, M. M. D. and P. Martínez-Austria "Global Warming and its Potential Hydraulic Resources and Agriculture in Yaqui Valley, Sonora (Preliminary Indicative Study)" *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, Vol. IX, Num. 1 pages 13 – 33, January–April, 1994.

According to the World Meteorological Organization (WMO), increases in global temperatures 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 Brazil (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. In accordance with the global warming hypothesis, this has resulted in an increase in Earth's mean temperature. Global warming follows a behavior where an increase in greenhouse 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 estimates of potential maize evapotranspiration (ET) are presented. These show that temperature increases of 2 °C to 3 °C are likely to increase ET by 12% to 15%. These preliminary results justify the need for further research.

Key words: climate change, greenhouse gases, greenhouse effects, radiation, real evapotranspiration, potential evapotranspiration, hydric balance.