

01/62

4
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

"EFECTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN EL
BALANCE HIDRICO EN MEXICO"

LEONARDO HERNANDEZ BARRIOS

TESIS

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA
(HIDRAULICA)



MEXICO, D. F.

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
ABSTRACT	vii
RESUMEN	viii

Capítulo	Página
1 INTRODUCCION	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Justificación	2
2 DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
2.1 Regiones fisiográficas	3
2.2 Climas	4
2.3 Suelos	4
2.4 Cultivos	4
3 CAMBIO CLIMATICO	6
3.1 Escenarios	7
3.2 Escenario cero	7
3.3 Escenario uno	7
3.4 Escenario dos	7
3.5 Escenario tres	8
4 METODO PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACION BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO	9
5 METODOLOGIA	15
6 ISOLINEAS DE NECESIDADES HIDRICAS	17
6.1 Isolneas de evapotranspiración promedio anual	17
6.3 Isolneas de evapotranspiración para el verano	21
6.4 Isolneas de evapotranspiración para el invierno	23
7 CONCLUSIONES	25

ANEXOS	Página
ANEXO A: Principales variables que intervienen en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos.	26
Temperatura	26
Humedad relativa	26
Presión de vapor	27
Radiación	27
Viento	28
Nubosidad	28
Insolación y fotoperiodo	28
Emisividad y albedo	29
ANEXO B: Programa de cómputo para calcular la evapotranspiración.	30
ANEXO C: Isolneas de evapotranspiración mensual, condiciones actuales.	35
ANEXO E: Isolneas de evapotranspiración mensual, bajo diferentes escenarios de cambio climático.	41
REFERENCIAS	74

" Y la tercera parte de los árboles se quemó, y se quemó toda la hierba verde".

Apocalipsis 8:7

".....Y la tercera parte de las aguas se convirtió en ajenjo; y muchos hombres murieron a causa de esas aguas, porque se hicieron amargas".

Apocalipsis 8:11

DEDICATORIA

A mi muñequita :

Adriana, la mujer más linda.

A mis padres :

Joaquín y Estela

A mis hermanos:

Estela, Hugo y Mónica

AGRADECIMIENTOS

Desnudo salí del vientre de mi madre, y desnudo volveré allá. Jehová dio, y Jehová quitó; sea el nombre de Jehová bendito.

Job 1:21.

Gracias, Señor Jesús, por darme la oportunidad de vivir.

A mi asesor: Dr. Polioptro Martínez, por su ayuda en la realización de este trabajo, por su apoyo y amistad; muchas gracias.

Al M.I Martín Mundo Molina, por su tiempo y ayuda en la realización de este trabajo.

A Carlos Patiño, mi amigo sincero.

A mis sinodales: Dr. Nahun Hamed García Villanueva, Dr. Alvaro Muñoz Mendoza, Dr. Carlos Fuentes Ruíz Dr. Juan Enciso Medina.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Tendencias en las temperaturas anuales.	1
2 Contribución estimada de los distintos gases termoactivos antropogénicos y de las actividades humanas al cambio en el forzamiento radiactivo, 1980- 1990.	6
3 Ubicación de los observatorios seleccionados.	16
4 Isolneas de evapotranspiración promedio anual, escenario cero.	17
5 Isolneas de evapotranspiración promedio anual, escenario uno.	18
6 Isolneas de evapotranspiración promedio anual, escenario dos.	19
7 Isolneas de evapotranspiración promedio anual, escenario tres.	19
8 Isolneas de evapotranspiración promedio anual, escenario cero vs escenario tres.	20
9 Isolneas de evapotranspiración en verano, escenario cero.	21
10 Isolneas de evapotranspiración en verano, escenario tres.	22
11 Isolneas de evapotranspiración en verano, escenario cero vs escenario tres.	22
12 Isolneas de evapotranspiración en invierno, escenario cero.	23
13 Isolneas de evapotranspiración en invierno, escenario tres.	24
14 Isolneas de evapotranspiración en invierno, escenario cero vs escenario tres.	24
15 Isolneas de evapotranspiración enero.	35
16 Isolneas de evapotranspiración febrero.	35
17 Isolneas de evapotranspiración marzo.	36
18 Isolneas de evapotranspiración abril.	36
19 Isolneas de evapotranspiración mayo.	37
20 Isolneas de evapotranspiración junio.	37
21 Isolneas de evapotranspiración julio.	38
22 Isolneas de evapotranspiración agosto.	38
23 Isolneas de evapotranspiración septiembre.	39
24 Isolneas de evapotranspiración octubre.	39
25 Isolneas de evapotranspiración noviembre.	40
26 Isolneas de evapotranspiración diciembre.	40
27 Isolneas de evapotranspiración enero.	41

Figura	Página
28 Isolineas de evapotranspiración enero (+ 0.9 °C).	41
29 Isolineas de evapotranspiración enero (+ 1.3 °C).	42
30 Isolineas de evapotranspiración enero (+ 2 °C).	42
31 Isolineas de evapotranspiración enero (+ 3 °C).	43
32 Isolineas de evapotranspiración febrero.	43
33 Isolineas de evapotranspiración febrero (+ 0.9 °C).	44
34 Isolineas de evapotranspiración febrero (+ 1.3 °C).	44
35 Isolineas de evapotranspiración febrero (+ 2 °C).	45
36 Isolineas de evapotranspiración febrero (+ 3 °C).	45
37 Isolineas de evapotranspiración marzo.	46
38 Isolineas de evapotranspiración marzo (+ 0.9 °C).	46
39 Isolineas de evapotranspiración marzo (+ 1.3 °C).	47
40 Isolineas de evapotranspiración marzo (+ 2 °C).	47
41 Isolineas de evapotranspiración marzo (+ 3 °C).	48
42 Isolineas de evapotranspiración abril.	48
43 Isolineas de evapotranspiración abril (+ 0.9 °C).	49
44 Isolineas de evapotranspiración abril (+ 1.3 °C).	49
45 Isolineas de evapotranspiración abril (+ 2 °C).	50
46 Isolineas de evapotranspiración abril (+ 3 °C).	50
47 Isolineas de evapotranspiración mayo.	51
48 Isolineas de evapotranspiración mayo (+ 0.9 °C).	51
49 Isolineas de evapotranspiración mayo (+ 1.3 °C).	52
50 Isolineas de evapotranspiración mayo (+ 2 °C).	52
51 Isolineas de evapotranspiración mayo (+ 3 °C).	53
52 Isolineas de evapotranspiración junio.	53
53 Isolineas de evapotranspiración junio (+ 0.9 °C).	54
54 Isolineas de evapotranspiración junio (+ 1.3 °C).	54
55 Isolineas de evapotranspiración junio (+ 2 °C).	55
56 Isolineas de evapotranspiración junio (+ 3 °C).	55
57 Isolineas de evapotranspiración julio.	56
58 Isolineas de evapotranspiración julio (+ 0.9 °C).	56
59 Isolineas de evapotranspiración julio (+ 1.3 °C).	57
60 Isolineas de evapotranspiración julio (+ 2 °C).	57
61 Isolineas de evapotranspiración julio (+ 3 °C).	58
62 Isolineas de evapotranspiración agosto.	58
63 Isolineas de evapotranspiración agosto (+ 0.9 °C).	59
64 Isolineas de evapotranspiración agosto (+ 1.3 °C).	59
65 Isolineas de evapotranspiración agosto (+ 2 °C).	60
66 Isolineas de evapotranspiración agosto (+ 3 °C).	60
67 Isolineas de evapotranspiración septiembre.	61
68 Isolineas de evapotranspiración septiembre (+ 0.9 °C).	61

Figura	Página
69 Isolneas de evapotranspiración septiembre (+ 1.3 °C).	62
70 Isolneas de evapotranspiración septiembre (+ 2 °C).	62
71 Isolneas de evapotranspiración septiembre (+ 3 °C).	63
72 Isolneas de evapotranspiración octubre.	63
73 Isolneas de evapotranspiración octubre (+ 0.9 °C).	64
74 Isolneas de evapotranspiración octubre (+ 1.3 °C).	64
75 Isolneas de evapotranspiración octubre (+ 2 °C).	65
76 Isolneas de evapotranspiración octubre (+ 3 °C).	65
77 Isolneas de evapotranspiración noviembre.	66
78 Isolneas de evapotranspiración noviembre (+ 0.9 °C).	66
79 Isolneas de evapotranspiración noviembre (+ 1.3 °C).	67
80 Isolneas de evapotranspiración noviembre (+ 2 °C).	67
81 Isolneas de evapotranspiración noviembre (+ 3 °C).	68
82 Isolneas de evapotranspiración diciembre.	68
83 Isolneas de evapotranspiración diciembre (+ 0.9 °C).	69
84 Isolneas de evapotranspiración diciembre (+ 1.3 °C).	69
85 Isolneas de evapotranspiración diciembre (+ 2 °C).	70
86 Isolneas de evapotranspiración diciembre (+ 3 °C).	70
87 Isolneas de evapotranspiración anual.	71
88 Isolneas de evapotranspiración anual (+ 0.9 °C).	71
89 Isolneas de evapotranspiración anual (+ 1.3 °C).	72
90 Isolneas de evapotranspiración anual (+ 2 °C).	72
91 Isolneas de evapotranspiración anual (+ 3 °C).	73

ABSTRACT

In Mexico, the demand for water in the agricultural sector is greater than for all other sectors. Irrigation is the main use for water in agriculture and the smallest change in climatic or meteorological conditions affects this demand directly. Small increases in temperature result in large increases in the potential evapotranspiration of crops, with the consequent rise in the demand for water. The demand placed on water supplies in general and the requirement for large, efficient near-by hydraulic works is large. Studies of the effects of climatic change are needed to predict possible effect on agriculture.

Of the results obtained with the modified radiation model, isolinear maps of evapotranspiration were prepared for Mexico. It was concluded that northern Mexico is the most vulnerable to the effects of a possible climatic change. The predicted increase in crop water demands, due to an increase in potential evapotranspiration, for this zone are up to an average of 8% over one year, 6% in the summer and 17% in the winter for the critical temperature increase (+3 °C) scenarios studied. The values derived from the model used in this study are merely suggestive, but have a predictive value for hydraulic planning in Mexico.

RESUMEN

En México, la agricultura supera a los demás sectores en la utilización del agua. El riego es el principal componente de la demanda de agua para la agricultura y el menor cambio climático y meteorológico la afecta. De manera que pequeños incrementos en la temperatura aumentarían la evapotranspiración y por consecuencia la demanda de agua para riego lo que afectaría significativamente el balance de agua en general y por tanto en la magnitud, ubicación y operación de las obras hidráulicas. Por lo anterior es importante realizar estudios en los que se prevean los posibles efectos del cambio climático en la agricultura.

Con los resultados obtenidos en esta tesis con el modelo de radiación modificado, se realizaron mapas de isoclinas de evapotranspiración potencial para la República Mexicana, en los que se concluye que la zona más vulnerable a los efectos del cambio climático será el norte de México, región en donde se incrementan las necesidades hídricas de los cultivos en proporción mayor al resto del país y, se podrían tener incrementos en la evapotranspiración potencial hasta en un 8 % promedio anual, del 6% para el verano y del 17 % para el invierno para los escenarios críticos de incrementos de temperatura analizados (+ 3°C). Aunque los valores obtenidos son indicativos podrían ser de utilidad para la planeación en el futuro de las obras hidráulicas en el país.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Se estima que la temperatura superficial media de la Tierra se ha incrementado entre 0.3 C y 0.6 °C en los últimos 100 años (fig.1) y que 1990 y 1991 fueron los años más cálidos de que se tenga registro, después de las marcas anteriores en 1981, 1983, 1987, 1988 y 1989 (World Climate News, 1983), que son tambien muy recientes.

Algunos científicos consideran que el aumento observado de la temperatura de la Tierra es congruente con la hipótesis del calentamiento debido al efecto invernadero y es uno de sus resultados. (IMI, 1986).

Las condiciones climáticas simuladas con la ayuda de modelos de circulación general, son las correspondientes a una duplicación del contenido actual del dióxido de carbono, punto común de referencia para analizar la amplitud y periodicidad del calentamiento de la Tierra. Estas condiciones se alcanzarán en un punto, quizá situado entre la mitad y el final del proximo siglo, donde el efecto radiactivo combinado con dióxido de carbono y otros gases invernadero será el doble del que correspondía al valor preindustrial del dióxido de carbono, cerca de 560 comparado con ± 10 partes por millón en volumen (IMI, 1986).

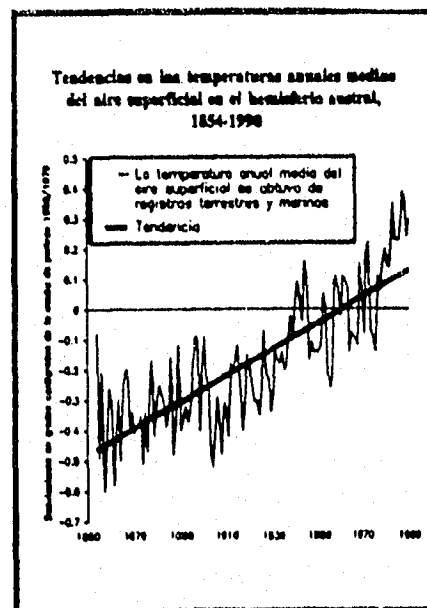


Figura 1. Fuente: P.D Jones T.M.L. Wigley y P.B Wriqth, "Global temperature variations between 1861 and 1984", Nature, 1986, 1986; y P.D Jones, University of East Anglia, 1990, tomada del informe de datos sobre el medio ambiente del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 1991.

Según varios modelos de circulación general GCMS (llamados así por sus siglas en inglés), se estima un cambio global cada cien años promedio de +2 a +5°C con promedios regionales que van de -3°C a +10°C. El promedio de cambio global en la precipitación es de ± 7%, a ± 15%, con cambios promedios regionales de ± 20% (Peterson By Dean).

Por lo anterior, todo cambio climático causado por el calentamiento debido al efecto invernadero influirá de diferente manera en la disponibilidad de agua para riego, y por tanto en la magnitud, ubicación y operación de las obras hidráulicas. De tal manera es importante determinar los posibles cambios en las necesidades hídricas.

Los cambios de temperatura tenderían a aumentar el nivel potencial de evapotranspiración y cambiarían la cantidad de agua necesaria para los cultivos, misma que constituye el factor que más afecta a las funciones fisiológicas de la vida vegetal. La cantidad de agua disponible es decisiva para el desarrollo, la supervivencia y la productividad de los cultivos.

1.2 Objetivo

Establecer una metodología que permita calcular, analizar y presentar de manera gráfica para su fácil interpretación, los efectos del cambio climático en las necesidades hídricas para la agricultura. Dibujar mapas de isolíneas de evapotranspiración en la República Mexicana, con el fin de tener una idea del impacto a nivel nacional del cambio climático.

En este trabajo se aplica el método de Radiación modificado (Mundo 1994), basado en el modelo de Radiación de FAO en su texto "Necesidades hídricas de los cultivos" (FAO 24, 1976).

1.3 Justificación

Los cambios de temperatura posiblemente tenderán a aumentar el nivel de la evapotranspiración potencial y la demanda de agua para los cultivos. Aceptando que el cambio climático mundial es un proceso en marcha y considerando que la disponibilidad de agua en zonas de riego de nuestro país es de vital importancia, es necesario realizar estudios sobre el uso y manejo de este recurso en la agricultura.

Al no existir en la República Mexicana un estudio que represente gráficamente la evapotranspiración, se realizaron mapas de isolíneas de evapotranspiración potencial considerando condiciones climáticas medias y se analizó su comportamiento bajo diferentes escenarios de cambio climático.

CAPITULO II

DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

La República Mexicana comprende una superficie de 1967 183 km². El país ocupa el decimocuarto lugar entre los de mayor extensión territorial en el mundo y quinto entre los del Continente Americano. (INEGI, 1994).

México se sitúa en la parte norte del Continente Americano, ubicándose geográficamente entre los paralelos 32°43' de latitud norte, en el límite con los Estados Unidos de América y 14°32' de latitud norte, en la desembocadura del Río Suchiate, frontera con Guatemala. (INEGI, 1994).

De acuerdo a sus longitudes geográficas se localiza entre los meridianos 118°27' en el extremo oeste, que toca la Isla de Guadalupe en el punto denominado Punta Roca Elefante frente a las costas de Baja California, en el Océano Pacífico, y 86°43 en el meridiano occidental, que pasa por Islas Mujeres en el Mar Caribe.

México está integrado por 31 estados y un Distrito Federal, para facilitar su administración los estados se dividen en municipios, mientras que el Distrito Federal está subdividido en delegaciones y es sede de la capital de la República Mexicana.

2.1 Regiones Fisiográficas

Por su relieve México es uno de los países del mundo con mayor diversidad topográfica. De acuerdo a sus características orográficas, puede ser regionalizado en quince provincias fisiográficas, entre las que destacan por su extensión : La Sierra Madre Occidental, que se extiende de noroeste a sureste, desde el límite internacional con el Estado de Arizona, E.U.A., hasta el Río Santiago en el Estado de Nayarit; La Sierra Madre Oriental, cuya trayectoria de noreste a sureste comprende los Estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla y Veracruz; y la Sierra Madre del Sur que abarca los Estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, México, Guerrero, Oaxaca y Veracruz. (INEGI, 1994).

Asimismo destacan las elevaciones del país, como son: la Sierra Volcánica Transversal o Eje Neovolcánico, que se extiende por los Estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Morelos, Distrito Federal, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Veracruz, en la cual se encuentran los grandes volcanes de México como: Pico de Orizaba, Malinche, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Nevado de Toluca y Volcán de Colima. (INEGI, 1994).

2.2 Climas

Existen en el territorio nacional una gran variedad de regiones climáticas. Los principales tipos de clima se distribuyen de la siguiente forma: Cálido húmedo, 4.7%; cálido subhúmedo, 23.0%; seco, 28.3%; muy seco, 20.8%; templado subhúmedo, 20.5%; y templado húmedo con 2.7% del territorio. (INEGI, 1994).

2.3 Suelos

México cuenta con una gran variedad de suelos, entre estos, el más abundante es el Regosol, el cual se encuentra en las laderas de las sierras, playas y dunas; es un suelo apto para el uso pecuario y forestal, sin embargo en los estados del centro del país se utiliza para cultivar granos.

Igualmente importante es el Litosol, el cual se localiza en todas las sierras de México, en laderas, serranías, lomerías y algunos terrenos planos. Su uso está en función de la vegetación que presenta, predominando el forestal, conservación de la vida silvestre y ganadera. En algunos casos, con riego, puede ser suelo agrícola.

El Xerosol se localiza en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México, cuya vegetación natural es de pastizales y matorrales por lo que en gran parte es para uso pecuario, sin embargo con riego es apto para el cultivo de algodón y granos, así como de vid. (INEGI, 1994).

2.4 Cultivos

Los principales cultivos agrícolas son: maíz, trigo, arroz y frijol. (Tamayo, 1987).

Maíz

El maíz es el elemento básico de la alimentación popular mexicana, se ha cultivado en América desde tiempos prehispánicos.

La mayor parte del maíz cosechado se cultiva en tierras de temporal, la producción es variable. Debido a ello, en los años secos la producción disminuye, llegándose a extremos de suma escasez en los años de máxima sequía.

Las zonas más productoras de maíz son : Jalisco, Veracruz, Guanajuato, Michoacán, Chiapas, México y Puebla. En entidades que tienen predominio de población indígena, gran parte de la producción no entra en el mercado, es de consumo doméstico y se aprovecha en las cercanías de los centros productores como ocurre en Oaxaca, Estado de México, Hidalgo, Guerrero y Yucatán (Tamayo, 1987).

Trigo

El trigo es un cereal de clima templado o frío que requiere de tierra húmeda, por lo que se cultiva en invierno en tierras de riego de las Altiplanicies Meridional y Septentrional, en Sonora, norte de Sinaloa, en el valle de Puebla, Valle de Tehuacán, los valles altos de la Mixteca, Valle de Oaxaca y Meseta Central de Chiapas. Por lo que hace a la parte norte de la Baja California en el Valle de Mexicali y en el de Ensenada.

Arroz

El arroz requiere, para su adecuado rendimiento, una temperatura media durante el ciclo vegetativo superior a 20°C y lluvias de 1 500 mm o láminas de riego superiores a 2m.

Las zonas productoras en orden de importancia son las siguientes: Valle del río Culiacán, sur de Veracruz y norte de Oaxaca; la región de Tierra Caliente en Michoacán; Morelos y sur de Puebla; las costas de Colima, Jalisco, Michoacán y el sur de Tabasco; la costa de Guerrero y la región de Tapahula en Chiapas.

Frijol

Es la más importante leguminosa que se cultiva en México y que ha sido destacado elemento en la alimentación, desde tiempos prehispánicos, ya que es una planta aborigen. La producción más importante se registra en los siguientes estados: Nayarit, Durango, Zacatecas, Chihuahua, Sinaloa, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Aguascalientes y Oaxaca.

CAPITULO III

CAMBIO CLIMATICO

El efecto invernadero, que está siempre presente en la atmósfera juega un papel decisivo en el equilibrio energético de la Tierra y es indispensable para la preservación de la vida. Sin él la temperatura de la Tierra sería inferior en unos 33°C , con una temperatura global media estimada de -18°C en vez de la media actual de $+15^{\circ}\text{C}$ y la vida, tal como se conoce, no existiría (Mitchell, 1989).

Los gases de invernadero (vapor de agua, dióxido de carbono, óxido nítrico, metano, ozono y clorofluorocarbonos, entre otros) comparten una propiedad común: dejan pasar la radiación solar de onda corta, pero absorben e irradian la radiación infrarroja de onda larga emitida por la Tierra. Por consiguiente, su presencia en la atmósfera cambia el equilibrio radiactivo de nuestro planeta y ejerce un efecto de calentamiento o de invernadero. (CEPAL, 1993).

El efecto invernadero es a la vez natural y provocado. El efecto invernadero natural es consecuencia de las concentraciones atmosféricas naturales de gases invernadero, que generalmente se suponen equivalentes a las concentraciones observadas antes de la revolución industrial. El efecto de invernadero provocado, conocido asimismo como forzamiento climático o radiactivo, resulta de la presencia de gases invernadero adicionales en la atmósfera por obra de la actividad humana, incluida la producción y utilización de energía, las actividades industriales, incluida la producción y utilización de clorofluorocarbonos (CFC), las actividades agrícolas y las modificaciones en el régimen de utilización de la tierra, en especial la deforestación y la quema de biomasa (Fig.2).

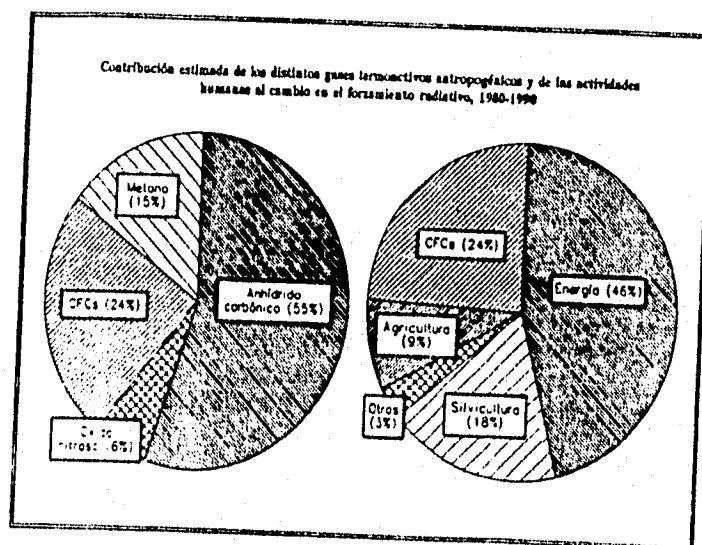


Figura 2. Contribución estimada de los distintos gases termoactivos antropogénicos y de las actividades humanas al cambio en el forzamiento radiactivo.

Las interacciones entre la atmósfera, los océanos y la biosfera controlan la concentración natural de gases invernadero en la atmósfera. Las emisiones de gases invernadero resultantes de las actividades humanas trastornan el equilibrio natural y se traducen en un incremento neto de las concentraciones atmosféricas que aumentan el efecto invernadero natural. Las emisiones antropogénicas realizadas en el pasado y que continúan, de gases invernadero pueden hacer que aumente la temperatura superficial media del mundo, fenómeno denominado generalmente como "calentamiento de la atmósfera", (global warming, en inglés).

3.1 Escenarios

En las simulaciones realizadas con el modelo propuesto en esta tesis, se utilizaron cuatro escenarios de cambio climático, consistentes con los propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC) de la ONU (Bruce, 1990).

3.2 Escenario cero

Situación actual.

- Concentraciones de dióxido de carbono de 330 ppm.
- Talas producidas hasta ahora, con deforestación y quema de bosques.

3.3 Escenario uno

- Durante la primera mitad del próximo siglo se utiliza la 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.

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

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

3.4 Escenario dos

- 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.

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

3.5 Escenario tres

Este escenario supone que en el futuro:

- 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.

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

CAPITULO IV'

METODO PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACION BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO

Método para calcular la evapotranspiración

Tres motivos para aplicar el método de radiación en este trabajo son:

i) el intercambio calorífico entre el aire atmosférico y el medio ambiente ocurre por radiación, ii) la radiación reemitida a la atmósfera por la superficie terrestre y los cultivos son atrapados por los gases invernadero y vapor de agua, lo que sugiere un balance de radiación y, iii) disponibilidad de datos, existen en México los datos necesarios para la validación del método FAO 24, cuya ecuación queda determinada por:

$$E_{to} = a + b (w.Rs') \quad (1)$$

Para obtener la E_{to} 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 definidas por los siguientes cuatro bloques:

Humedad < 40 %

vientos diurnos débiles (0 - 2 m/s):

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

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

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

* Basado en la referencia: El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del valle del Yaqui, Sonora, México. (Mundo, 1994).

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

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

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

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

Humedad 40 - 55 %

vientos diurnos débiles (0 - 2 m/s):

$$E_{tO} = \frac{[0.974 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2719}{0.65} \quad (6)$$

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

$$E_{tO} = \frac{[1.051 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2493}{0.65} \quad (7)$$

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

$$E_{tO} = \frac{[1.316 * (w.Rs') * 0.65] - 0.4618}{0.65} \quad (8)$$

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

$$E_{tO} = \frac{[1.188 * (w.Rs') * 0.65] - 0.1378}{0.65} \quad (9)$$

Humedad 55 - 70 %

vientos diurnos débiles (0 - 2 m/s):

$$E_{tO} = \frac{[0.904 * (w.Rs') * 0.65] - 0.3068}{0.65} \quad (10)$$

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

$$E_{tO} = \frac{[0.965 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2655}{0.65} \quad (11)$$

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

$$E_{tO} = \frac{[1.035 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2827}{0.65} \quad (12)$$

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

$$E_{tO} = \frac{[1.086 * (w.Rs') * 0.65] - 0.652}{0.65} \quad (13)$$

Humedad > 70 %

vientos diurnos débiles (0 - 2 m/s):

$$E_{tO} = \frac{[0.803 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2801}{0.65} \quad (14)$$

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):

$$EtO = \frac{[0.910 * (w.Rs') * 0.65] - 0.2470}{0.65} \quad (16)$$

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

$$EtO = \frac{[0.955 * (w.Rs') * 0.65] - 0.248}{0.65} \quad (17)$$

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):

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

donde:

Rs = radiación solar (langley). En adelante todas las variables que aparecen con unidades langley = Cal/cm²/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 coeficiente de insolación n/N . Sin embargo, el factor nubosidad NU puede ser calculado explícitamente (Ortíz, 1987), como se muestra en las ecuaciones (24) y (25).

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 requiere 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 wRs' de las ecuaciones (1) a (17) de la siguiente forma (Torres, 1984):

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

siendo:

$$Rs \propto w Rs' \quad (20)$$

donde:

Rs = radiación efectiva o balance de radiación (langley)

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

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

$\downarrow R_{atm}$ = radiación atmosférica que llega al suelo, 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):

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

donde:

α = coeficiente de reflexión de la superficie o albedo.

Para calcular la radiación atmosférica R_{atm} de la ecuación (21) se puede utilizar; Brunt (Torres, 1984), siendo esta:

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

donde:

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

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

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

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

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

donde:

ϵ = emisividad de la superficie

T_2 = temperatura absoluta, °K (para fines prácticos se mide también a 2 m de la superficie del suelo).

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

$$Rs = (R_{dir} + R_{dif}) (1 - \alpha) + \left[(0.34 + 0.79\sqrt{e}) \sigma T_1^4 - \epsilon \sigma T_2^4 \right] \frac{(DD * 0.1 + DMN * .5 + DNC * .85)}{DTM} \quad (24)$$

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:

$$Rs = (R_{dir} + R_{dif}) (1 - \alpha) + \left[(0.34 + 0.79\sqrt{e} - \epsilon) \sigma T^4 \right] \frac{(DD * 0.1 + DMN * .5 + DNC * .85)}{DTM} \quad (25)$$

Sustituyendo (24) si $T_1 \neq T_2$ 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 *Eto*. La ecuación (25), donde $T_1 = T_2$ fue utilizada en este trabajo.

CAPITULO V

METODOLOGIA

Metodología

De las normales climatológicas (SARH,1988) y del atlas solar de la República Mexicana (Hernández et al,1991.), se obtuvieron los datos promedios mensuales y anuales de 53 observatorios del país, éstos son: temperatura ambiente, humedad relativa, precipitación, número de días despejados, número de días medio nublados, número de días nublados/cerrados, velocidad del viento y radiación. Para cada uno de los observatorios se calculó la evapotranspiración utilizando el método de la Radiación FAO 24 modificado (Mundo, 1994). Con estos valores, y utilizando el método de interpolación de Kriging que se encuentra en el programa de cómputo Surfer se obtuvieron isoclinas de evapotranspiración potencial para todo el país.

De acuerdo a los escenarios de cambio climático del PICC, para cada observatorio se incrementó la temperatura ambiente anual, para el invierno y verano en $+1^{\circ}\text{C}$, $+2^{\circ}\text{C}$, $+3^{\circ}\text{C}$ y se calculó nuevamente la evapotranspiración, con estos nuevos valores, se obtuvieron nuevas isoclinas de evapotranspiración.

Los cálculos se realizaron mes a mes y después calculó el promedio anual, lo mismo se realizó para el invierno y para el verano con los respectivos meses que los comprenden. Finalmente se analizaron los valores de evapotranspiración obtenidos para cada escenario de cambio climático y se obtuvo la diferencia entre ellos para determinar los cambios en la evapotranspiración potencial en el norte, centro, sur del país.

En el capítulo VI se muestran los mapas de isoclinas de evapotranspiración potencial anuales, para el invierno y verano para cada uno de los escenarios de cambio climático.

En los anexos C y D se muestran las isoclinas de evapotranspiración mensual y de evapotranspiración para diferentes escenarios de cambio climático.

Los observatorios utilizados en este estudio fueron los siguientes:

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| 1. Aguascalientes, Ags. | 28. Chapingo, Edo Mex. |
| 2. Ensenada, BCN. | 29. Toluca, Edo Mex. |
| 3. La Paz, BCS. | 30. Morelia, Mich. |
| 4. Campeche, Camp. | 31. Tepic, Nay. |
| 5. Monclova, Coah. | 32. Monterrey, NL. |
| 6. Piedras Negras, Coah. | 33. Oaxaca, Oax. |
| 7. Saltillo, Coah. | 34. Salina Cruz, Oax. |
| 8. Torreón, Coah. | 35. Puebla, Pue. |
| 9. Colima, Col. | 36. Querétaro, Qro. |
| 10. Manzanillo, Col. | 37. Cozumel, Qroo. |
| 11. San Cristobal de las Casas, Chis. | 38. Río Verde, SLP. |
| 12. Comitán, Chis. | 39. San Luis Potosí, SLP. |
| 13. Tapachula, Chis. | 40. Culiacán, Sin. |
| 14. Tuxtla Gutiérrez, Chis. | 41. Mazatlán, Sin. |
| 15. Chihuahua, Chi. | 42. Guaymas, Son. |
| 16. Tacubaya, Mexico.D.F. | 43. Hermosillo, Son. |
| 17. Ciudad Lerdo, Dgo. | 44. Soto la Marina, Tamps. |
| 18. Durango, Dgo. | 45. Tampico, Tamps. |
| 19. Guanajuato, Gto. | 46. Tlaxcala, Tlax. |
| 20. León, Gto. | 47. Córdoba, Ver. |
| 21. Acapulco, Gro. | 48. Jalapa, Ver. |
| 22. Chilpancingo, Gro. | 49. Orizaba, Ver. |
| 23. Pachuca, Hgo. | 50. Veracruz, Ver. |
| 24. Tulancingo, Hgo. | 51. Mérida, Yuc. |
| 25. Guadalajara, Jal. | 52. Progreso, Yuc. |
| 26. Lagos de Morelos, Jal. | 53. La Bufa, Zac. |
| 27. Huejucar, Jal. | |

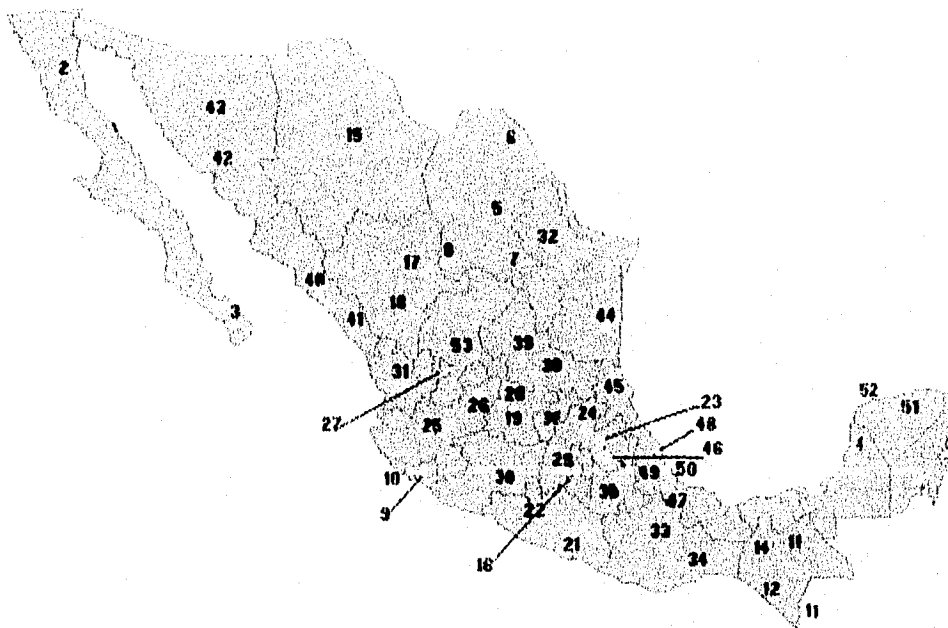


Figura 3. Ubicación de los observatorios utilizados en este estudio.

CAPITULO VI

ISOLINEAS DE NECESIDADES HIDRICAS

En este capítulo se presentan las isoclinas de evapotranspiración promedio anual, para el invierno y verano, bajo diferentes escenarios de cambio climático.

6.1 Isoclinas de Evapotranspiración promedio anual

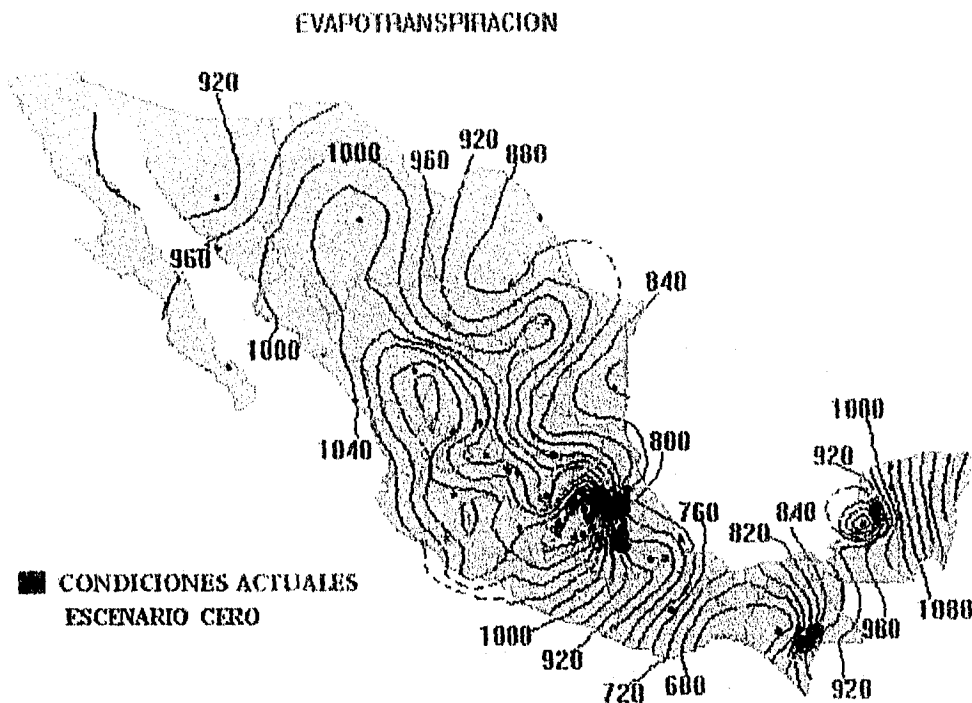


Figura 4

Figura 4. Isoclinas de evapotranspiración promedio anual (mm), para condiciones actuales (escenario cero).

En la figura 4 se muestran las isoclinas de evapotranspiración para condiciones climáticas actuales. De la figura 5 a la figura 7 se muestran los mapas de isoclinas de evapotranspiración con incrementos en la temperatura de + 1, + 2, + 3, °C.

En la figura 5 se muestran las isoclinas de evapotranspiración promedio anual para el escenario uno (+ 1°C). En este escenario el incremento en la evapotranspiración promedio anual para el norte del país es de 3 %, para el centro y sur del país es aproximadamente de 1.3 % con respecto a la evapotranspiración actual o escenario cero.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

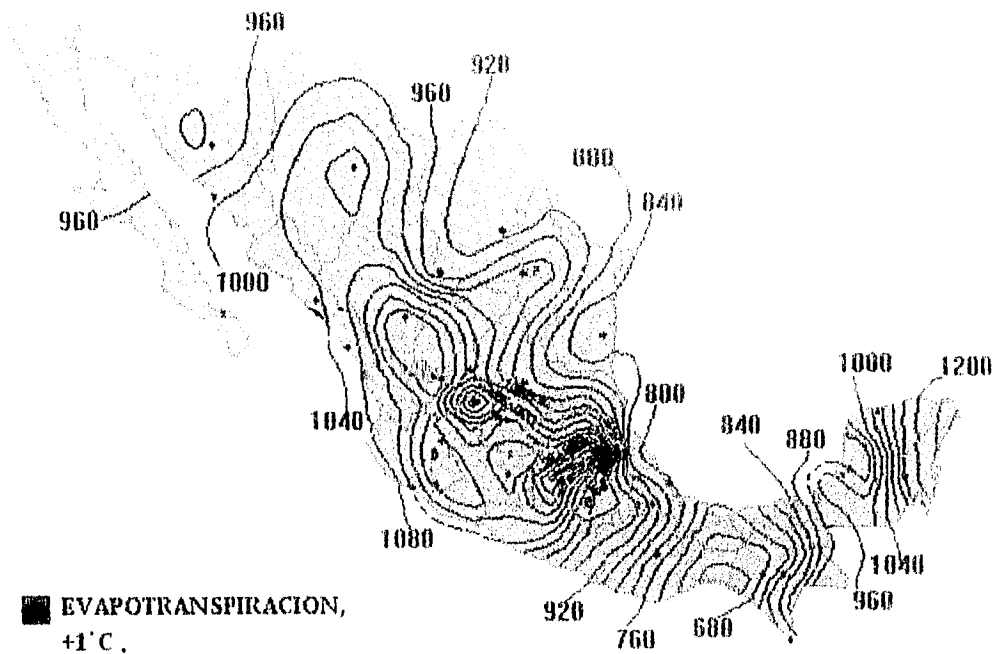


Figura 5

Figura 5. Isolinneas de evapotranspiración promedio anual (mm), escenario uno +^o1 C.

En la figura 6 se presentan las isolinneas de la evapotranspiración promedio anual, con un incremento en la temperatura de + 2^o C . Para este escenario, el incremento en la evapotranspiración con respecto a la evapotranspiración actual es del 5% para el norte y del 2.7 % para el centro y sur del país.

Finalmente en la figura 7 se muestran las isolinneas de evapotranspiración para el escenario más crítico, es decir + 3^o C. Para este escenario se presenta un incremento en la evapotranspiración promedio anual de 8.0 % para el norte del país, en el centro y sur el incremento será de 4.0 % con respecto a la evapotranspiración actual.

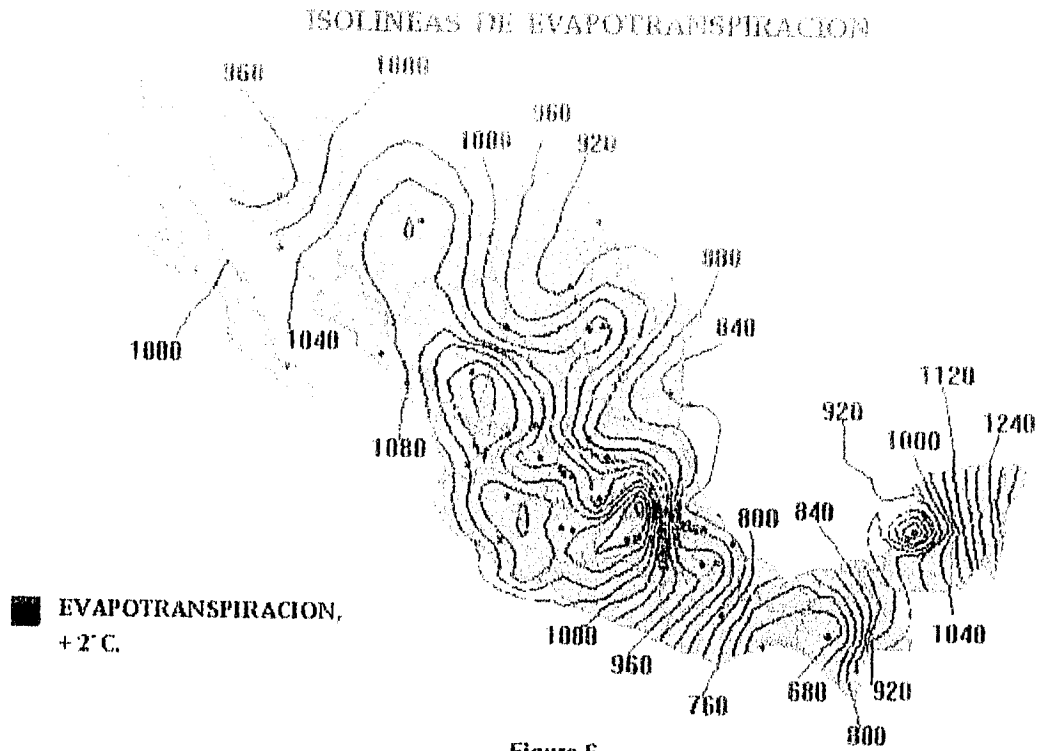


Figura 6

Figura 6. Isolineas de evapotranspiración promedio anual (mm), escenario dos +2°C

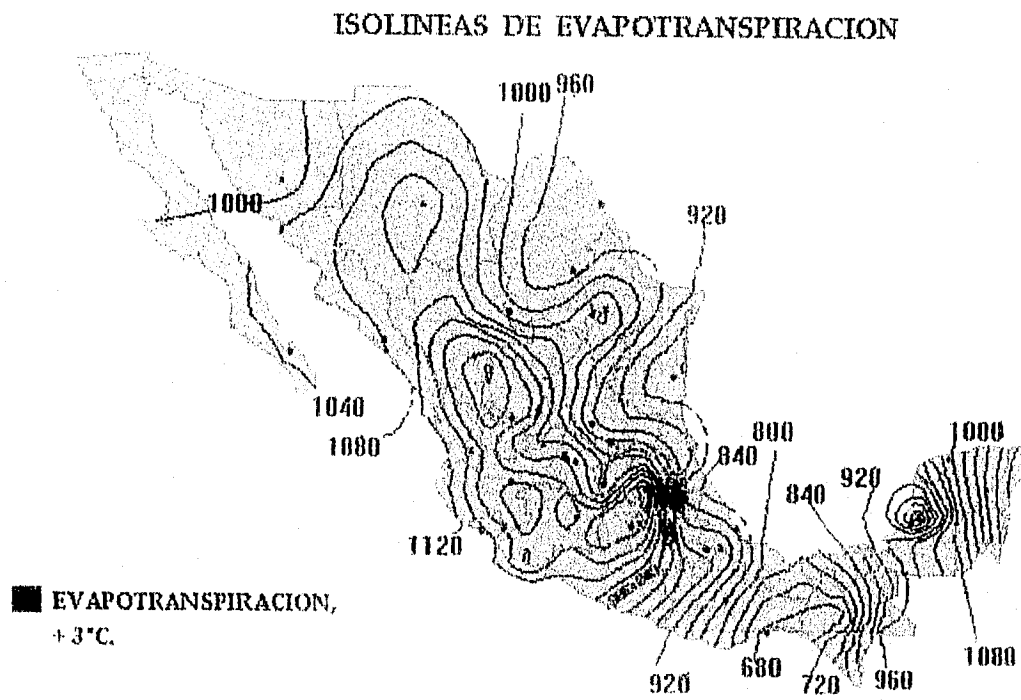


Figura 7

Figura 7. Isolineas de evapotranspiración promedio anual (mm), escenario tres +3°C

Si observamos la figura 4 y la comparamos con la figura 7 (Fig.8) se puede observar que en el norte del país el desplazamiento de las isoclinas es de noroeste a noreste, mientras que para el centro y sur del país no se observan desplazamientos significativos como en el norte del país.

Del analisis anterior se puede concluir que pequeños incrementos en la temperatura incrementan la evapotranspiración y que posiblemente la zona más vulnerable a los efectos del cambio climático será el norte de México en donde se podrían tener incrementos en la evapotranspiración potencial hasta en un 8% para el escenario más crítico de incremento de temperatura analizado.

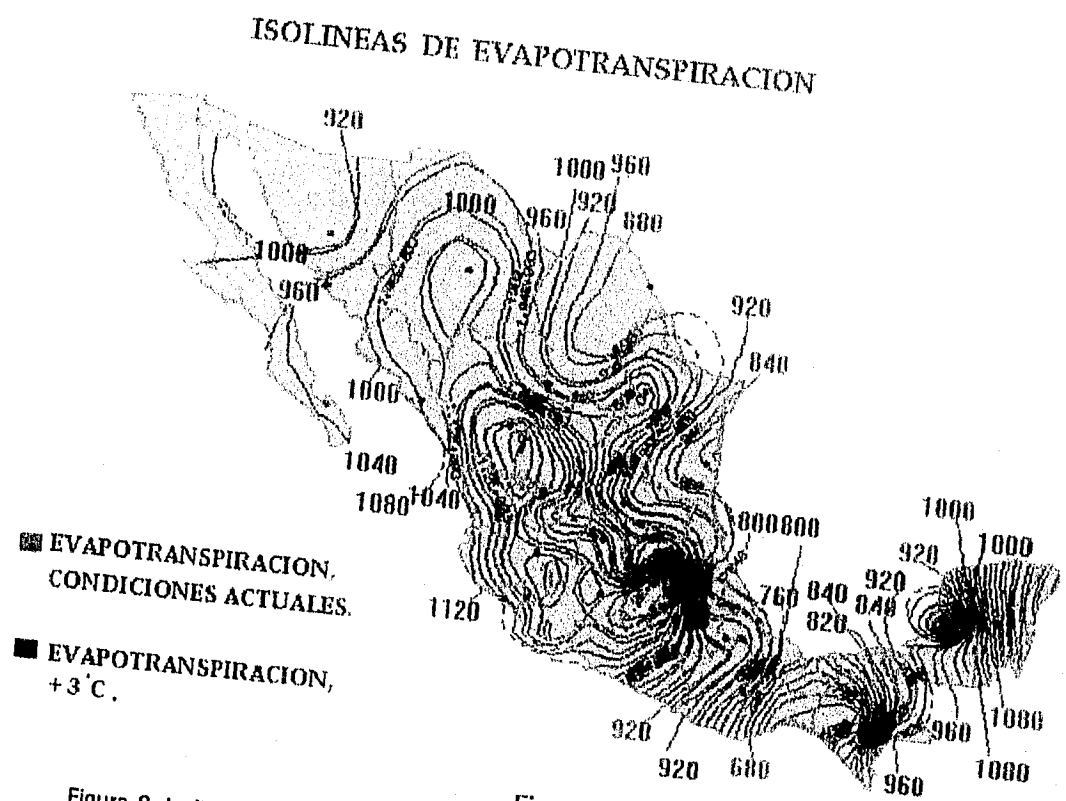


Figura 8. Isoclinas de evapotranspiración promedio anual (mm), escenario cero Vs escenario tres +3°C

6.2 Isolneas de evapotranspiración para el verano

Las isolneas de evapotranspiración potencial en verano para el escenario cero (situación actual) y para el escenario tres (+ 3°C) se muestran en las figuras 9 y 10 respectivamente. En la figura 11 se presenta la comparación entre estos dos escenarios.

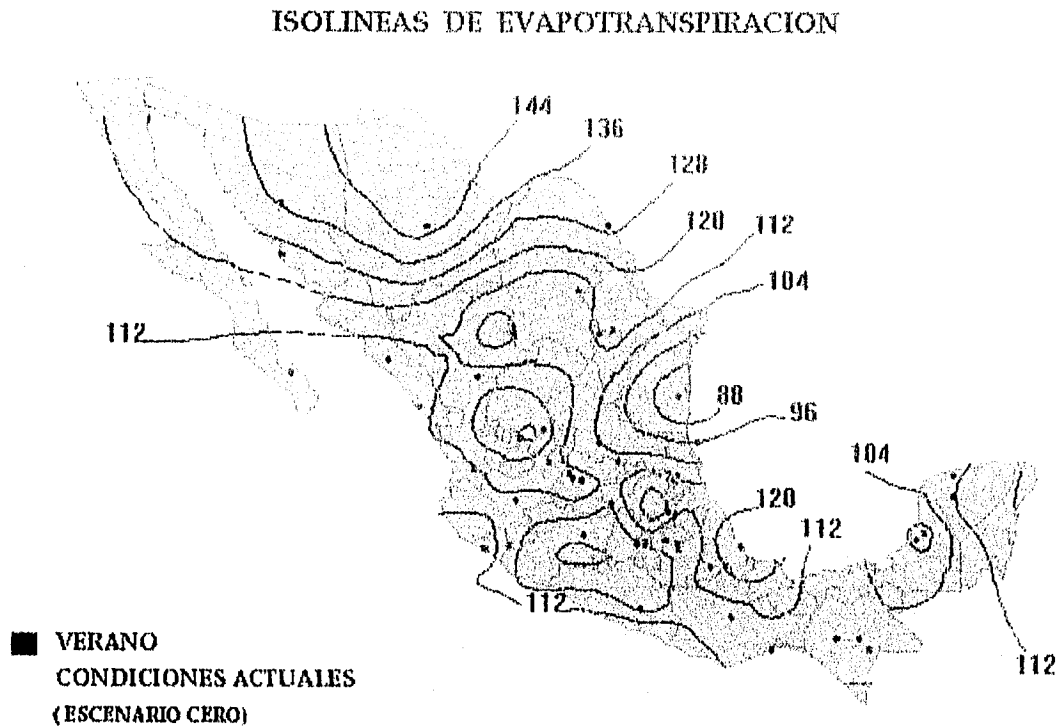


Figura 9

Figura 9. Isocías de evapotranspiración (mm) en verano para condiciones actuales, escenario cero.

En la figura 10 se presentan las isocías de evapotranspiración promedio en verano para el escenario más crítico (+ 3°C). En este escenario, se presenta un incremento en la evapotranspiración del 6% en el norte, del 3.5% en el centro y del 3% en el sur del país con respecto a la evapotranspiración actual.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

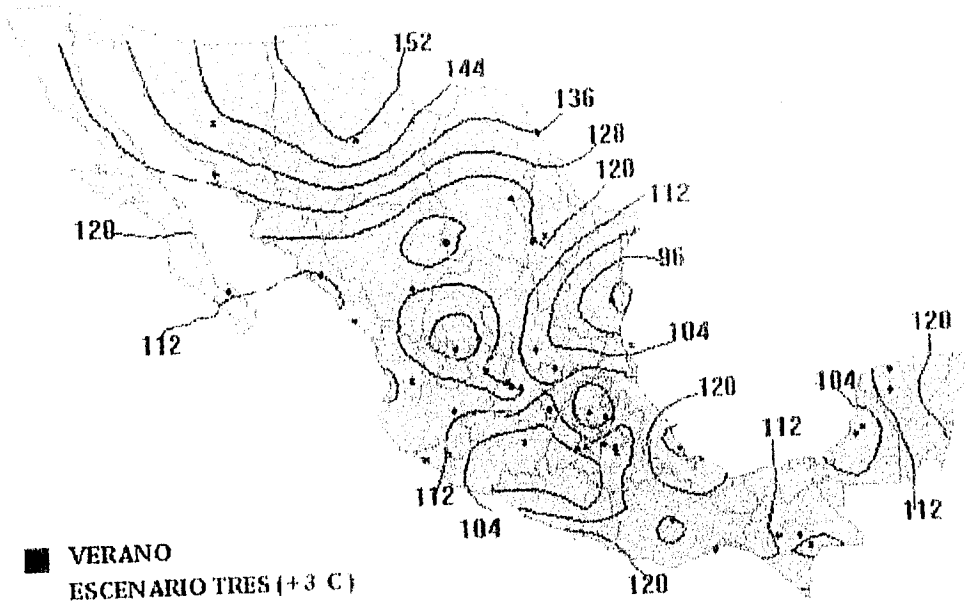


Figura 10

Figura 10. Isolneas de evapotranspiración (mm) en verano , escenario tres (+3°C)

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

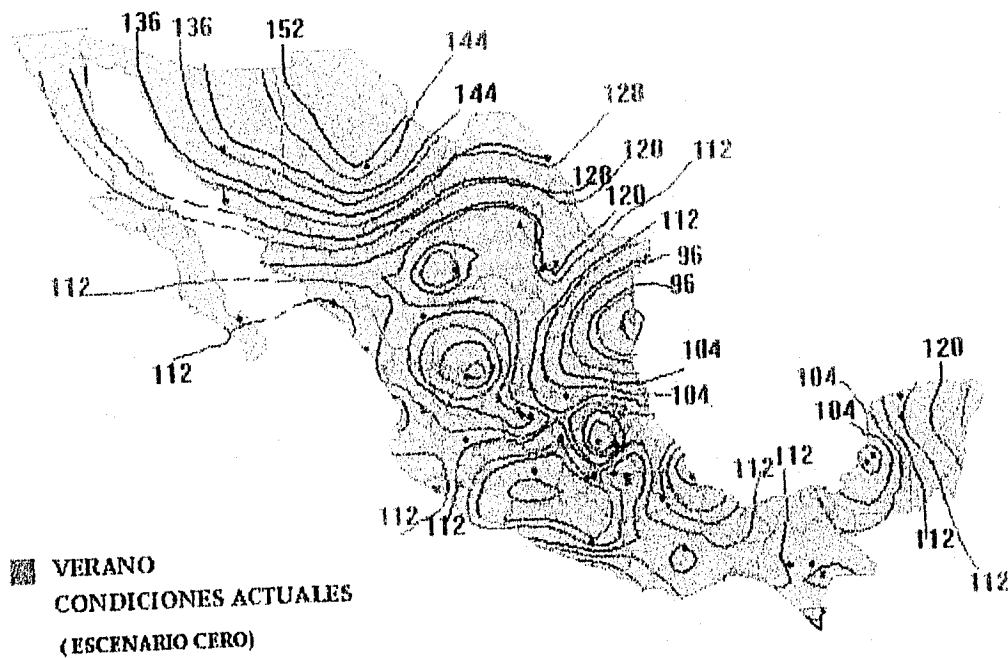


Figura 11

Figura 11. Isolneas de evapotranspiración en verano, escenario cero Vs escenario tres.

6.3 Isolneas de evapotranspiración para el invierno

Las isolneas de evapotranspiración potencial en invierno para el escenario cero (situación actual) y para el escenario tres (+3°C) se muestran en las figuras 12 y 13 respectivamente. En la figura 14 se presenta la comparación entre estos dos escenarios.

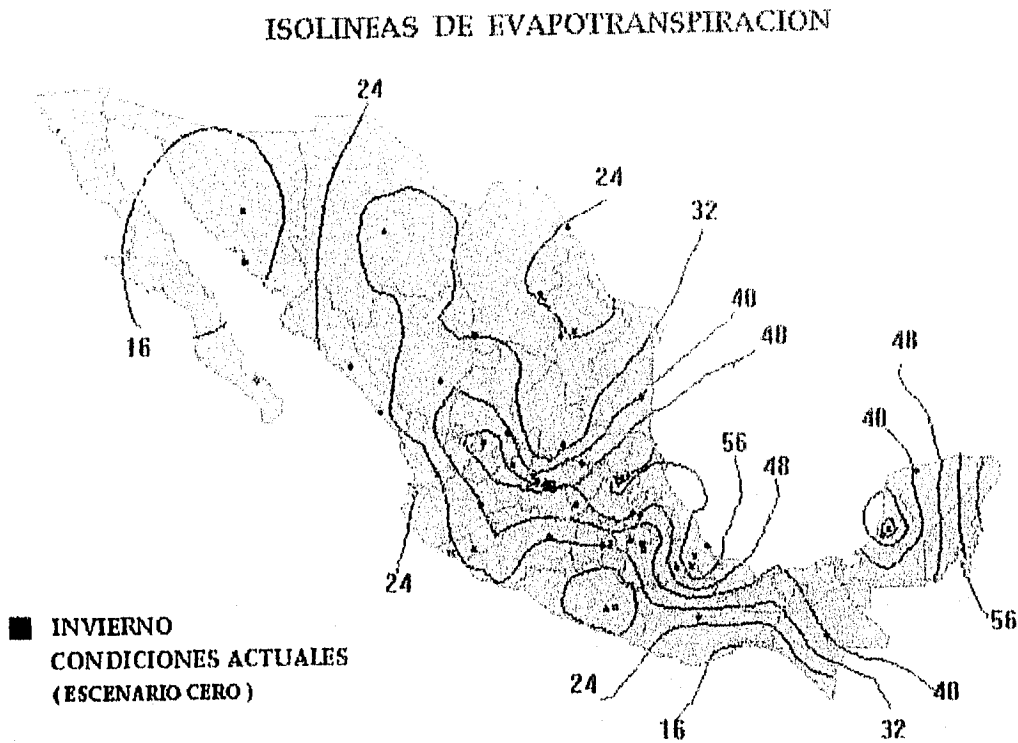


Figura 12

Figura 12. Isolneas de evapotranspiración (mm) en invierno para condiciones actuales, escenario cero.

En la figura 13 se presentan las isolneas de evapotranspiración en invierno para el escenario más crítico (+ 3 °C). La diferencia en el incremento de la evapotranspiración entre la situación actual y el escenario más crítico es del 17 % el norte, del 13% en el centro y del 14 % en el sur del país.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

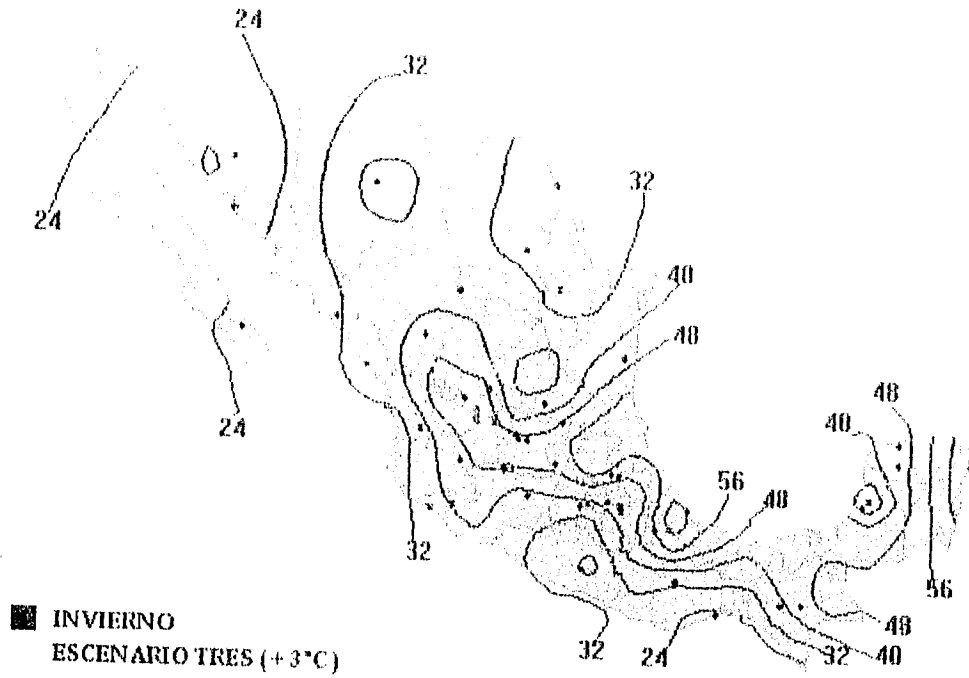


Figura 13

Figura 13. Isolíneas de evapotranspiración (mm) en invierno, escenario tres (+3°C)

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

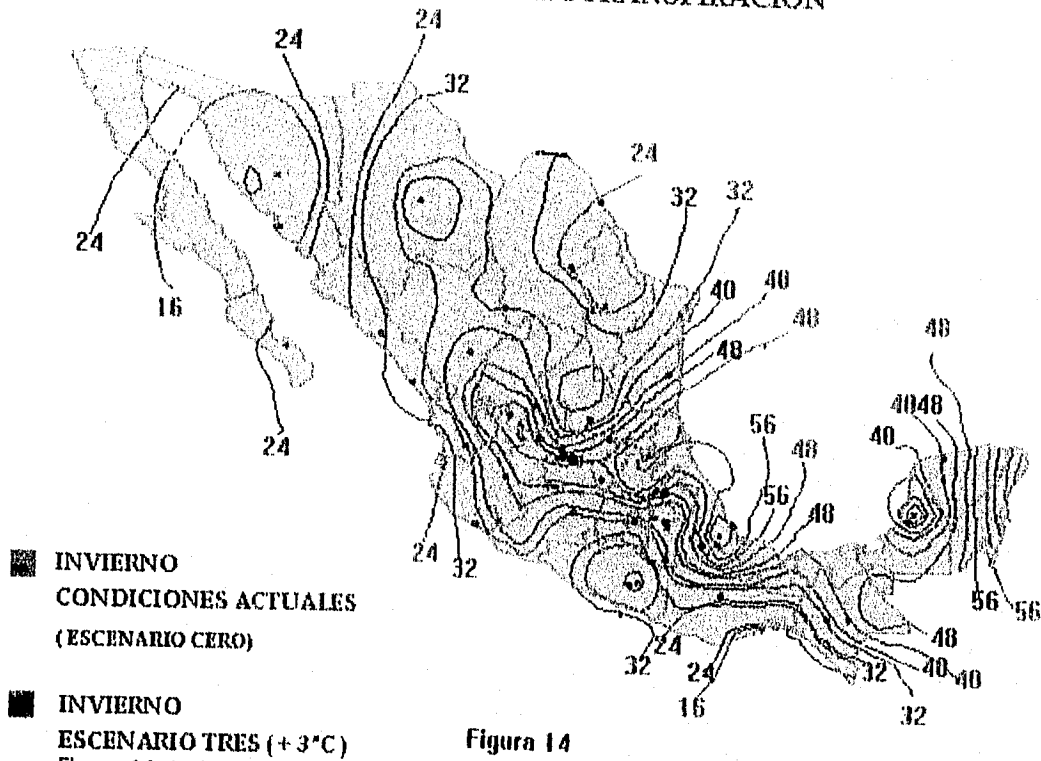


Figura 14

Figura 14. Isolíneas de evapotranspiración (mm) en invierno, escenario cero Vs escenario tres.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

El cambio climático causado por el calentamiento debido al efecto invernadero posiblemente influirá de diferentes maneras en la magnitud y ubicación de las obras de riego. El efecto principal sería que cambiaría la cantidad de agua disponible, que constituye el factor que más afecta a las funciones fisiológicas de la vida vegetal.

La temperatura tiene importantes consecuencias para el desarrollo vegetal y la utilización del agua. Si ascendiera la temperatura, las plantas utilizarían más agua, cambiaría la ubicación de los cultivos y, por ende, la ubicación del riego.

En este estudio se obtienen resultados muy importantes en los que se concluye que la zona más vulnerable a los efectos del cambio climático será el norte de México, región en donde se incrementan las necesidades hídricas de los cultivos en proporción mayor al resto país. La diferencia entre las condiciones actuales de evapotranspiración y el escenario más crítico ($+3^{\circ}\text{C}$) es del 8% promedio anual, del 6% para el verano y del 17% para invierno.

En el centro del país las isoclinas de evapotranspiración se desplazan hacia las costas del pacífico. En el sureste de México no se presentan cambios significativos en la evapotranspiración, debido principalmente a los altos índices de humedad relativa y a las altas precipitaciones que se presentan en esa región.

Como lo demuestra este estudio, los cambios de temperatura tienden a aumentar el nivel de evapotranspiración y la demanda de agua para los cultivos.

En México es preciso que se conozcan las posibles consecuencias del cambio climático en la agricultura, con el fin de que se pueda responder con la adopción de medidas apropiadas para mitigar posibles daños. Por eso es importante contar con información que el futuro se pueda utilizar para una mejor planeación de las obras hidráulicas.

De presentarse cambio climático los agricultores tendrían muchas maneras de adaptarse a estos cambios, por ejemplo, reduciendo el uso del agua, programando el riego para los periodos más cruciales del crecimiento vegetal y cambiando a cultivos que requieran menos agua.

Por lo anterior será necesario implantar medidas de ahorro y uso del agua en todo el país, sobre todo en la región norte de México en donde se localizan los principales distritos de riego, región vulnerable, según lo demuestra este trabajo a efectos ocasionados por el cambio climático.

ANEXO A

PRINCIPALES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL

CALCULO DE LAS NECESIDADES HIDRICAS DE LOS

CULTIVOS

Principales variables que intervienen en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos.

A continuación se definen las principales variables que intervienen en la determinación de las necesidades de riego de los cultivos.

Temperatura

La temperatura tiene importantes consecuencias para el desarrollo vegetal y la utilización del agua. Si ascendiera la temperatura, las plantas utilizarán más agua, cambiaría la ubicación de los cultivos y, por ende, la ubicación del riego. También habría más posibilidades de deterioro químico del suelo al acelerarse los procesos de salinización y alcalinización.

La reacción de las plantas a los cambios de temperatura difieren según las especies y variedades. Las altas temperaturas favorecen la maduración más rápida de las plantas y acortan el período de formación del grano.

Los cambios de temperatura tienden a aumentar a el nivel potencial de evapotranspiración y la demanda de agua para los cultivos.

Humedad Relativa

La humedad relativa (hr) es la cantidad porcentual de vapor de agua que en un momento dado y a una determinada temperatura contiene el aire, con relación a la máxima cantidad de vapor que a esa misma temperatura, el aire puede contener. (Torres 1984). La hr se puede obtener con la relación masa del vapor en el momento considerado y a una determinada temperatura, entre la máxima cantidad de vapor que la misma temperatura podría contener:

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

donde:

hr = humedad relativa (%)

mv = masa de vapor (a una temperatura determinada)

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

Presión de vapor

La cantidad de vapor de agua presente en el aire puede expresarse como la presión que el vapor de agua ejerce y es independiente de la presencia de otros gases. Esta presión recibe el nombre de presión de vapor y generalmente se le asigna con la letra E si es la presión de vapor máxima y con la letra e la presión de vapor real. Ambas presiones dependen de la temperatura y se pueden calcular con (Torres, 1984):

$$e = E' - cp(t-t') \quad (28)$$

donde :

c = constante psicométrica

p = presión atmosférica del lugar (mmHg)

t = temperatura, bulbo seco.

t' = temperatura, bulbo húmedo.

$$E = 6.11 * 10^n \quad (29)$$

n se puede calcular con:

$$n = \frac{7.5t}{237.3t + t} \quad (30)$$

Radiación

La radiación es la energía en tránsito emitida por la fuente que irradia, en este caso el Sol, en todas sus direcciones; sus unidades son: joules o calorías o watt-hora. La irradiación es la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie o zona; sus unidades son joules/m² o cal/cm² (llamado langley: ly) o kwatt-hora/m².

La irradiación se desglosa en dos componentes, la directa (R_{dir}) y la difusa (R_{dif}). La directa proviene linealmente del disco solar, mientras que la difusa proviene de otras direcciones debido a la reflexión y dispersión que producen en la radiación solar, la atmósfera y las nubes.

La directa, a su vez, consta de dos componentes: la directa vertical ("R_{dv}") y la directa horizontal ("R_{dh}").

Se llama irradiación global ("R_G") a la suma de las componentes directa vertical y difusa recibidas sobre una superficie horizontal.

Viento

La velocidad 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 arrancar por completo las plantas (Torres, 1984).

Cuando 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).

Nubosidad

El grado de cobertura del cielo por las nubes se denomina nubosidad. 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 despejado su nubosidad es de punto diez. Generalmente las mediciones son subjetivas, ya que depende del observador a simple vista. La nubosidad de manera empírica se puede calcular con la siguiente ecuación (Ortiz, 1987):

$$NU = \frac{DD*0.1 + DMN*0.5 + DNC*0.85}{DTM} \quad (31)$$

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

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

En términos generales, a mayor latitud mayor insolación (Torres, 1984) para una época del año dada. El fotoperiodo N es la duración astronómica del día, o sea la duración de la luminosidad del día sin tomar en cuenta la intensidad de la radiación.

El fotoperiodo se calcula fácilmente con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{2w}{15} \quad (32)$$

$$\cos w = -\tan \phi \tan \delta \quad (33)$$

donde:

N = fotoperiodo

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

ϕ = latitud geográfica

δ = declinación solar

Emisividad y albedo

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 los excesos de energía solar recibida. El albedo varía con la latitud, a mayor latitud mayor es el porcentaje de reflexión o albedo.

La emisividad E 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 E de uno.

Por lo que cada material tiene su propio coeficiente de emisividad E . Para el maíz y el trigo los coeficientes de emisividad son: 0.90 y 0.92 respectivamente (Torres, 1984).

ANEXO B

PROGRAMA DE COMPUTO PARA CALCULAR

EVAPOTRANSPIRACION POR EL METODO

RADIACION MODIFICADO, FAO 24

PROGRAMA PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACION

```
Program Evapotranspiracion;
Uses crt;
Const
  csb = 0.000000117;
  it: array [1..5] of real = (0.0, 0.9, 1.3, 2.0, 3.0);
  { dtm = 31;}
  ac = 0.15;
  e = 0.90;
  kc = 1;
Var
  hr,g,v,y,n1,rg,i,dtm      : integer;
  n,prv,dd,
  dmn,dnc,Eto,Etr,
  aux,aux1,aux2,lat,lon,
  wrs,t1,temp,ve,ver,PRE,NR,t2,x : real;
  ar,ar1                    : string[11];
  f,TXT                     : text;
  res,res1,res2,res3       : char;

function eleva(b,x : real):real;
Begin
  eleva:= exp(x * ln (b));
End;

function formula1 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=((1.086 * wrs * 0.65) - 0.281) / 0.65 ;
  formula1:= Rx;
End;

function formula2 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=((1.125 * wrs * 0.65) - 0.2687) / 0.65 ;
  formula2:= Rx;
End;

function formula3 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=((1.203 * wrs * 0.65) - 0.2413) / 0.65 ;
  formula3:= Rx;
End;

function formula4 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
```

```

Rx: = ((1.274 * wrs * 0.65) - 0.2091) / 0.65 ;
formula4: = Rx;
End;
function formula5 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx: = ((0.974 * wrs * 0.65) - 0.2719) / 0.65 ;
  formula5: = Rx;
End;

function formula6 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx: = ((1.051 * wrs * 0.65) - 0.2493) / 0.65 ;
  formula6: = Rx;
End;

function formula7 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx: = ((1.316 * wrs * 0.65) - 0.4618) / 0.65 ;
  formula7: = Rx;
End;

function formula8 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx: = (( 1.188 * wrs * 0.65) - 0.1378) / 0.65 ;
  formula8: = Rx;
End;

function formula9 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx: = ((0.904 * wrs * 0.65) - 0.3068) / 0.65 ;
  formula9: = Rx;
End;

function formula10 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx: = ((0.965 * wrs * 0.65) - 0.2655) / 0.65 ;
  formula10: = Rx;
End;

function formula11 : real;
Var
  Rx: real;
Begin

```

```

Rx:=(1.035 * wrs * 0.65) - 0.2827) / 0.65 ;
formula11:= Rx;
End;

function formula12 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=(1.086 * wrs * 0.65) - 0.652) / 0.65 ;
  formula12:= Rx;
End;
function formula13 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=(0.803 * wrs * 0.65) - 0.2801) / 0.65 ;
  formula13:= Rx;
End;

function formula14 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=(0.857 * wrs * 0.65) - 0.2419) / 0.65 ;
  formula14:= Rx;
End;

function formula15 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=(0.910 * wrs * 0.65) - 0.2470) / 0.65 ;
  formula15:= Rx;
End;

function formula16 : real;
Var
  Rx: real;
Begin
  Rx:=(0.955 * wrs * 0.65) - 0.248) / 0.65 ;
  formula16:= Rx;
End;
(* Programa Principal *)
Begin
  Repeat
    clrscr;
    gotoxy(20,4);write('ARCHIVO DE ENTRADA : ');readln(AR1);
    assign(TXT,ar1);
    {$I-}
    reset(txt);
    {$I+}
    if IOResult = 0 then
      Begin
        gotoxy(20,6);write('ARCHIVO DE SALIDA : ');readln(AR);
        assign(f,ar);

```

```

rewrite(f);
gotoxy(20,8); write('DIAS TOTALES DEL MES: ');readln(dtm);
Repeat
append(f);
(* Lectura de los datos *)
readln(txt,lat,lon,rg,hr,PRE,v,t1,dd,dmn,dnc);
lon:=lon * -1;
write(f, lon:8:2,lat:8:2);
t2:=t1;
temp:=t1;
t2:=273.15 + temp;
For i:= 1 to 5 do
Begin
(* inicio de calculos *)
t1:=(273.15 + temp) + it(i);
n:=(7.5 * t1)/((237.3 * t1)+t1);
y:= 10;
prv:=(hr*(6.11 * (eleva(y,n))))/100;
aux:= rg * (1 - ac);
x:=csb * (eleva(t1,4));
ve:=( 0.34 * x) + ((0.079 * (sqrt(prv))) * x) ;
ver:= ve - (e * csb * (eleva(t2,4) ));
aux1:= 1 - ((dd * 0.1) + (dmn * 0.5) + (dnc * 0.85)) / dtm );
wrs:= (aux + (aux1 * ver)) * 0.017;
if (hr <= 40 ) then
Begin
if (v >= 0) and (v <= 2) then
Eto:= formula1;
if (v > 2) and (v <= 5) then
Eto:= formula2;
if (v > 5) and (v <= 8) then
Eto:= formula3;
if (v > 8) then
Eto:= formula4;
End;
if (hr > 40 ) and (hr <= 55) then
Begin
if (v >= 0) and (v <= 2) then
Eto:= formula5;
if (v > 2) and (v <= 5) then
Eto:= formula6;
if (v > 5) and (v <= 8) then
Eto:= formula7;
if (v > 8) then
Eto:= formula8;
End;
if (hr > 55 ) and (hr <= 70) then
Begin
if (v >= 0) and (v <= 2) then
Eto:= formula9;
if (v > 2) and (v <= 5) then
Eto:= formula10;
if (v > 5) and (v <= 8) then
Eto:= formula11;
if (v > 8) then

```

```

        Eto:= formula12;
    End;
    if (hr > 70) then
    Begin
        if (v >= 0) and (v <= 2) then
            Eto:= formula13;
        if (v > 2) and (v <= 5) then
            Eto:= formula14;
        if (v > 5) and (v <= 8) then
            Eto:= formula15;
        if (v > 8) then
            Eto:= formula16;
        End;
        Etr:= ( Eto * kc ) * dtm;
        if Etr > PRE then
            NR:=Etr - PRE
        else NR:= 0;
        write(f,Etr:8:2,NR:8:2,' ');
    end;{ fin del for}
    writeln(f);
    Until eof(txt) ;
    close(f);
    close(txt);
End
else
begin
    clrscr;
    gotoxy(20,12); write ('EL ARCHIVO NO EXISTE');
end;
gotoxy(20,23);
write('OPRIMA [T] ERMINAR [C] ONTINUAR... ');
res2:=upcase(readkey);
until res2 = 'T';
End.

```


ANEXO C

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL MENSUAL

CONDICIONES ACTUALES

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

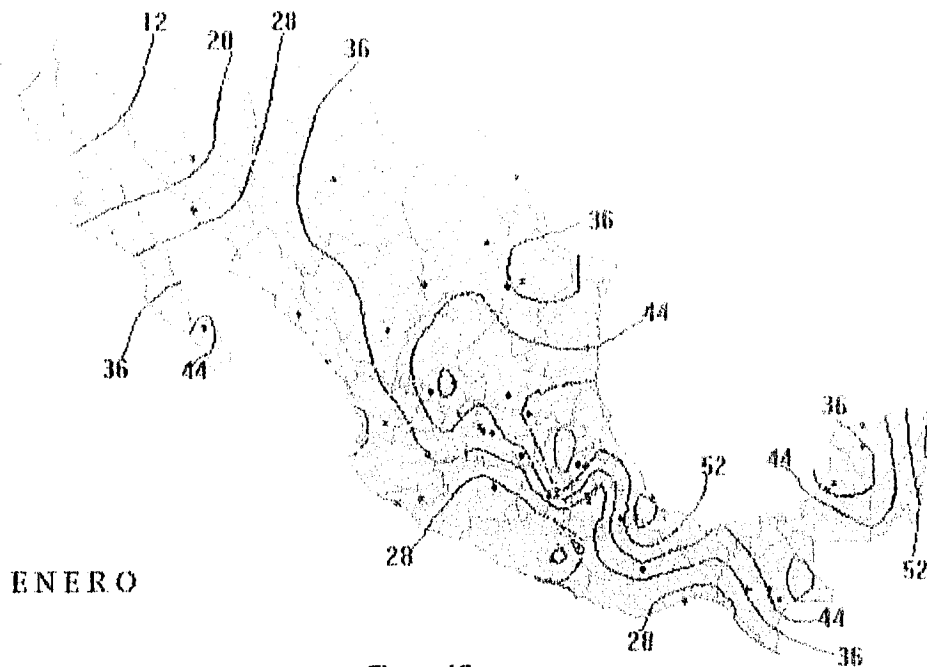


Figura 15

Figura 15. Isolíneas de evapotranspiración potencial (mm) enero.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

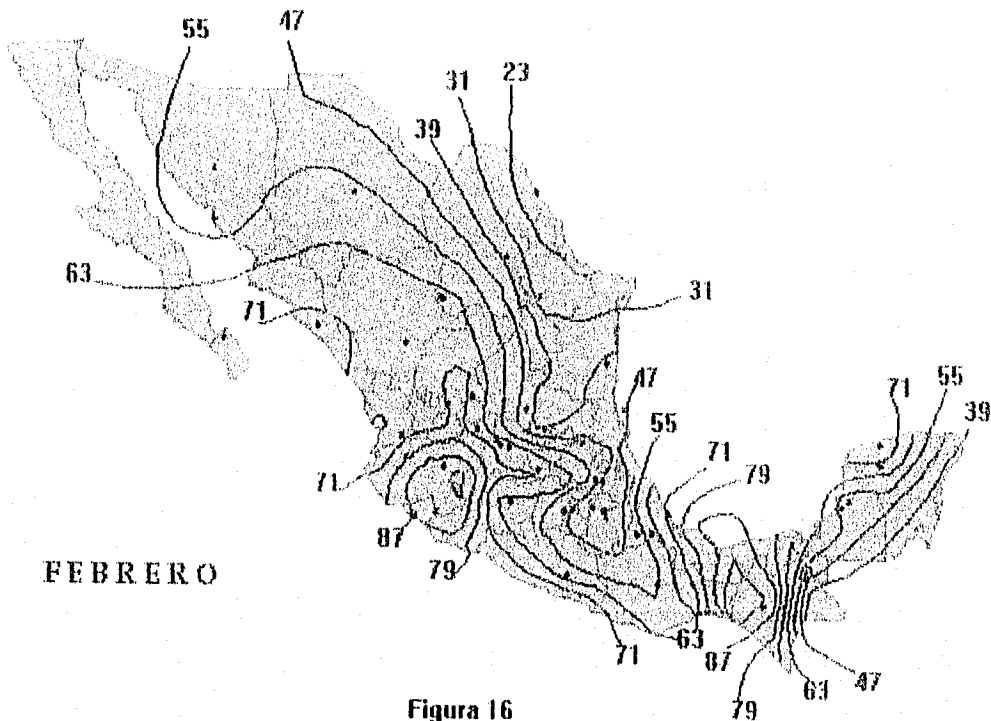


Figura 16

Figura 16. Isolíneas de evapotranspiración potencial (mm) febrero.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

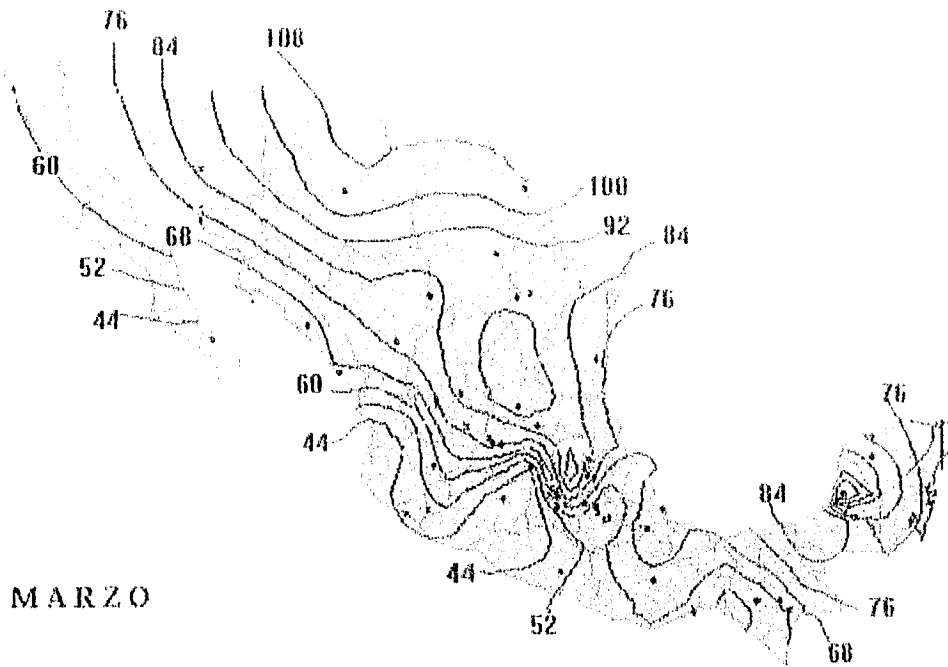


Figura 17
Figura 17. Isolneas de evapotranspiración potencial (mm) marzo.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

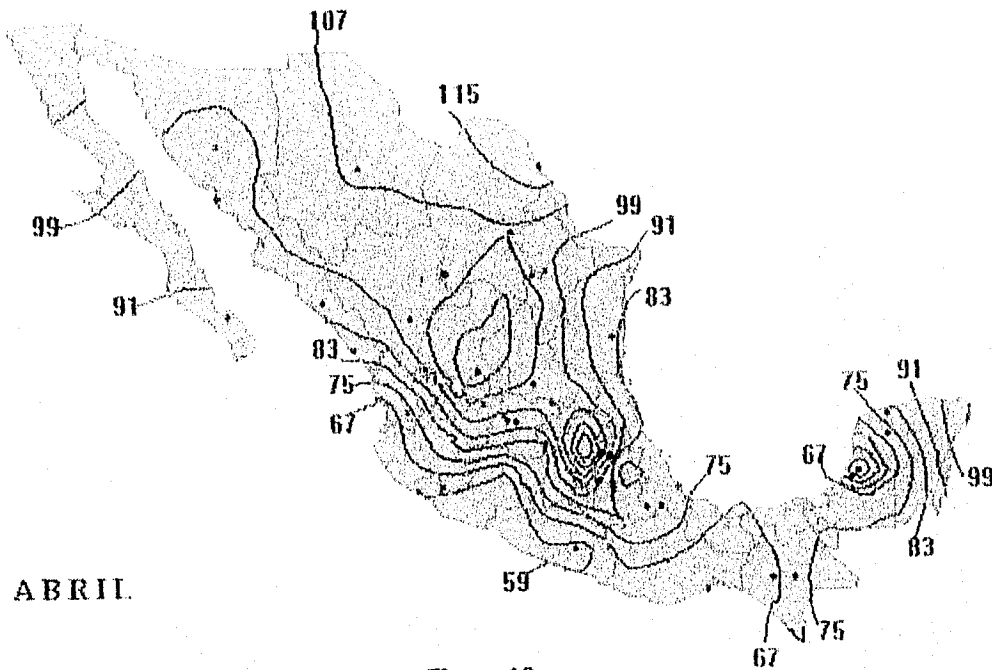


Figura 18
Figura 18. Isolneas de evapotranspiración potencial (mm) abril.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

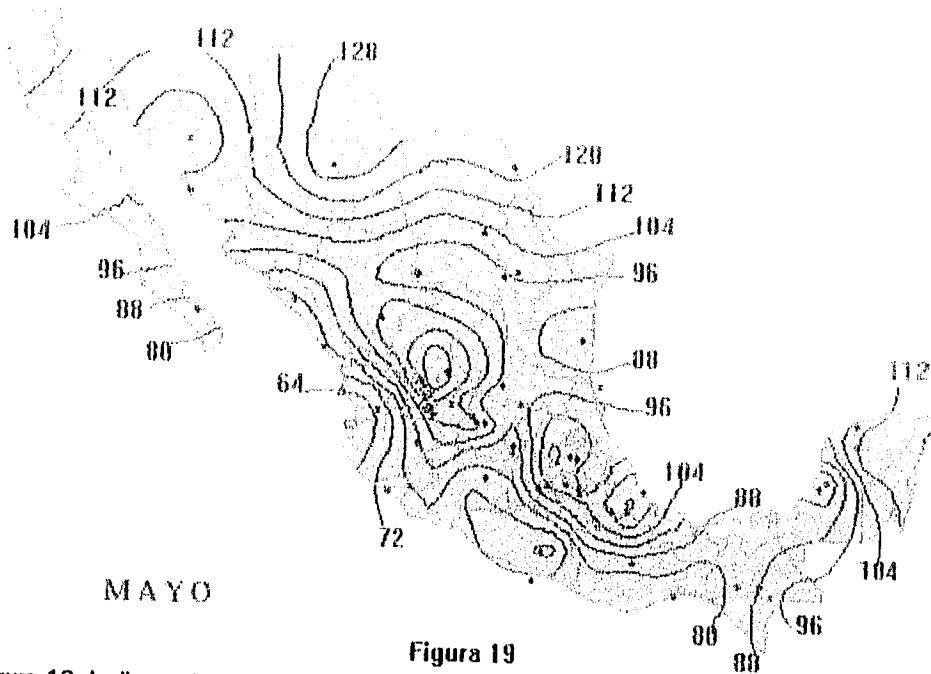


Figura 19. Isolneas de evapotranspiración potencial (mm) mayo.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

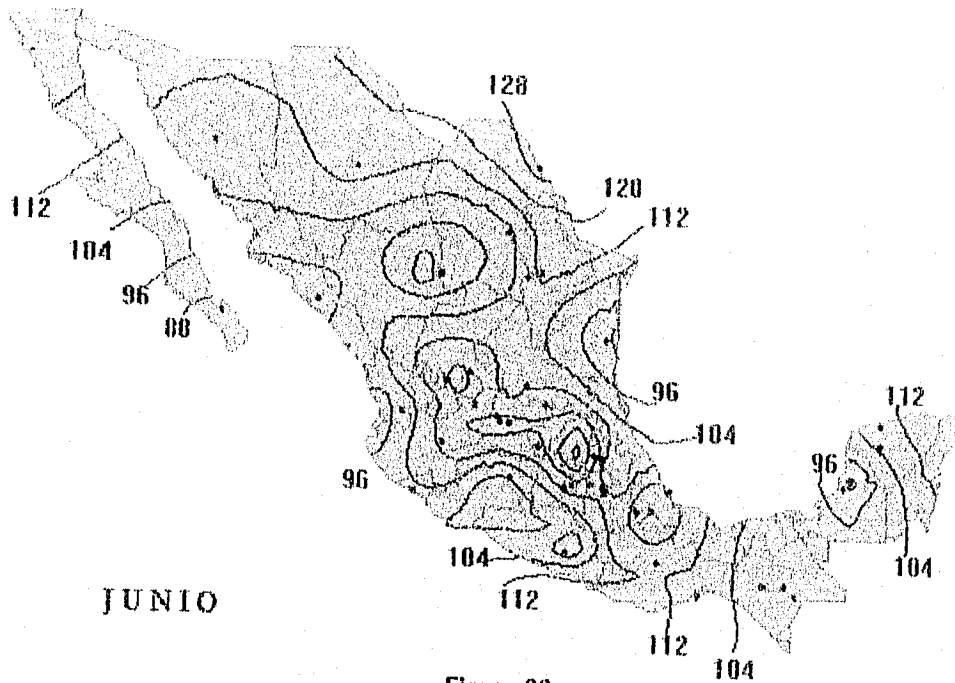


Figura 20. Isolneas de evapotranspiración potencial (mm) junio.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

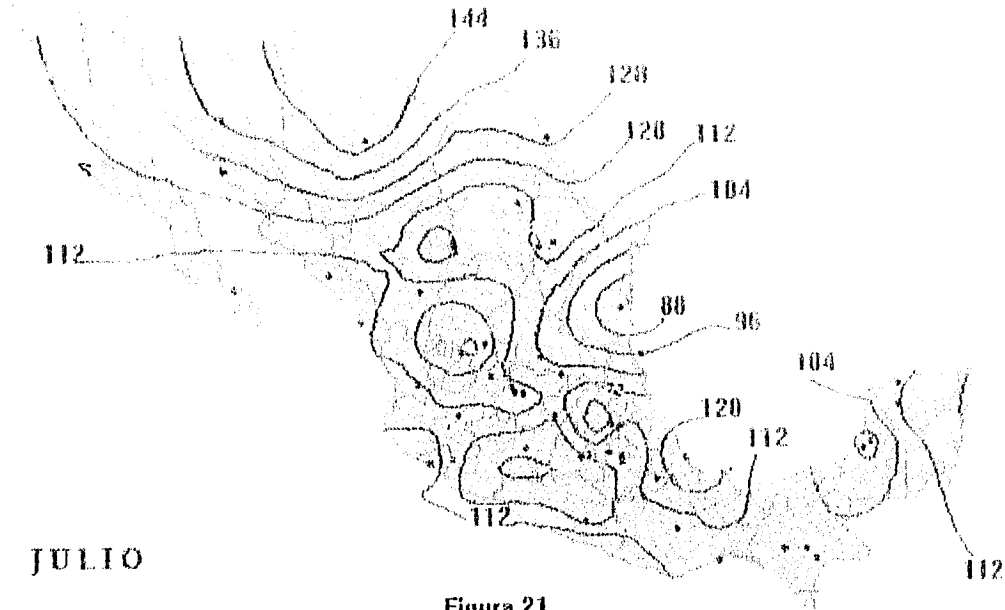


Figura 21

Figura 21. Isolneas de evapotranspiración potencial (mm) julio.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

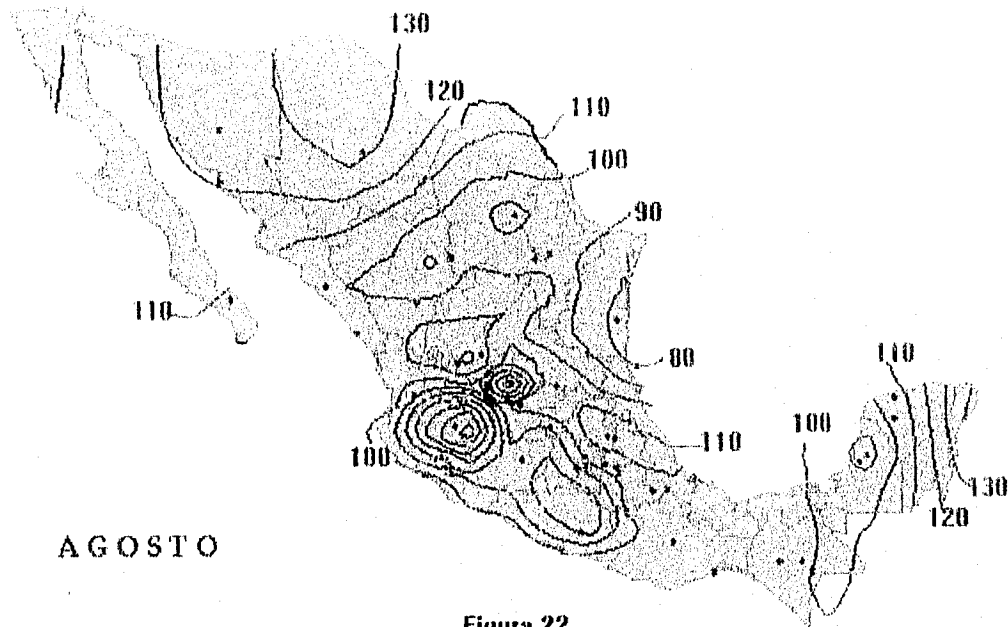


Figura 22

Figura 22. Isolneas de evapotranspiración potencial (mm) agosto.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

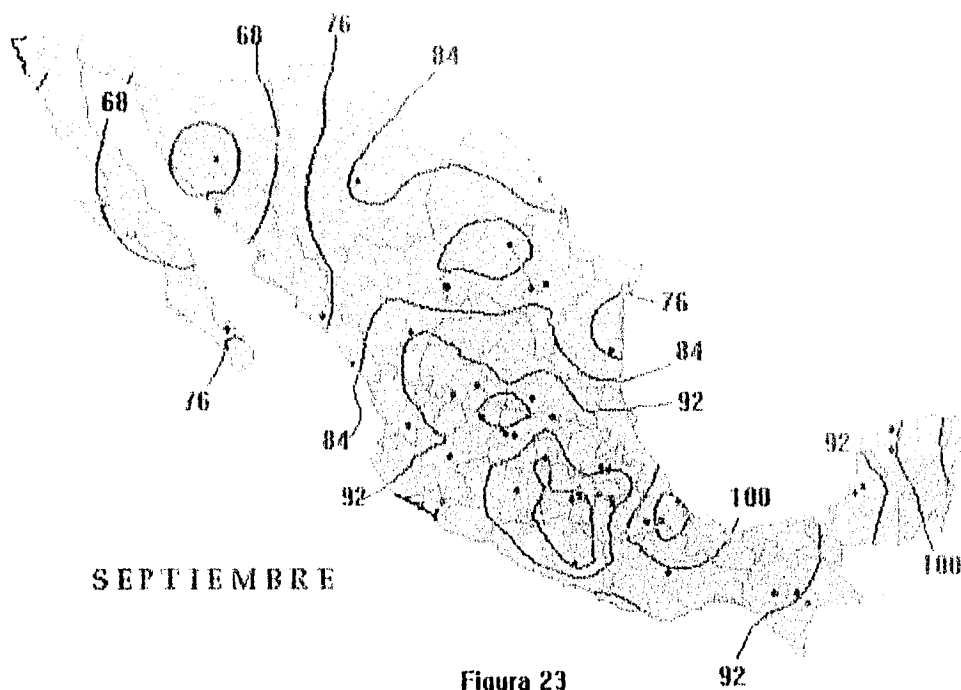


Figura 23. Isolineas de evapotranspiración potencial (mm) septiembre.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

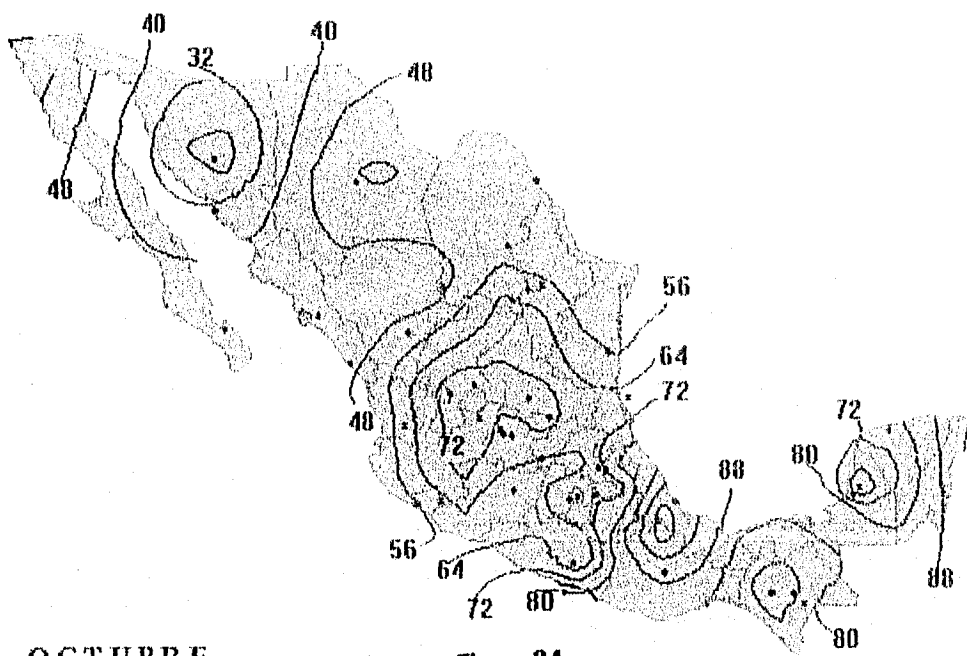
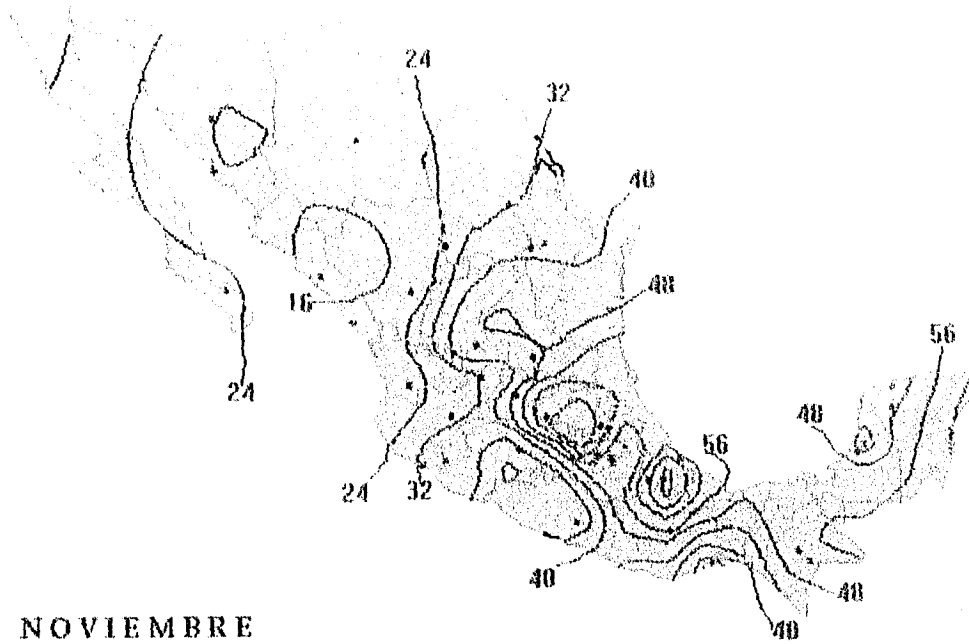


Figura 24. Isolineas de evapotranspiración potencial (mm) octubre.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION

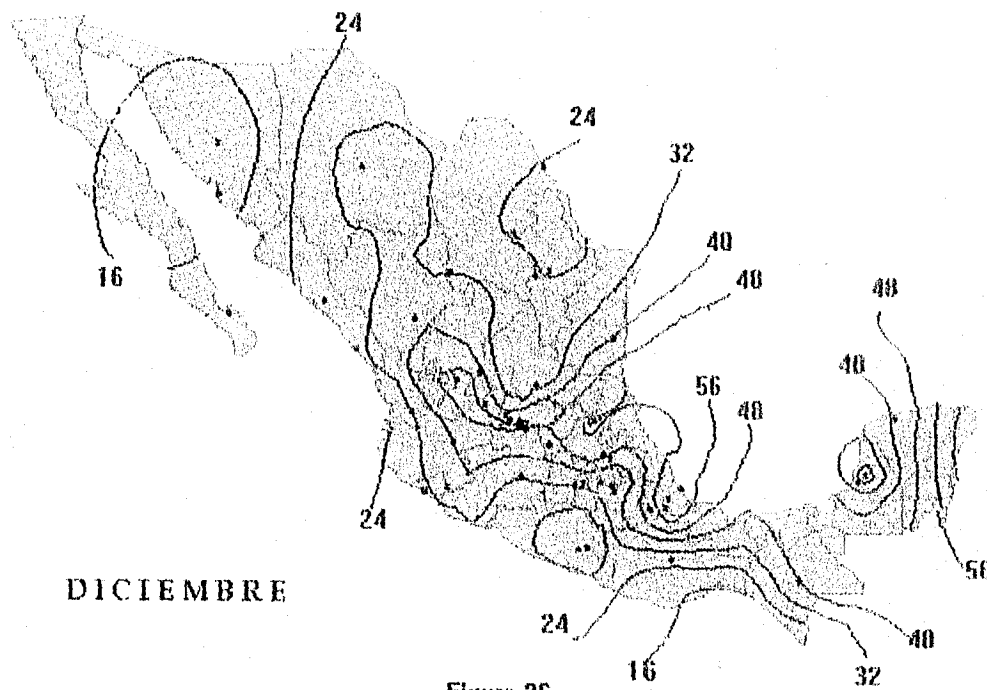


NOVIEMBRE

Figura 25

Figura 25. Isolíneas de evapotranspiración potencial (mm) noviembre.

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION



DICIEMBRE

Figura 26

Figura 26. Isolíneas de evapotranspiración potencial (mm) diciembre.

ANEXO D

ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL MENSUAL

BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE

CAMBIO CLIMATICO

EVAPOTRANSPIRACION

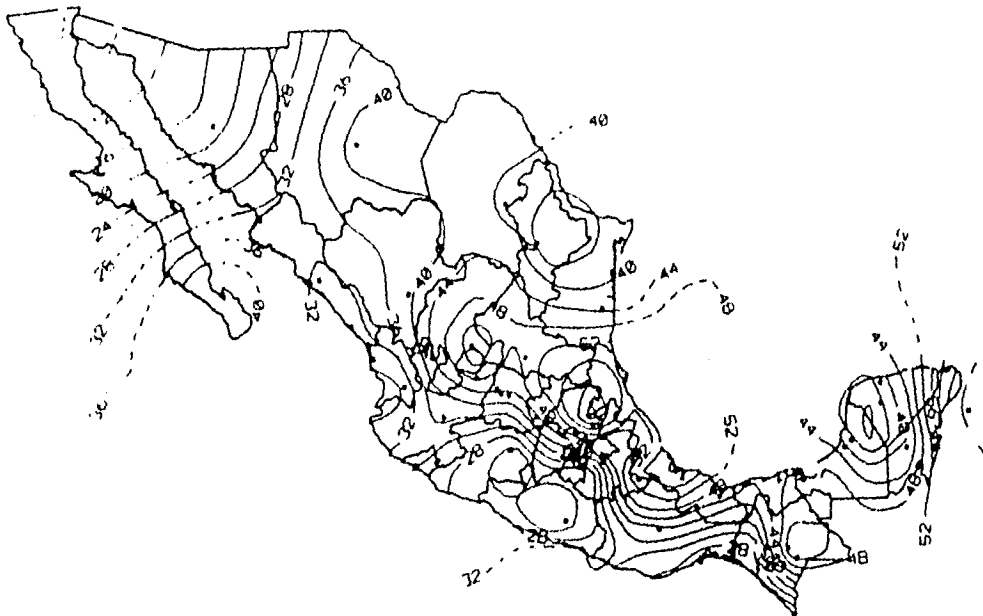


Figura 27. Isolineas de evapotranspiración (mm) enero.

EVAPOTRANSPIRACION

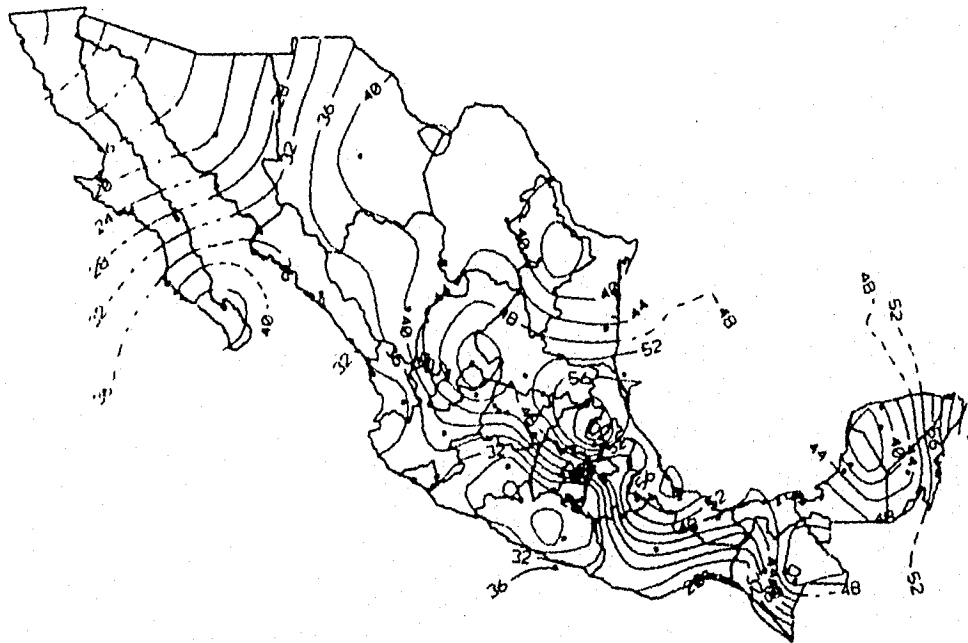


Figura 28. Isolineas de evapotranspiración (mm) enero + 0.9 °C.

E.VAPOTRANSPIRACION

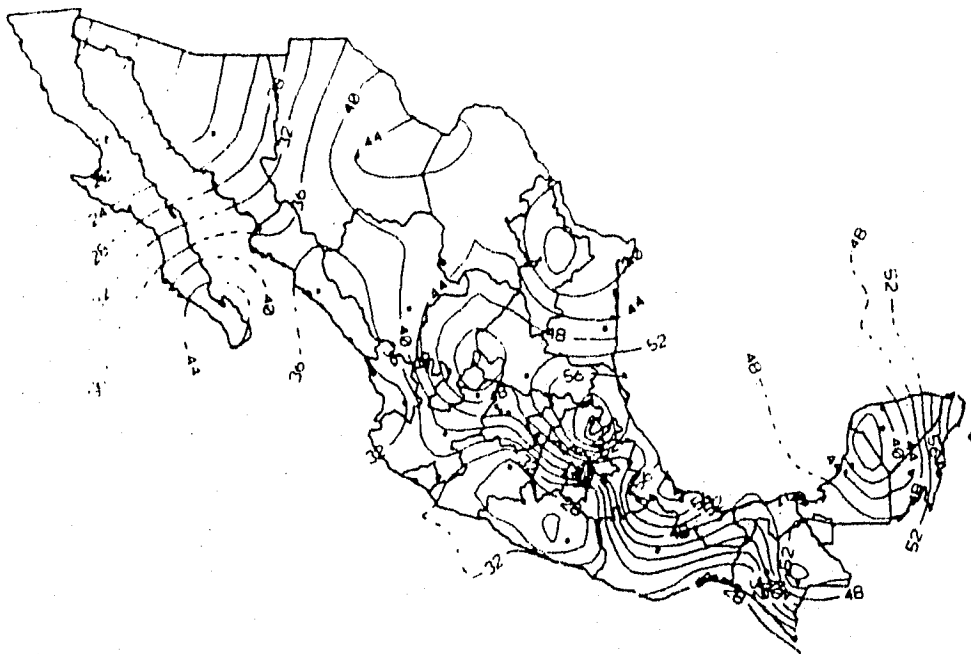


Figura 29. Isoleínas de evapotranspiración (mm) enero + 1.3 °C.

E.VAPOTRANSPIRACION

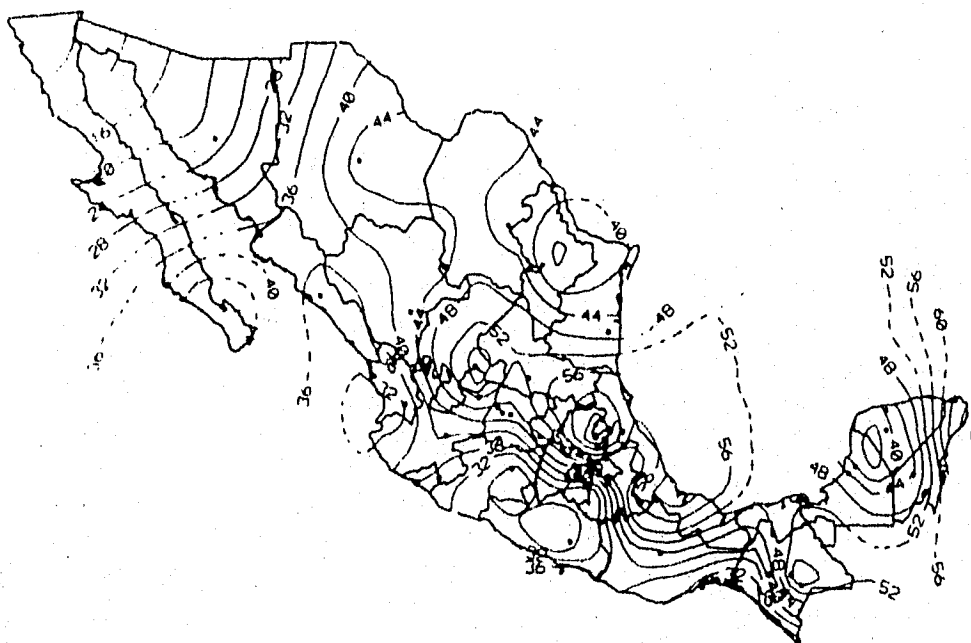


Figura 30. Isoleínas de evapotranspiración (mm) enero + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

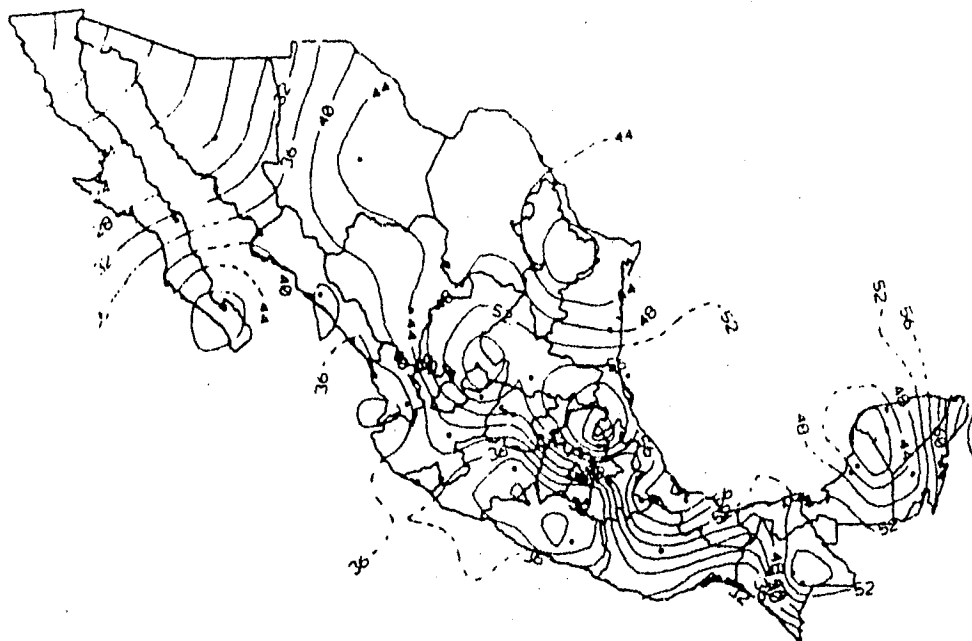


Figura 31. Isoleas de evapotranspiración (mm) enero + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

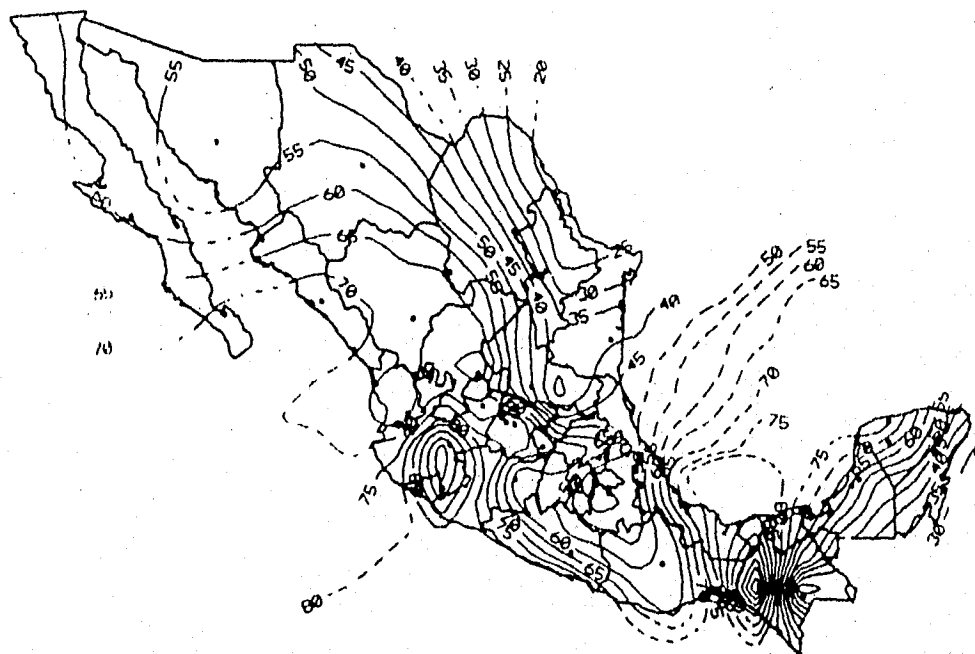


Figura 32. Isoleas de evapotranspiración (mm) febrero.

EVAPOTRANSPIRACION

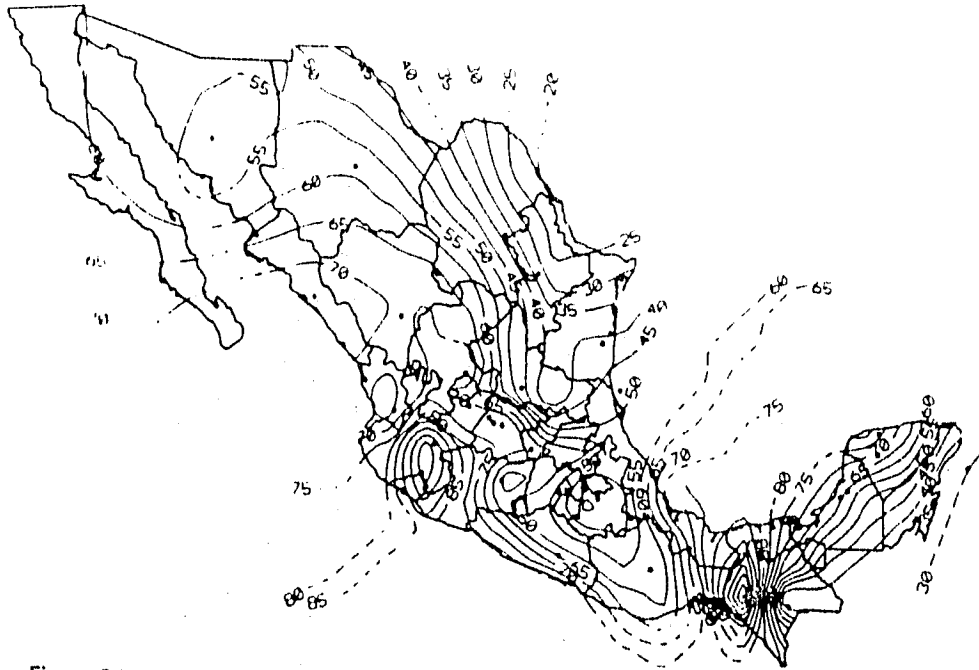


Figura 33. Isolneas de evapotranspiración (mm) febrero + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

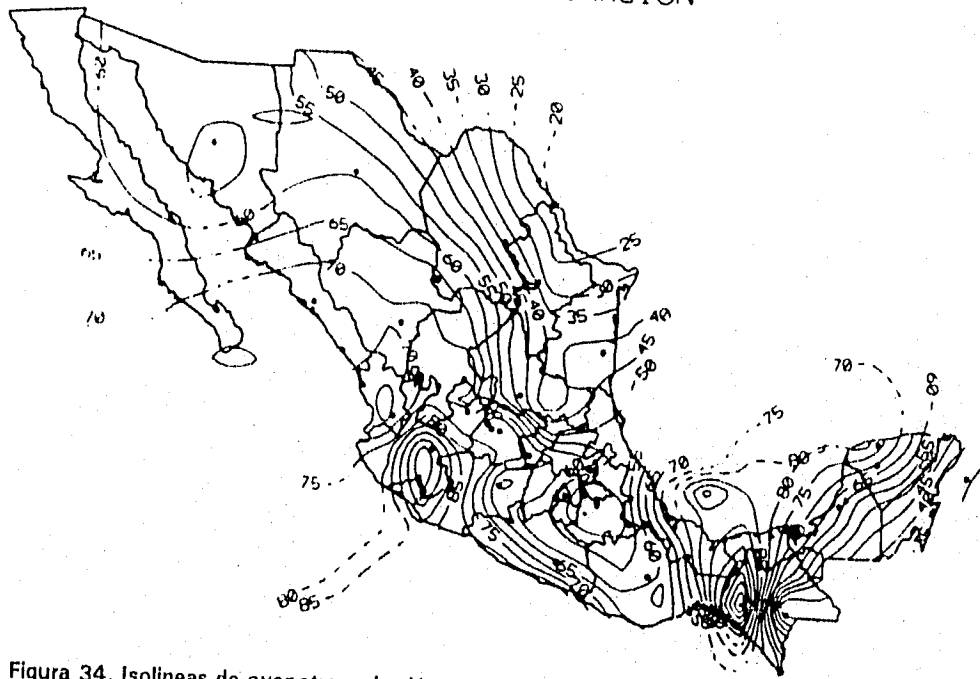


Figura 34. Isolneas de evapotranspiración (mm) febrero + 1.3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION



Figura 35. Isoleas de evapotranspiración (mm) febrero + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

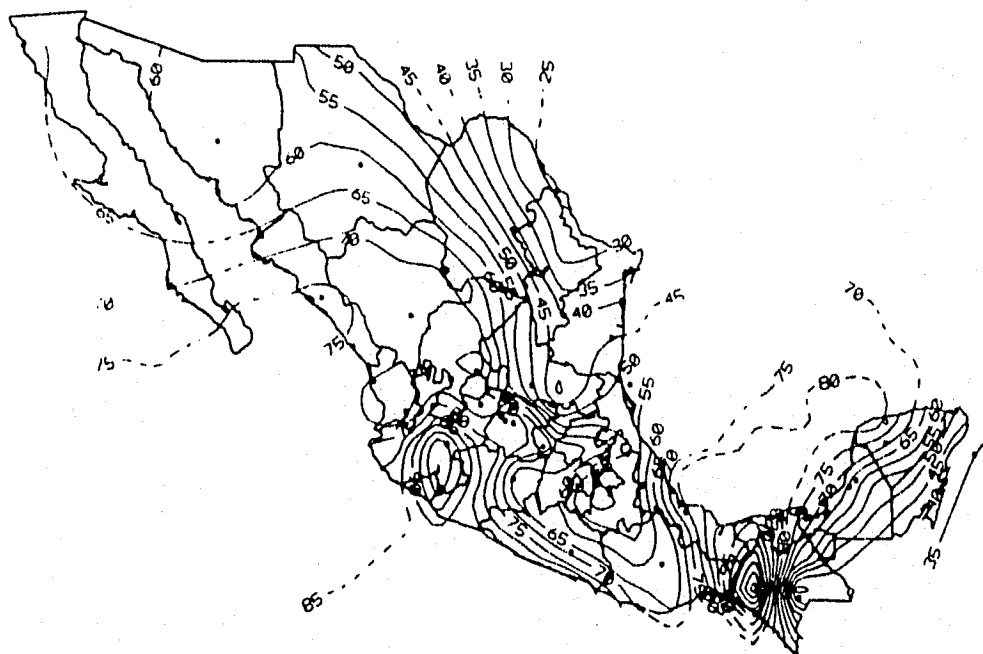


Figura 36. Isoleas de evapotranspiración (mm) febrero + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

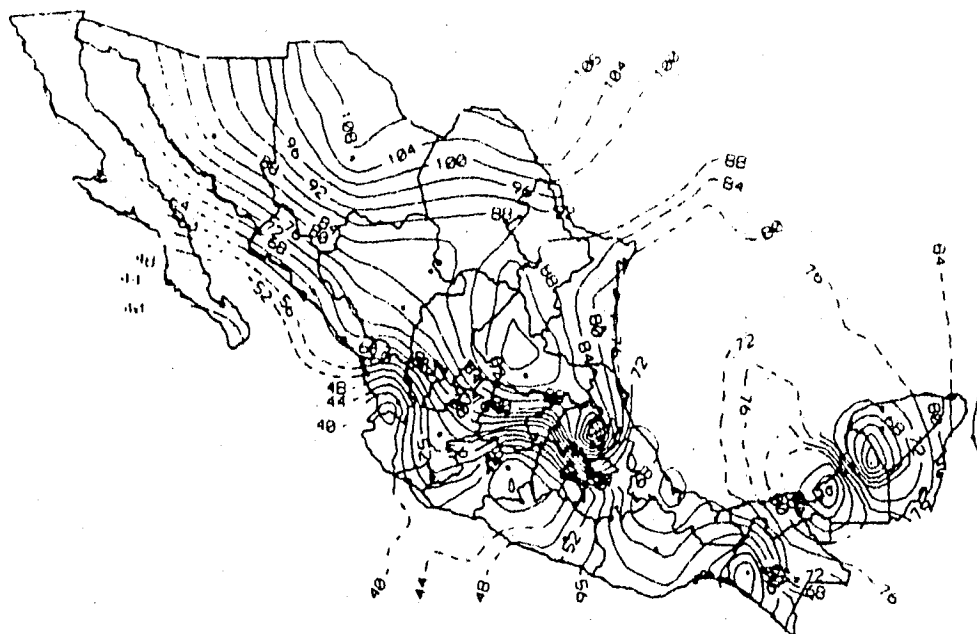


Figura 37. Isoleínas de evapotranspiración (mm) marzo.

EVAPOTRANSPIRACION

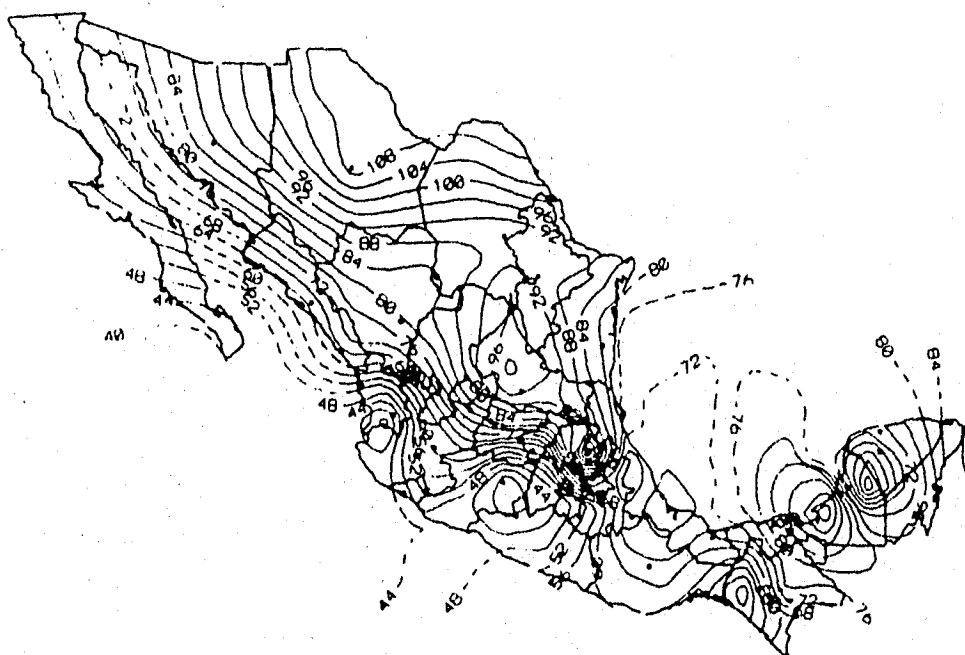


Figura 38. (isoleínas de evapotranspiración (mm) marzo + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

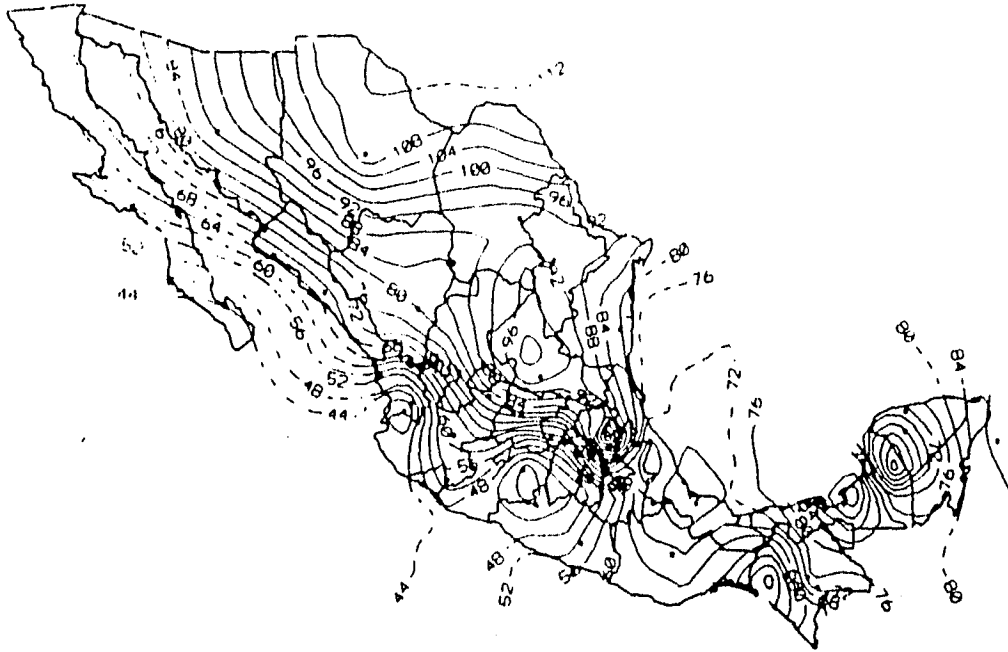


Figura 39. Isoleas de evapotranspiración (mm) marzo + 1.3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

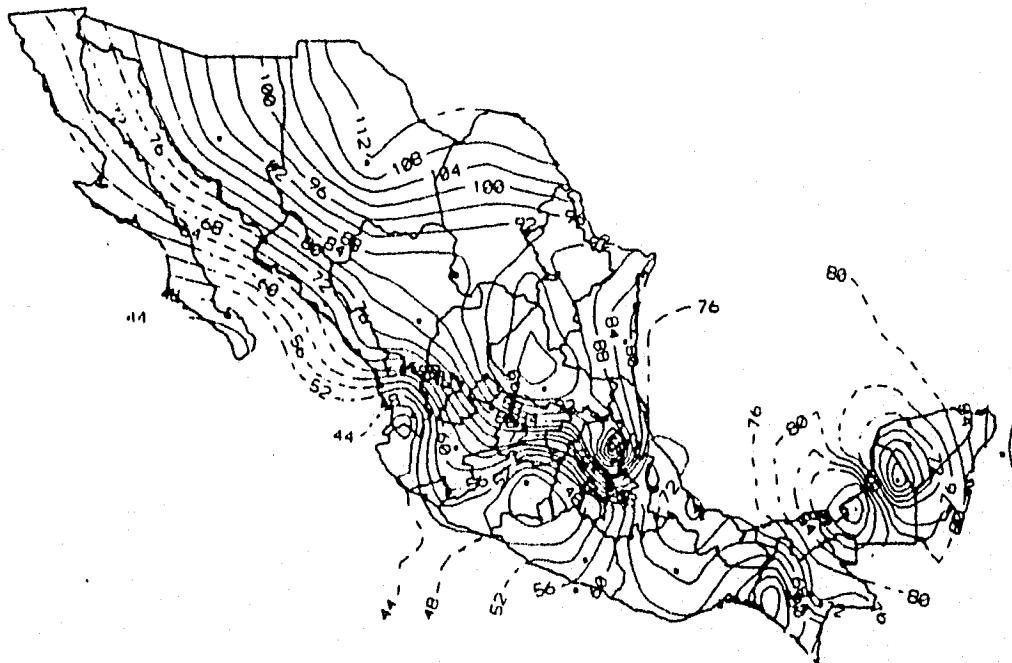


Figura 40. Isoleas de evapotranspiración (mm) marzo + 2 °C.

E VAPOTRANSPIRACION

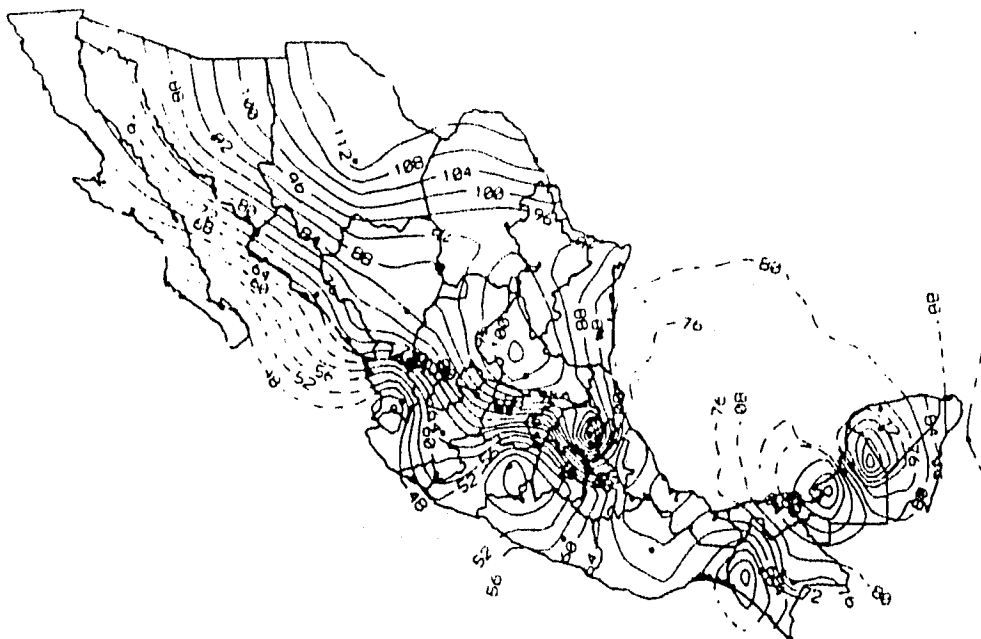


Figura 41. Isoleínas de evapotranspiración (mm) marzo + 3 °C.

E VAPOTRANSPIRACION

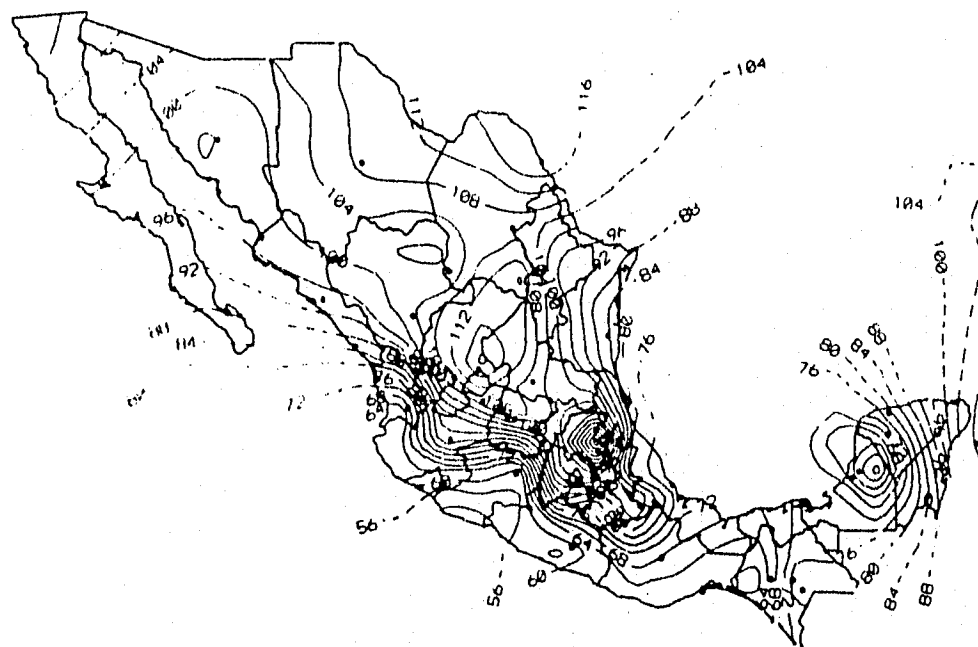


Figura 42. Isoleínas de evapotranspiración (mm) abril.

EVAPOTRANSPIRACION

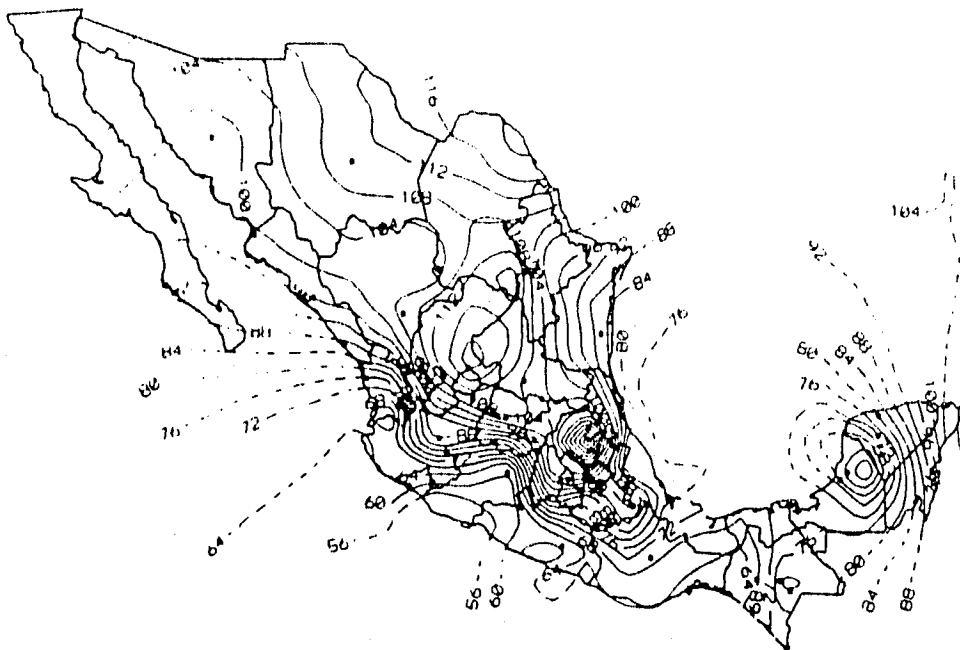


Figura 43. Isoleínas de evapotranspiración (mm) abril + 0.9°C.

EVAPOTRANSPIRACION

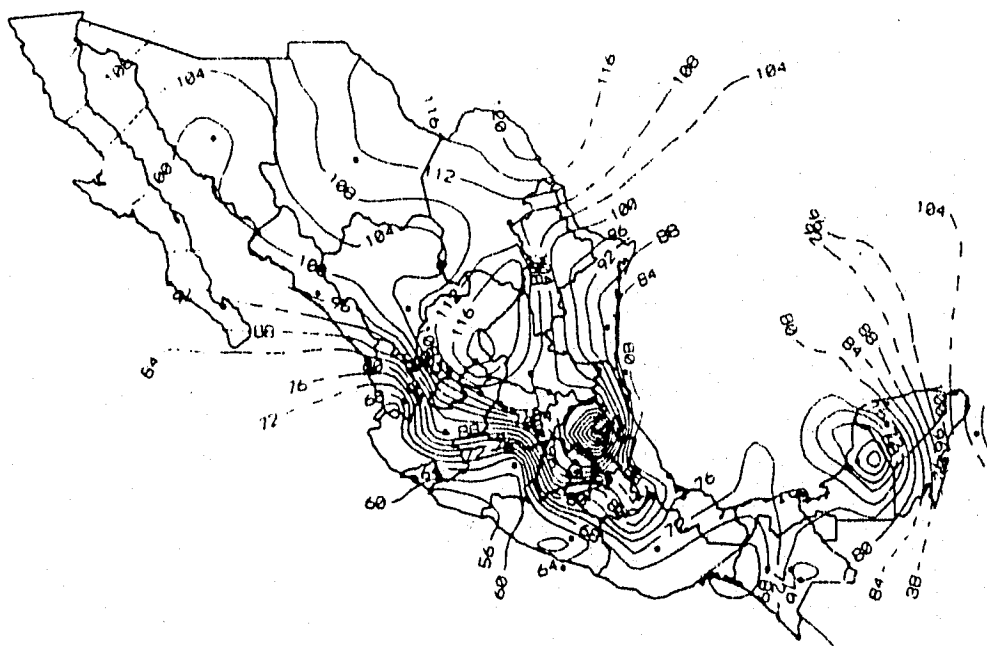


Figura 44. Isoleínas de evapotranspiración (mm) abril + 1.3°C.

EVAPOTRANSPIRACION

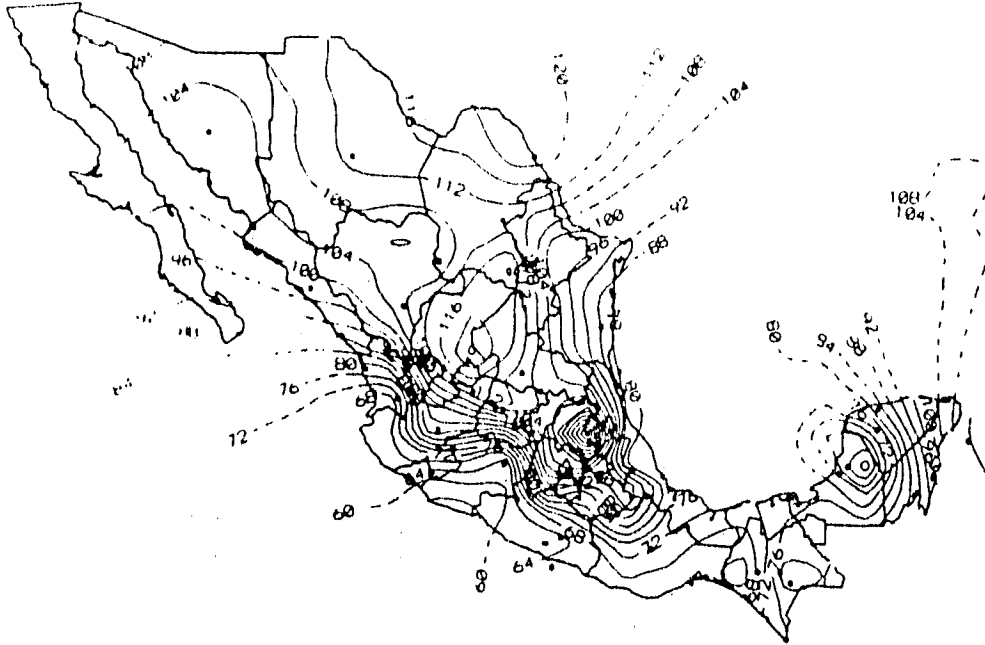


Figura 45. Isoleas de evapotranspiración (mm) abril + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

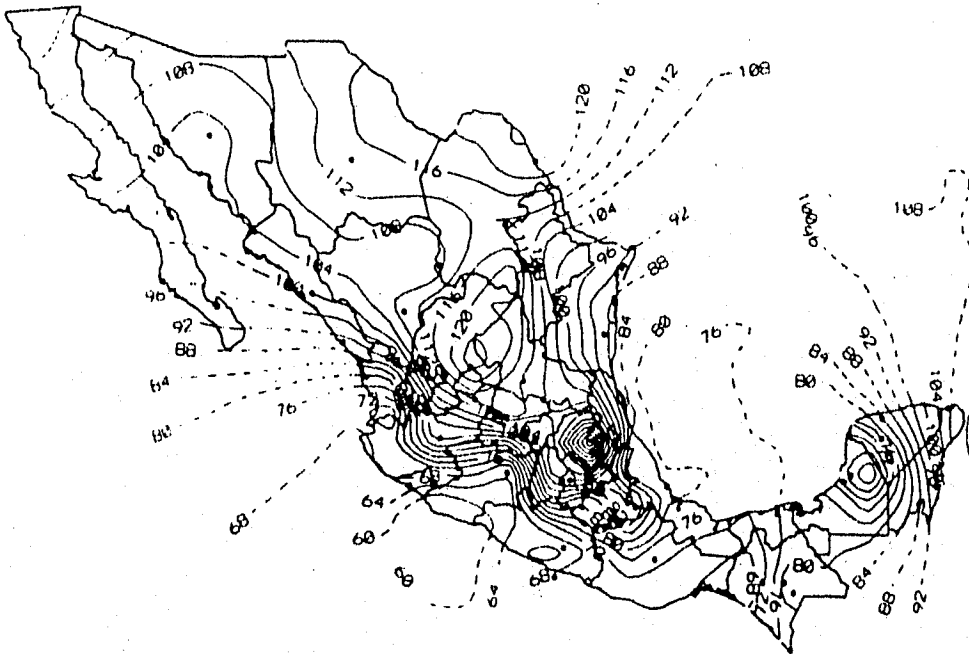


Figura 46. Isoleas de evapotranspiración (mm) abril + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

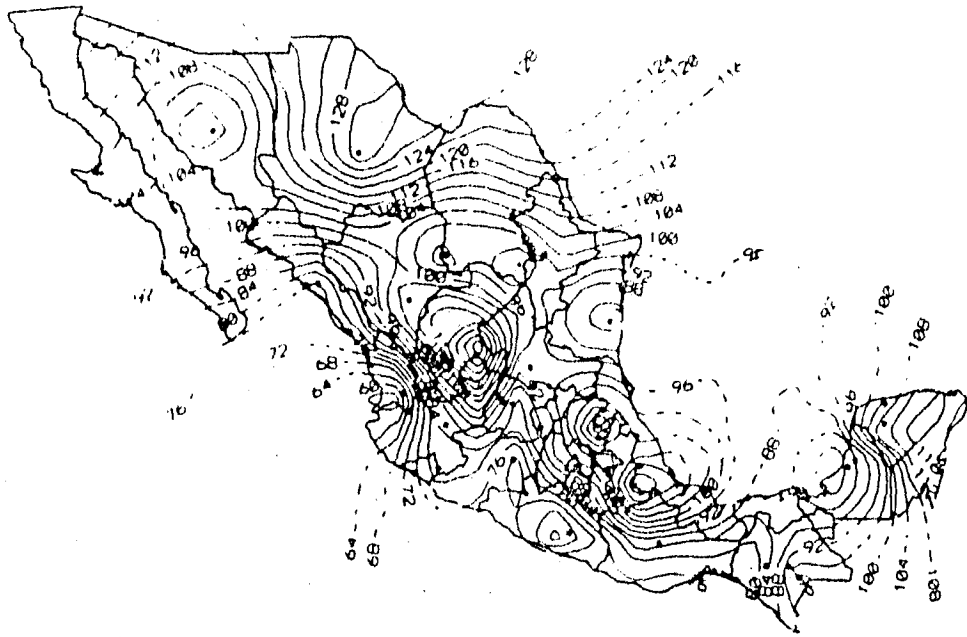


Figura 47. Isolíneas de evapotranspiración (mm) mayo.

EVAPOTRANSPIRACION

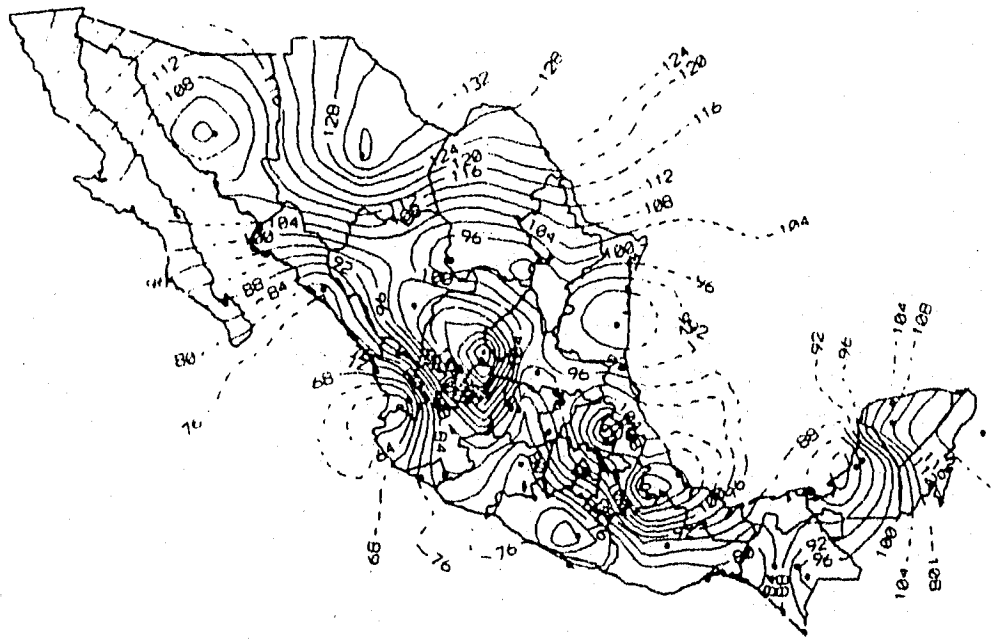


Figura 48. Isolíneas de evapotranspiración (mm) mayo + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACIÓN

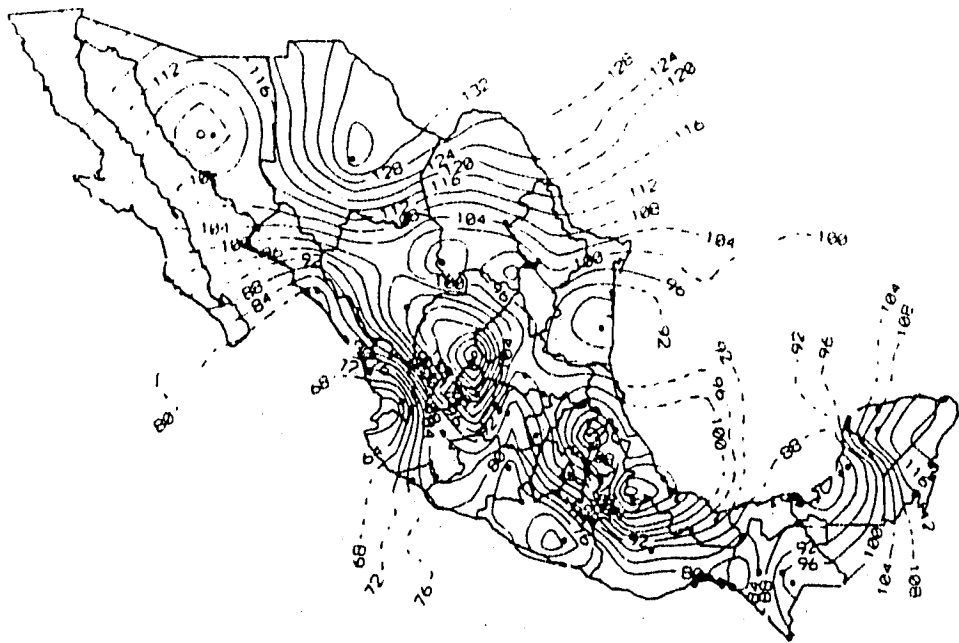


Figura 49. Isoleínas de evapotranspiración (mm) mayo + 1.3 °C.

EVAPOTRANSPIRACIÓN

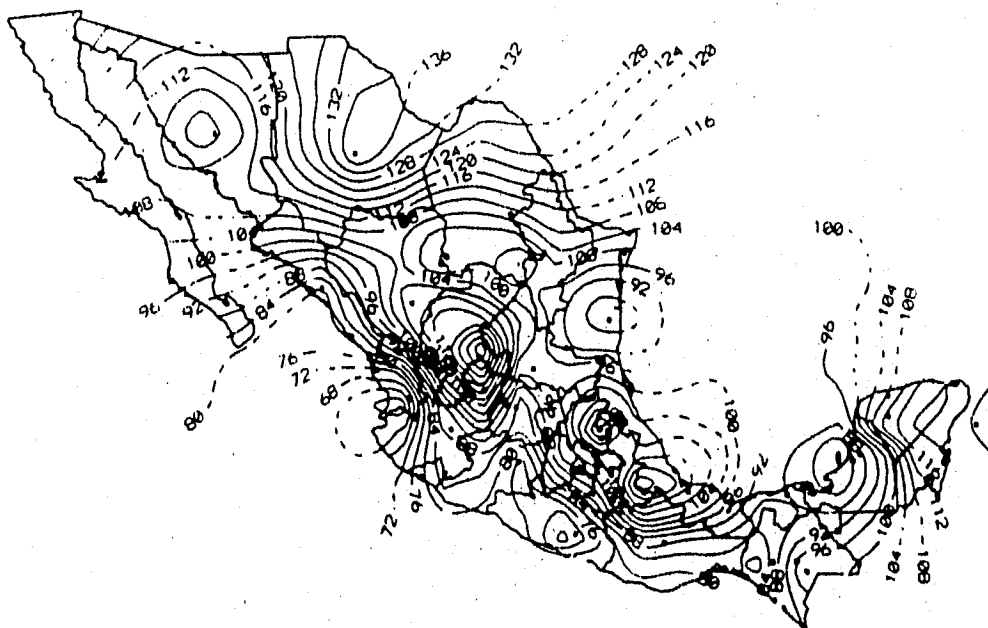


Figura 50. Isoleínas de evapotranspiración (mm) mayo + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

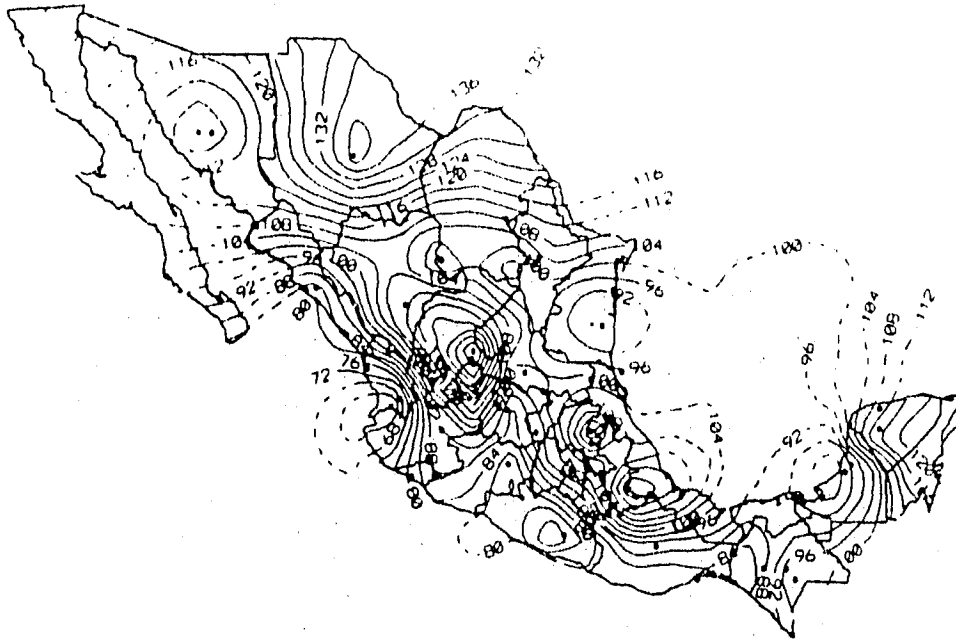


Figura 51. Isoleas de evapotranspiración (mm) mayo + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

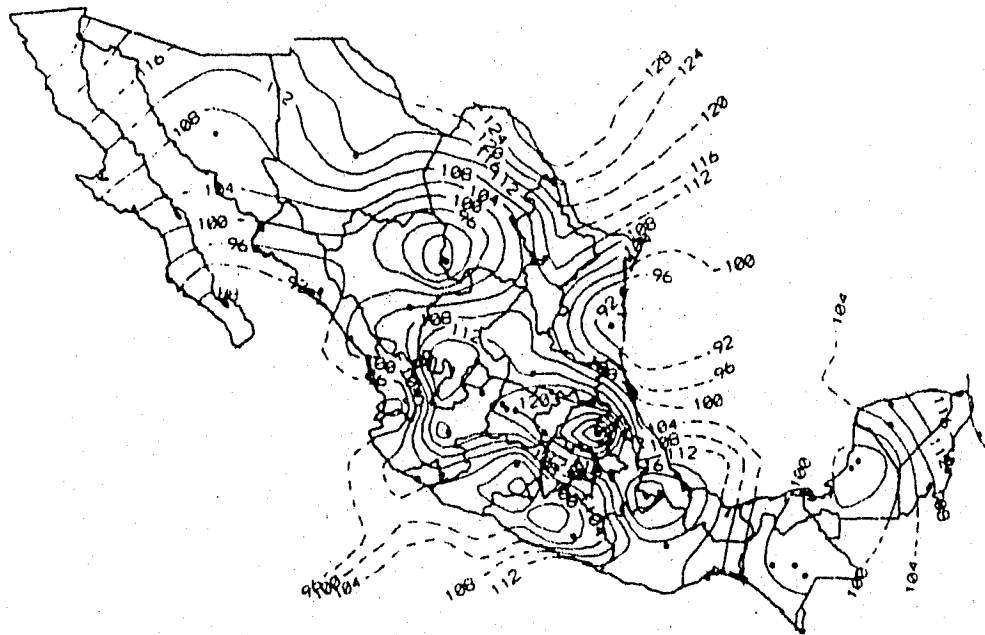


Figura 52. Isoleas de evapotranspiración (mm) junio.

E V A P O T R A N S P I R A C I O N

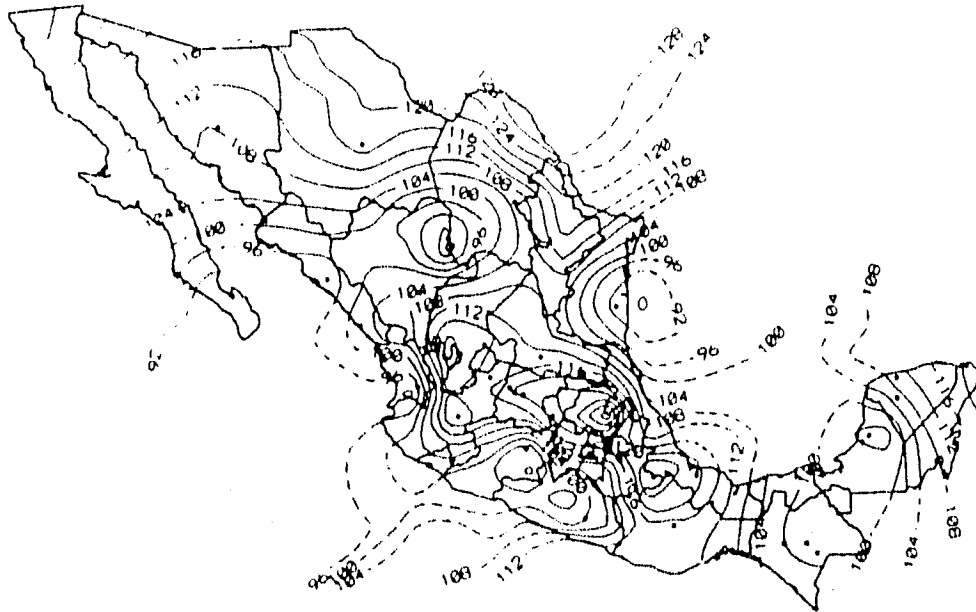


Figura 53. Isolineas de evapotranspiración (mm) junio + 0.9 °C.

E V A P O T R A N S P I R A C I O N

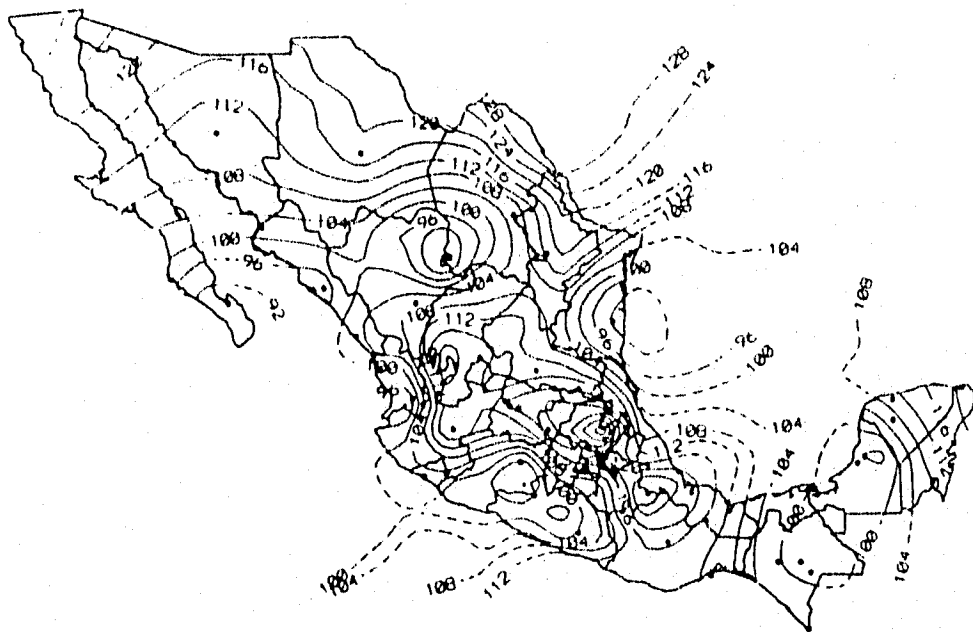


Figura 54. Isolineas de evapotranspiración (mm) junio + 1.3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

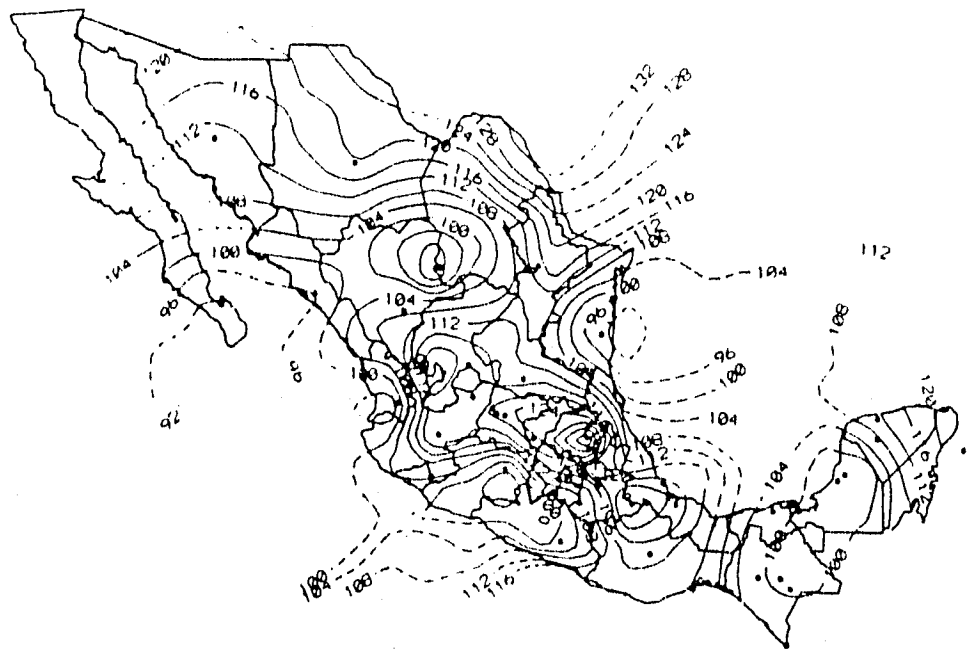


Figura 55. Isoleas de evapotranspiración (mm) junio + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

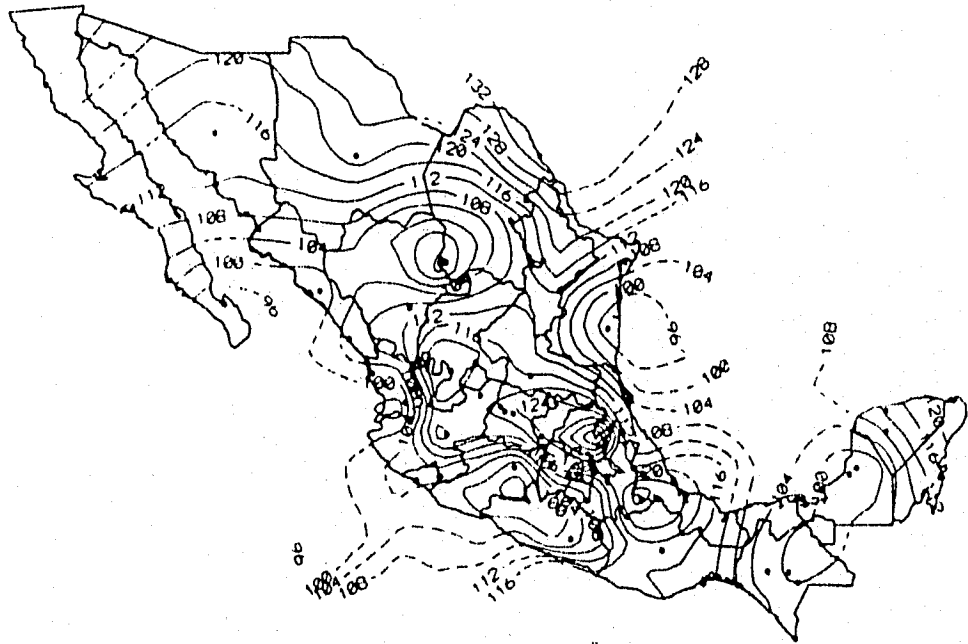


Figura 56. Isoleas de evapotranspiración (mm) junio + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

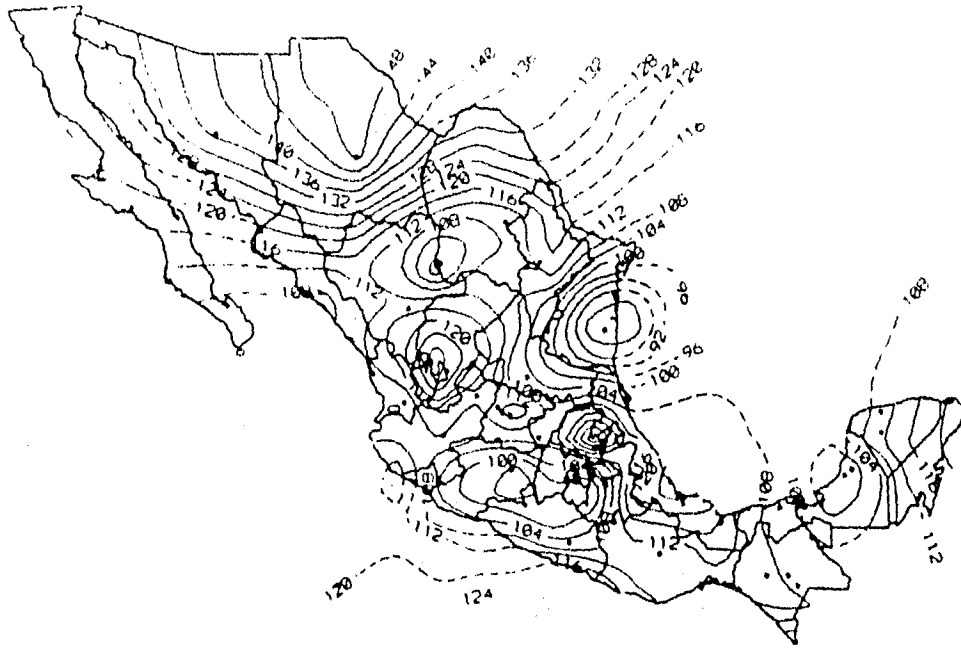


Figura 57. Isoleas de evapotranspiración (mm) julio.

EVAPOTRANSPIRACION

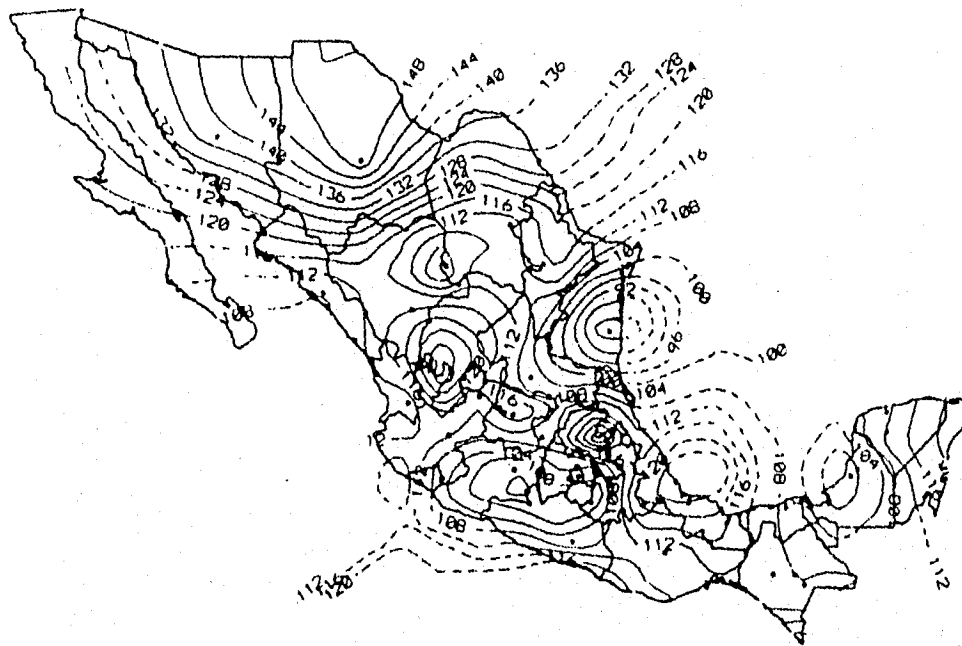


Figura 58. Isoleas de evapotranspiración (mm) julio + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

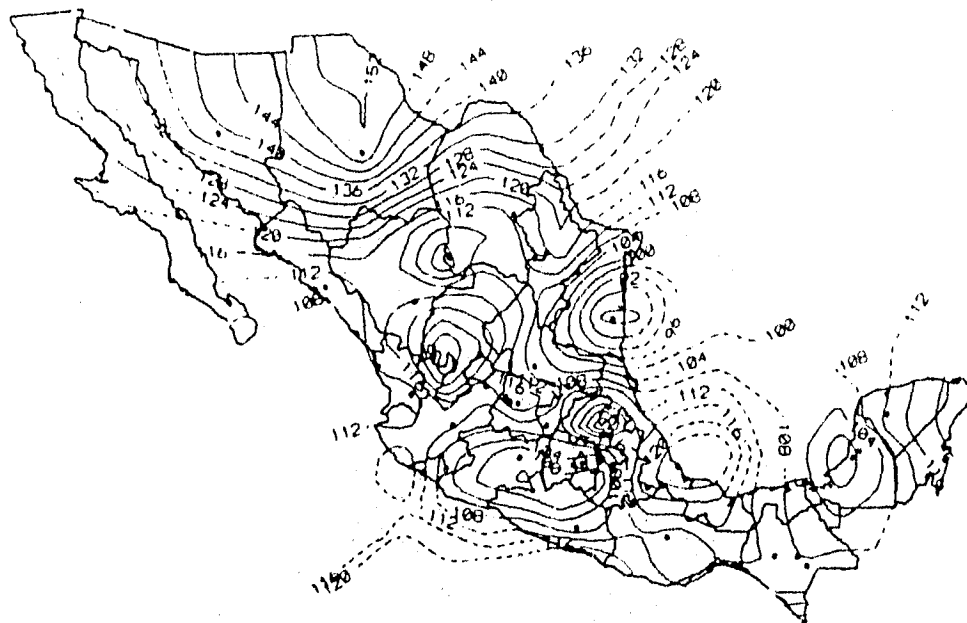


Figura 59. Isoleínas de evapotranspiración (mm) julio + 1.3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

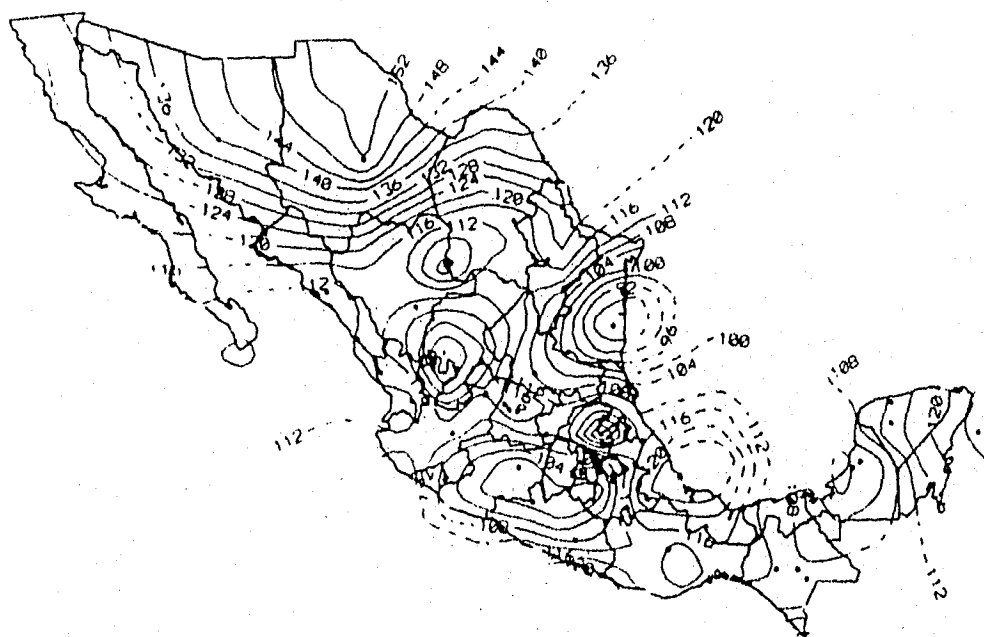


Figura 60. Isoleínas de evapotranspiración (mm) julio + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

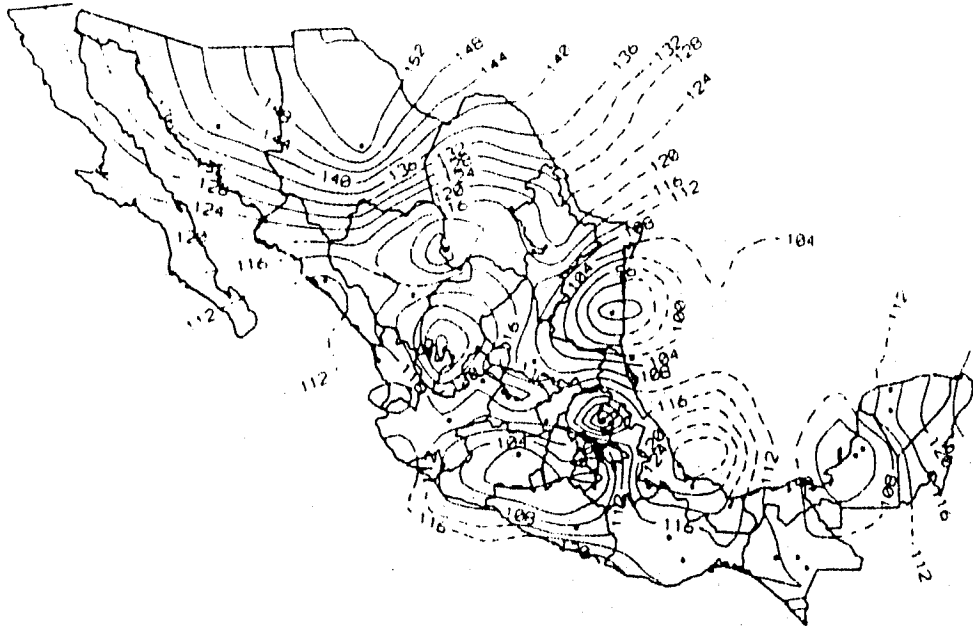


Figura 61. Isolineas de evapotranspiración (mm) julio + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

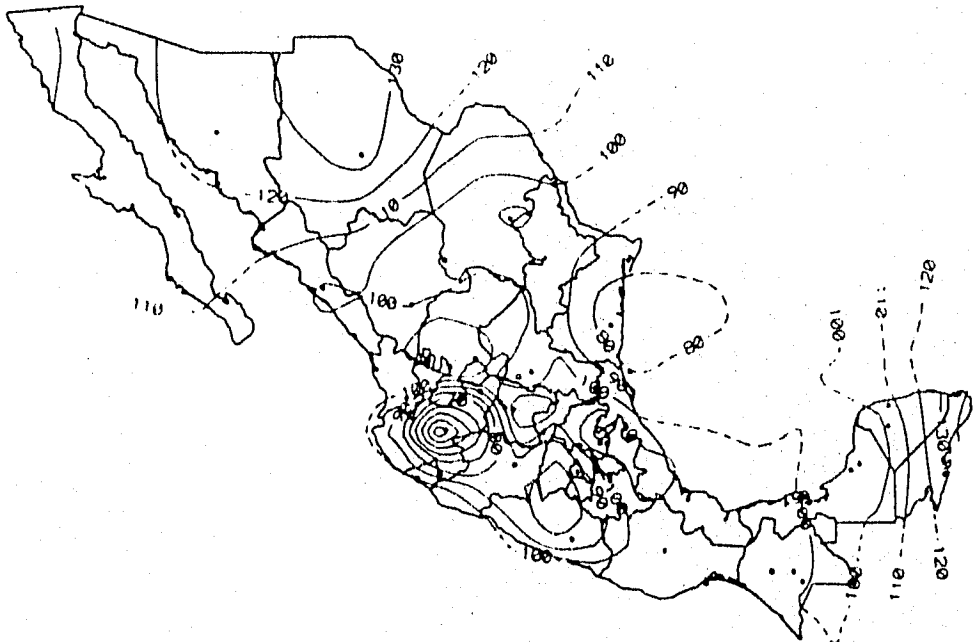


Figura 62. Isolineas de evapotranspiración (mm) agosto.

EVAPOTRANSPIRACION

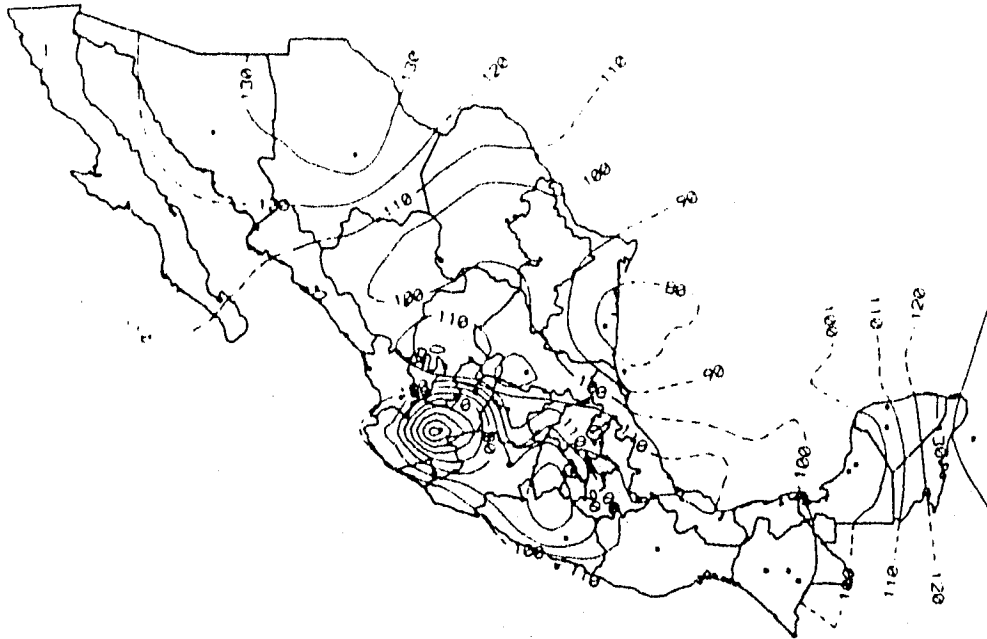


Figura 63. Isolineas de evapotranspiración (mm) agosto + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

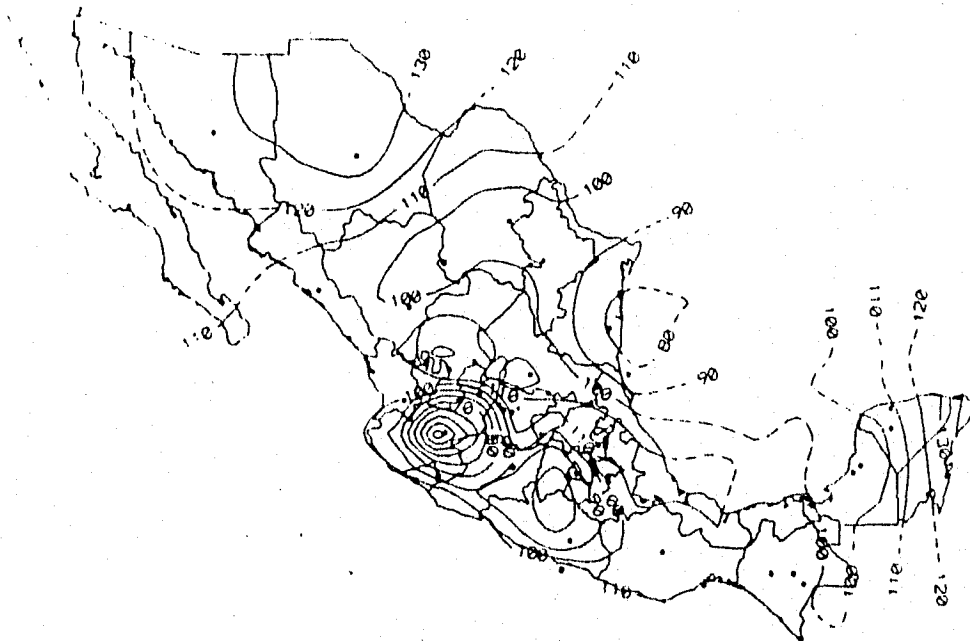


Figura 64. Isolineas de evapotranspiración (mm) agosto + 1.3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

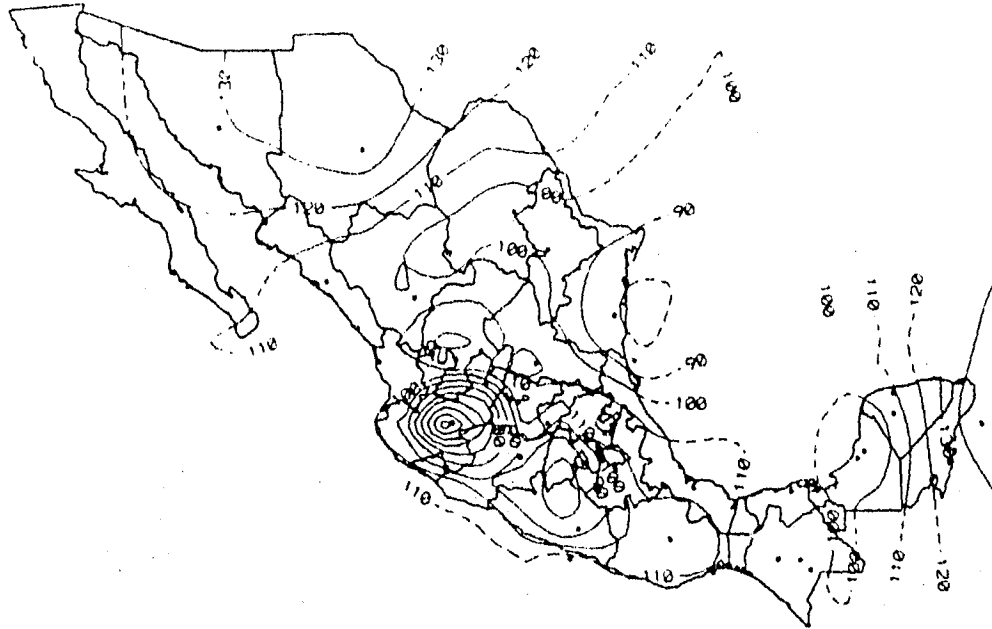


Figura 65. Isolineas de evapotranspiración (mm) agosto + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

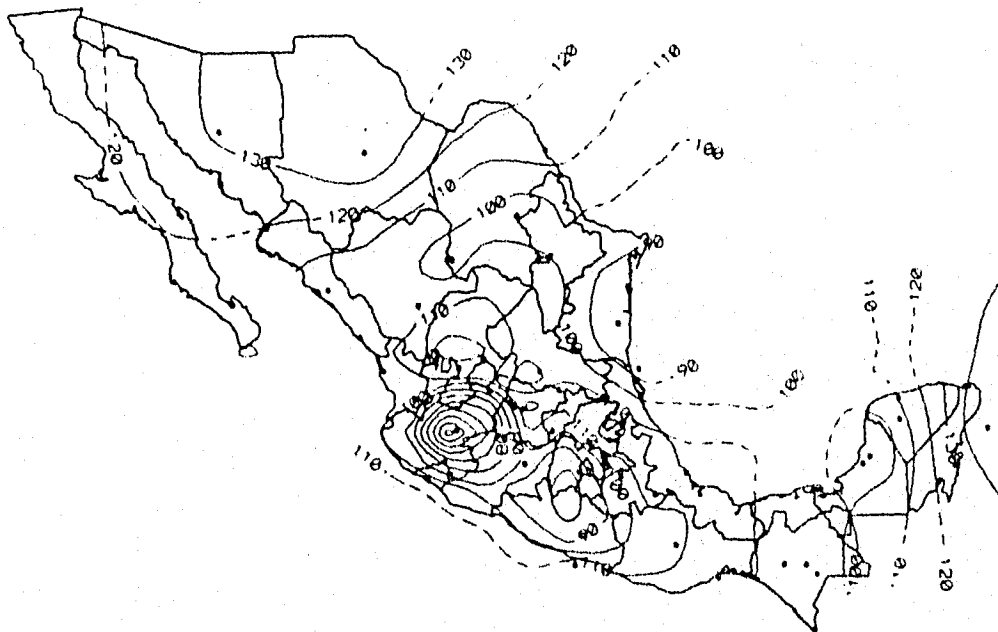


Figura 66. Isolineas de evapotranspiración (mm) agosto + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

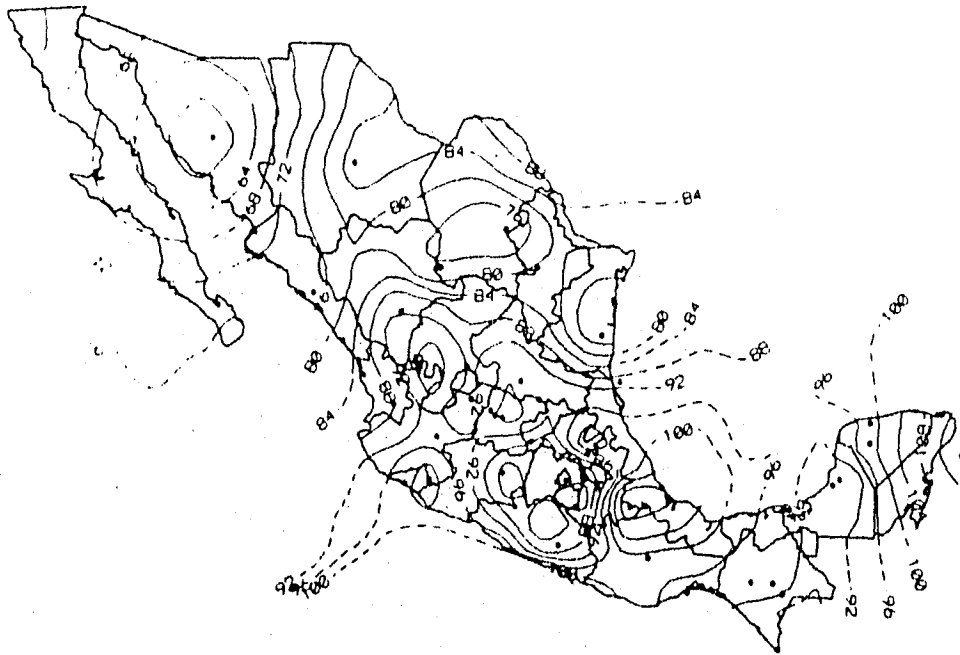


Figura 67. Isoleínas de evapotranspiración (mm) septiembre.

EVAPOTRANSPIRACION

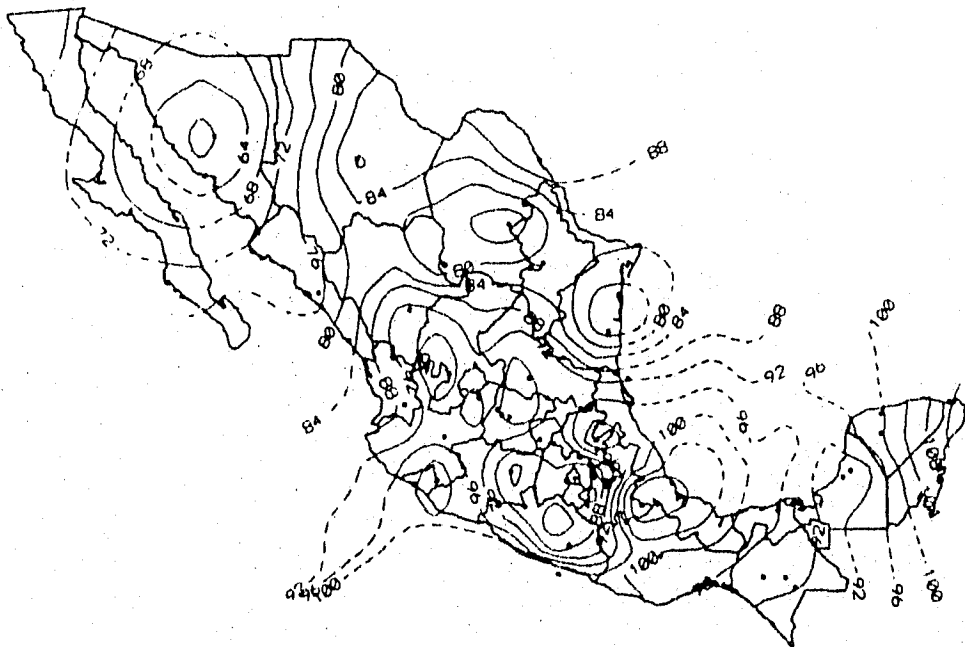


Figura 68. Isoleínas da evapotranspiración (mm) septiembre + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

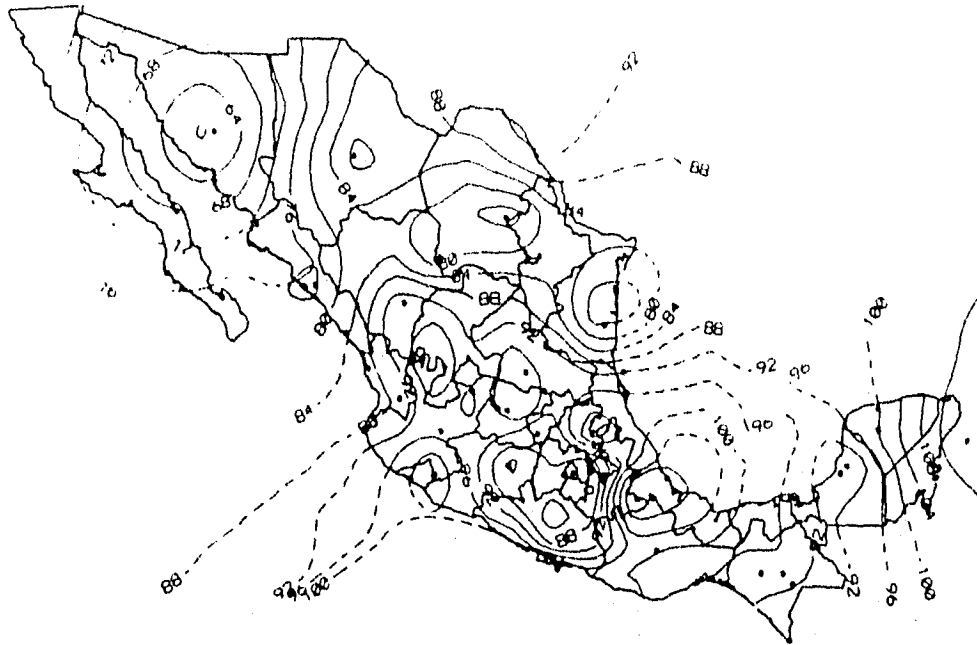


Figura 69. Isoleínas de evapotranspiración (mm) septiembre + 1.3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

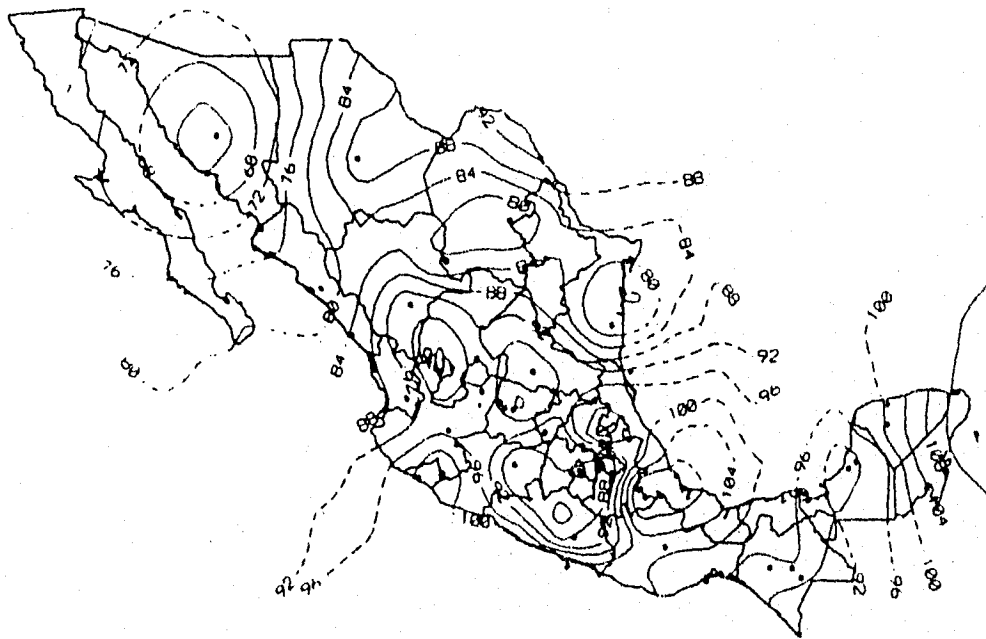


Figura 70. Isoleínas de evapotranspiración (mm) septiembre + 2 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

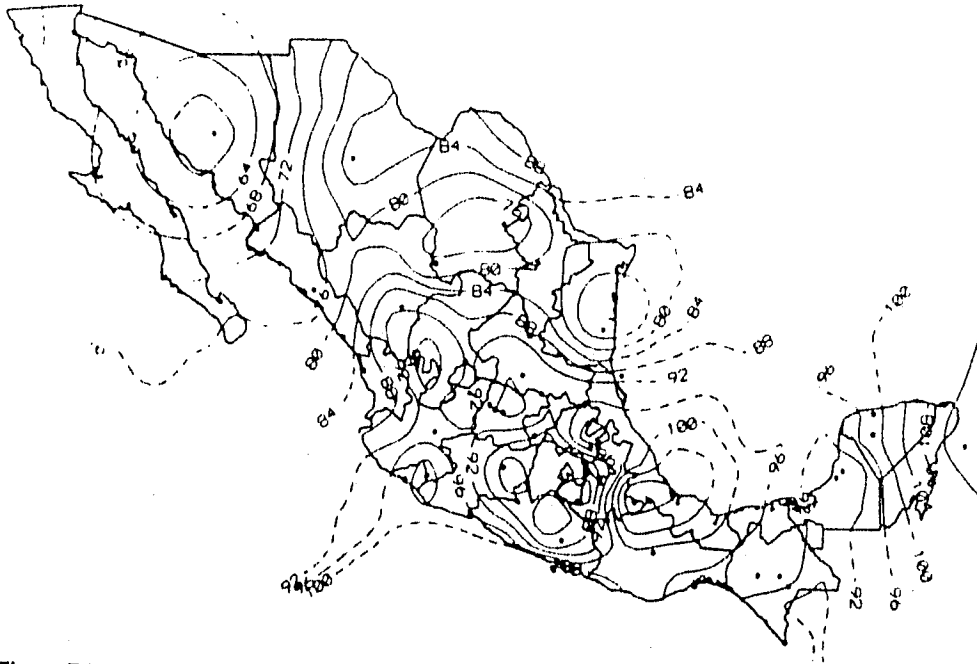


Figura 71. Isolineas de evapotranspiración (mm) septiembre + 3 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

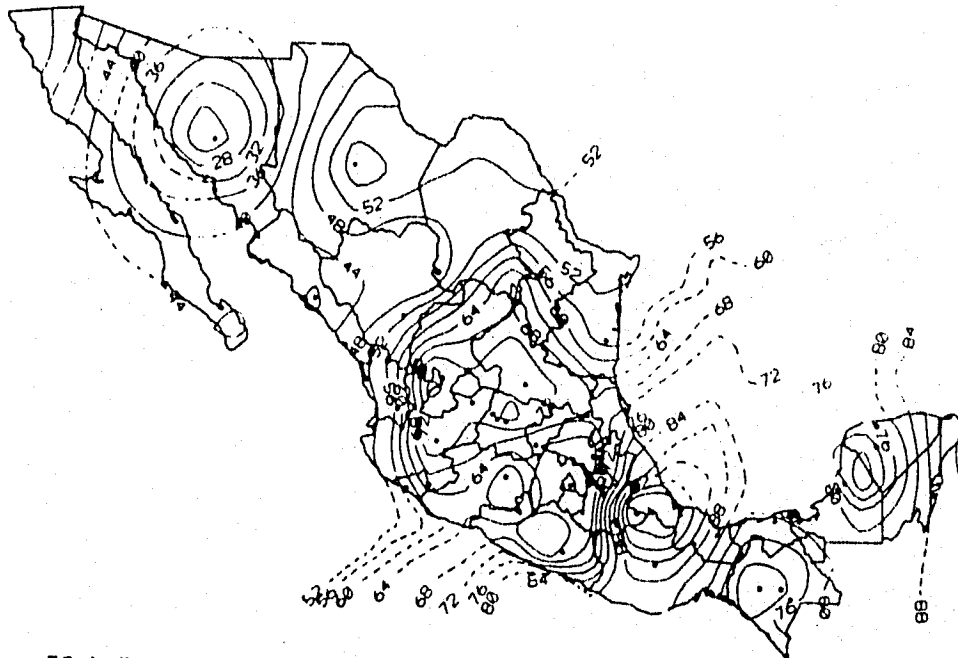


Figura 72. Isolineas de evapotranspiración (mm) octubre.

EVAPOTRANSPIRACION

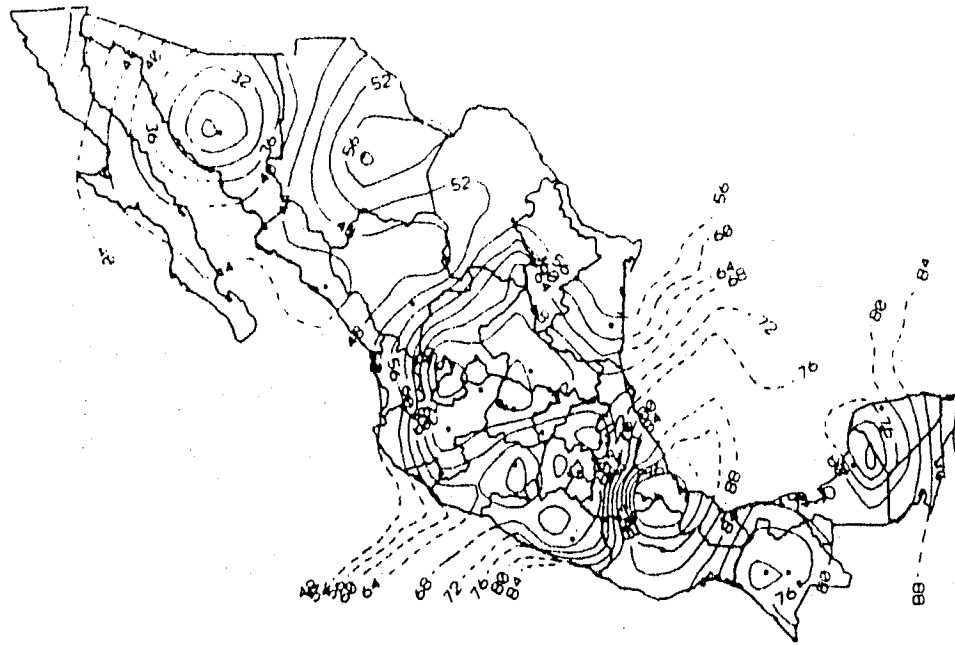


Figura 73. Isolíneas de evapotranspiración (mm) octubre + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

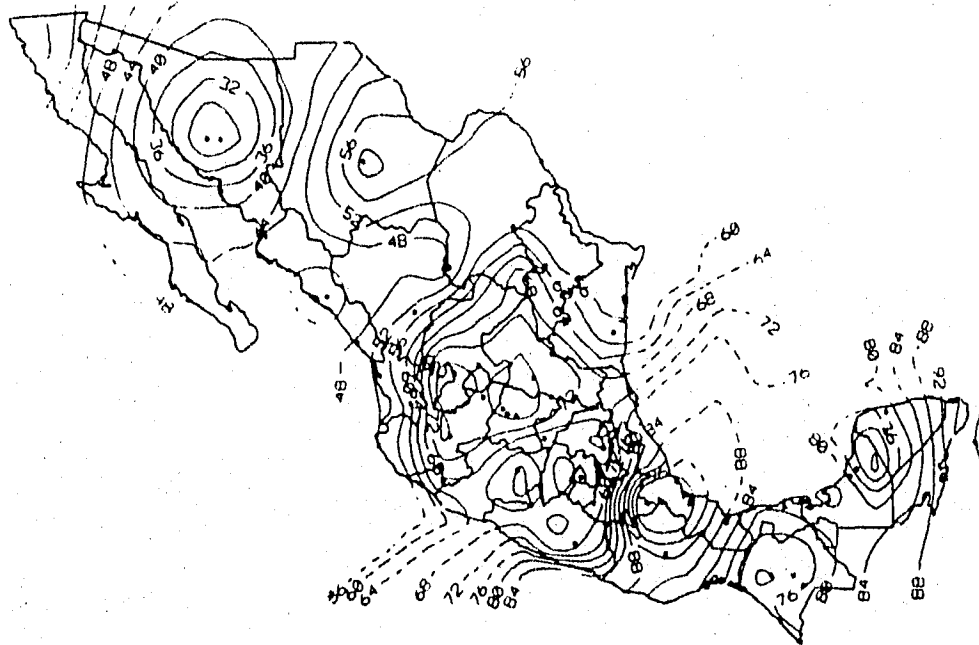


Figura 74. Isolíneas de evapotranspiración (mm) octubre + 1.3 °C.

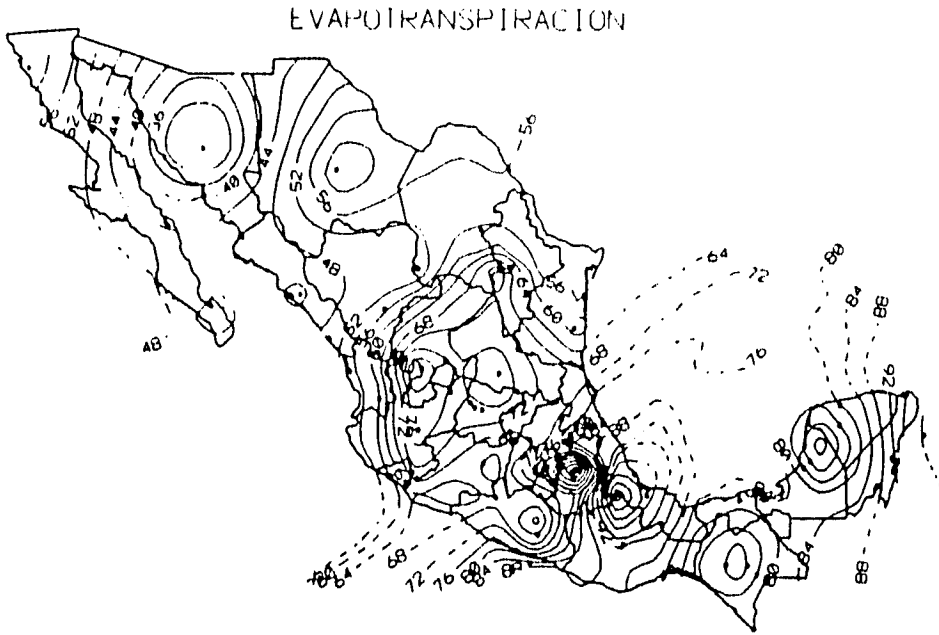


Figura 75. Isoleínas de evapotranspiración (mm) octubre + 2 °C.

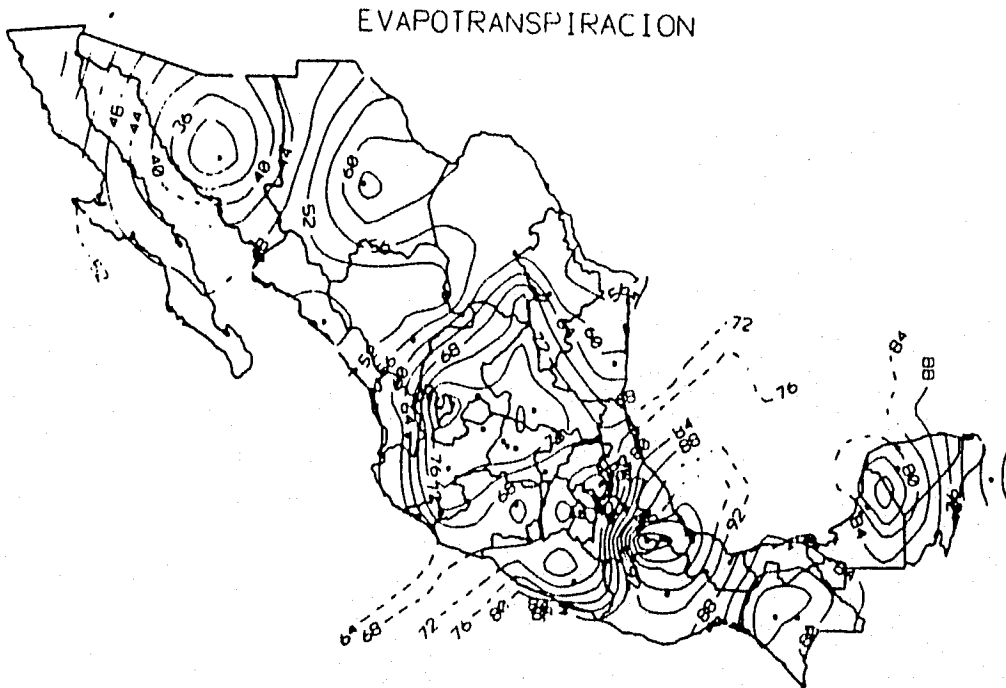


Figura 76. Isoleínas de evapotranspiración (mm) octubre + 3 °C.

FALTA PAGINA

No. 66

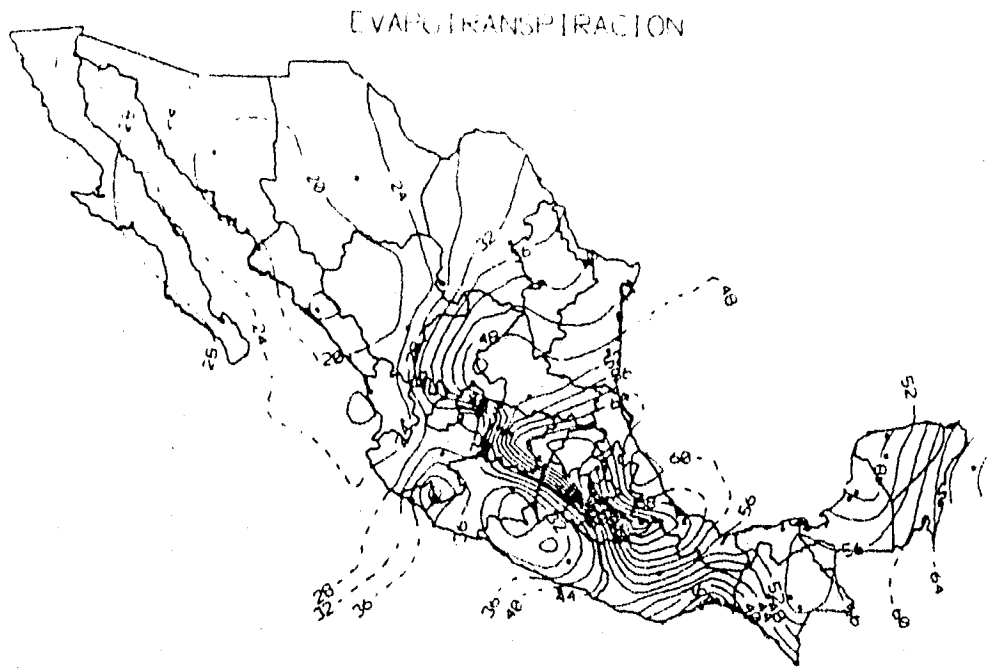


Figura 79. Isoleínas de evapotranspiración (mm) noviembre + 1.3 °C.

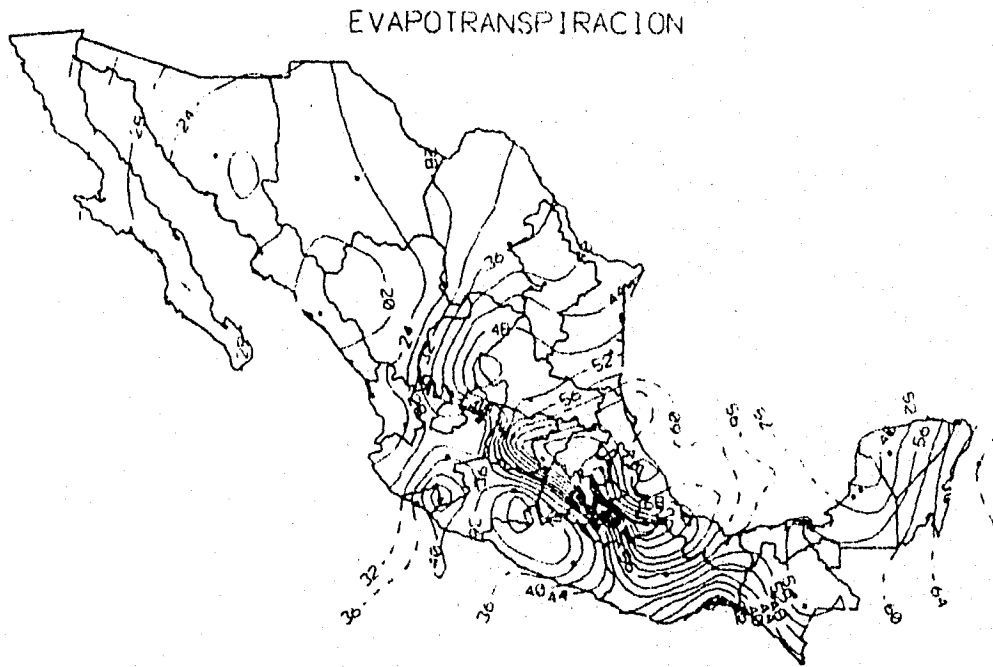


Figura 80. Isoleínas de evapotranspiración (mm) noviembre + 2 °C.

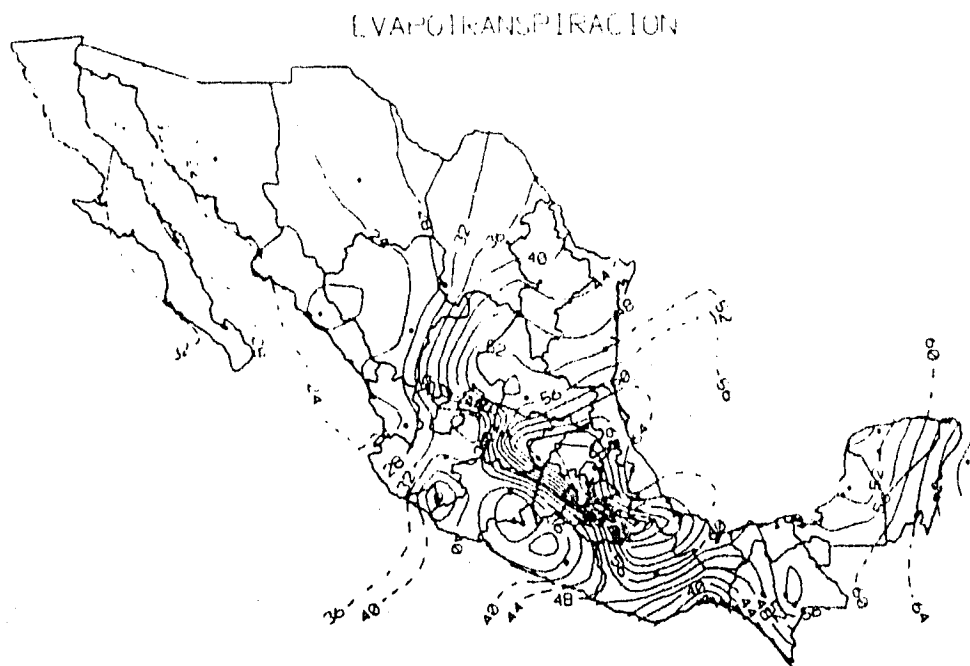


Figura 81. Isolíneas de evapotranspiración (mm) noviembre + 3 °C.

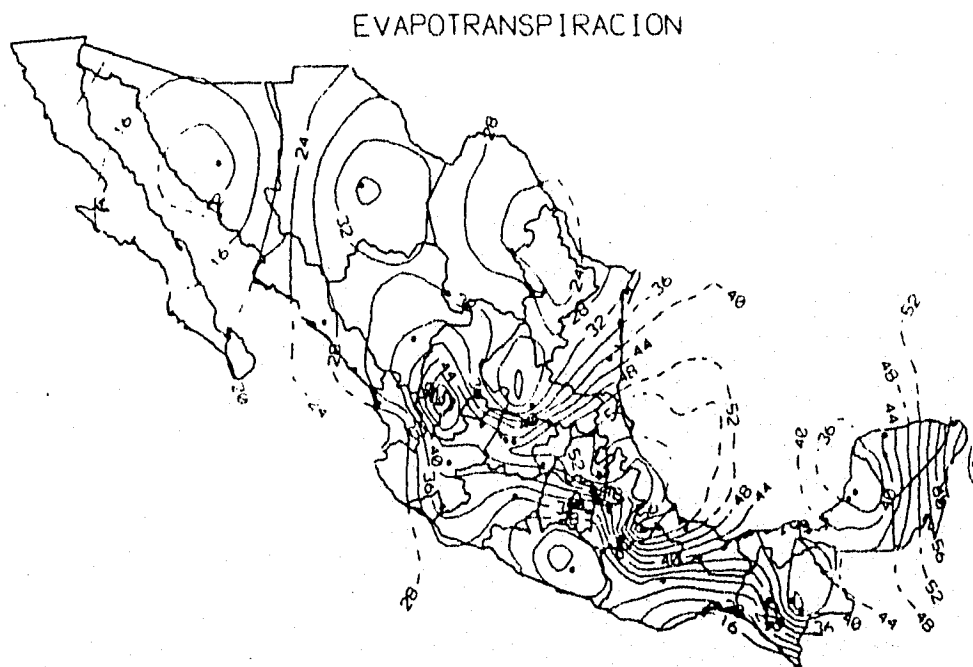


Figura 82. Isolíneas de evapotranspiración (mm) diciembre.

EVAPOTRANSPIRACION

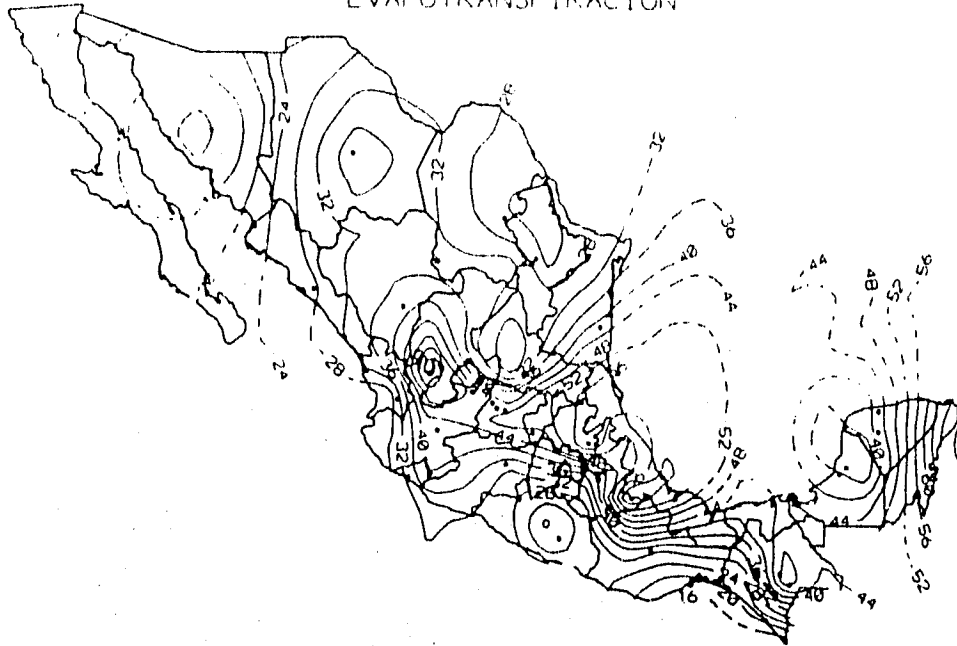


Figura 83. Isolneas de evapotranspiración (mm) diciembre + 0.9 °C.

EVAPOTRANSPIRACION

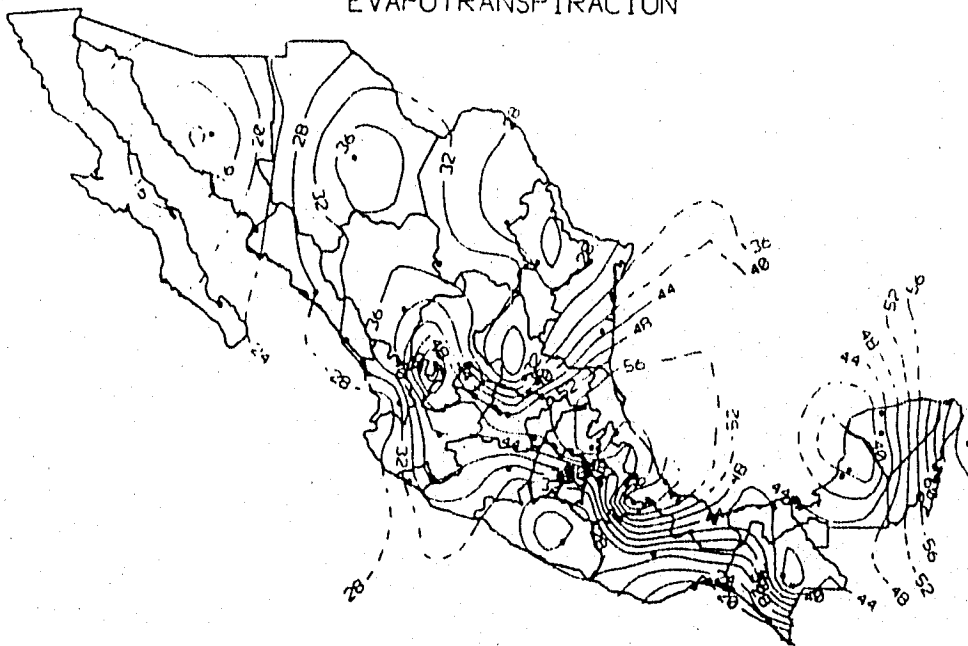


Figura 84. Isolneas de evapotranspiración (mm) diciembre + 1.3 °C.

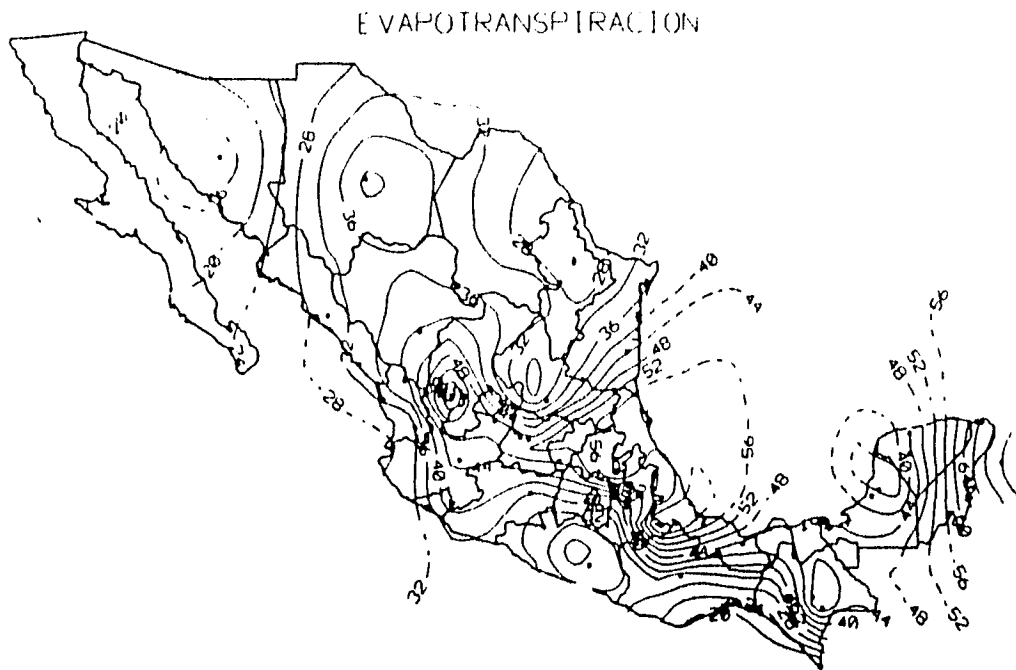


Figura 85. Isolíneas de evapotranspiración (mm) diciembre + 2 °C.

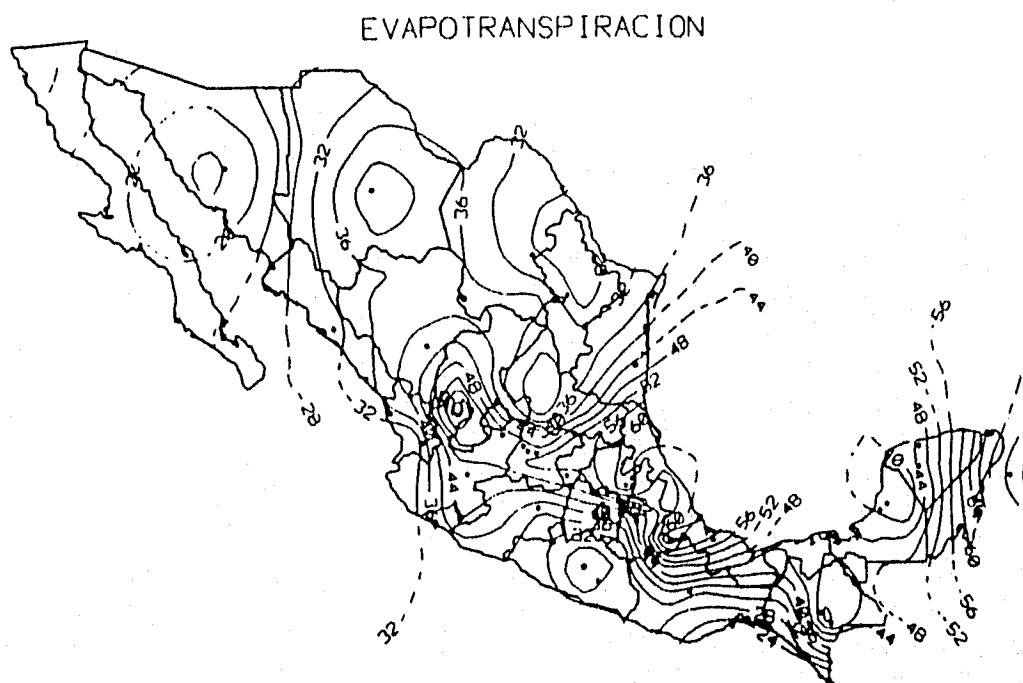


Figura 86. Isolíneas de evapotranspiración (mm) diciembre + 3 °C.

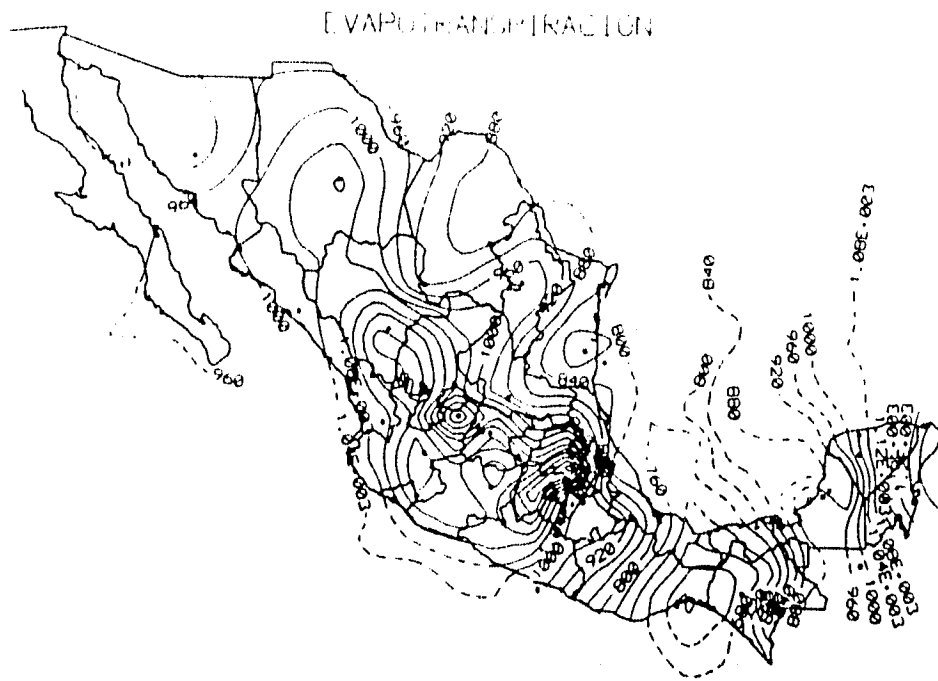


Figura 87. Isolíneas de evapotranspiración (mm) anual.

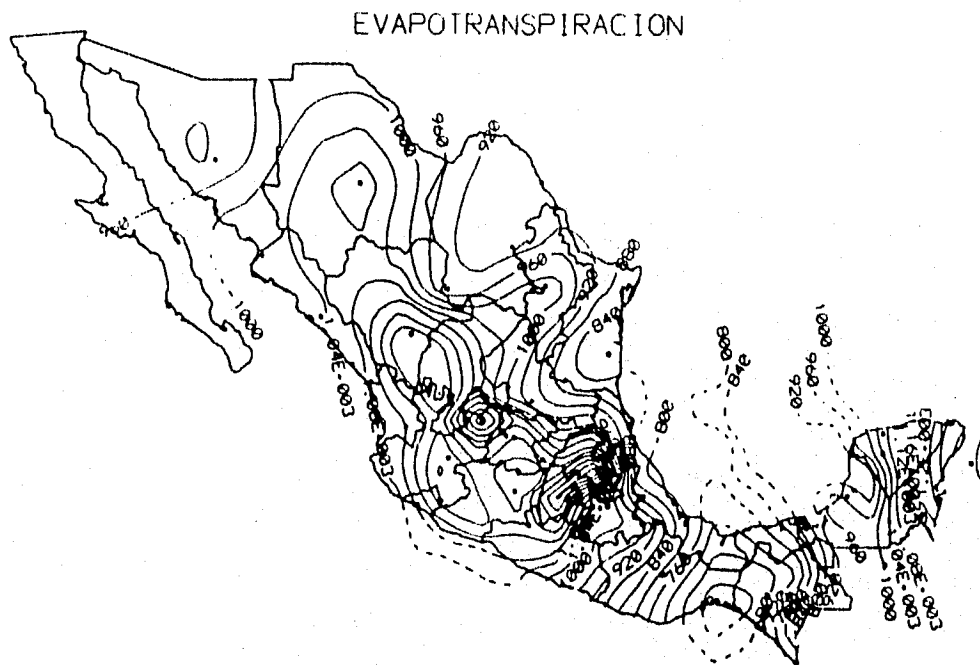


Figura 88. Isolíneas de evapotranspiración (mm) anual + 0.9 °C.

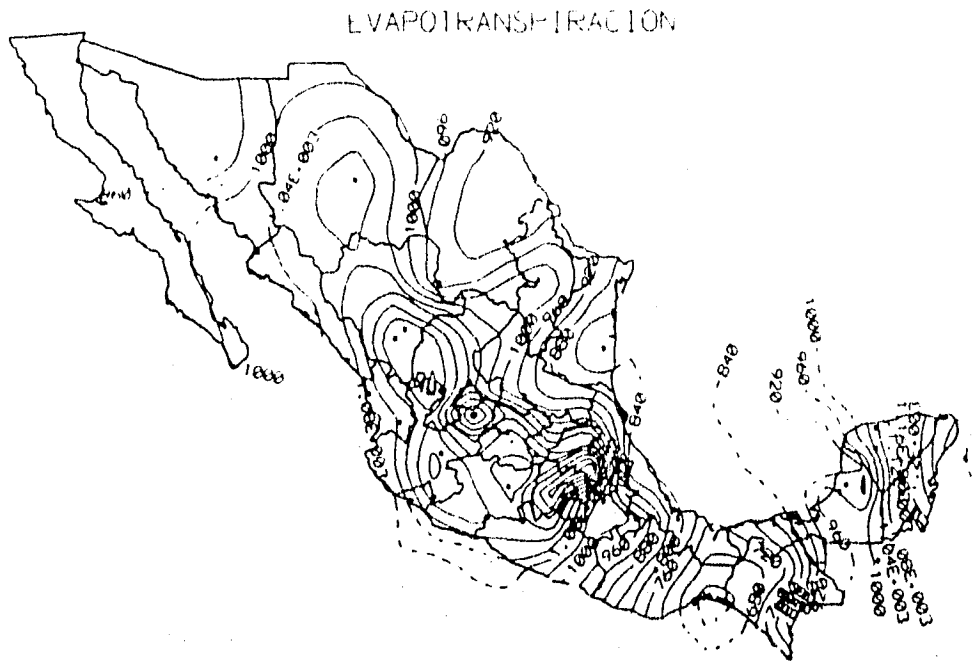


Figura 89. Isolinneas de evapotranspiración (mm) anual + 1.3 °C.

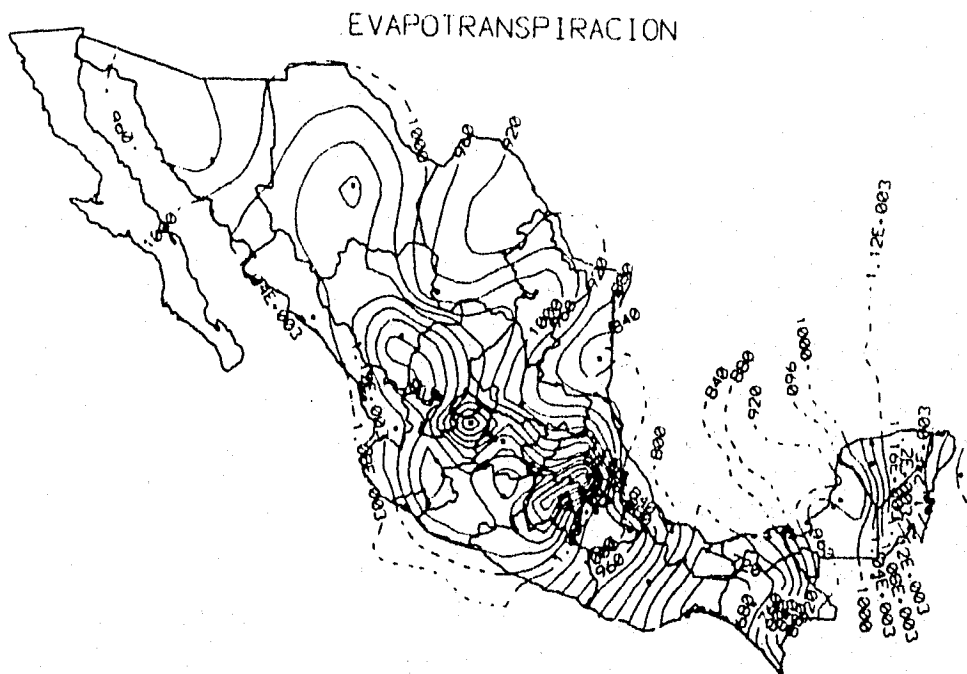


Figura 90. Isolinneas de evapotranspiración (mm) anual + 2 °C.

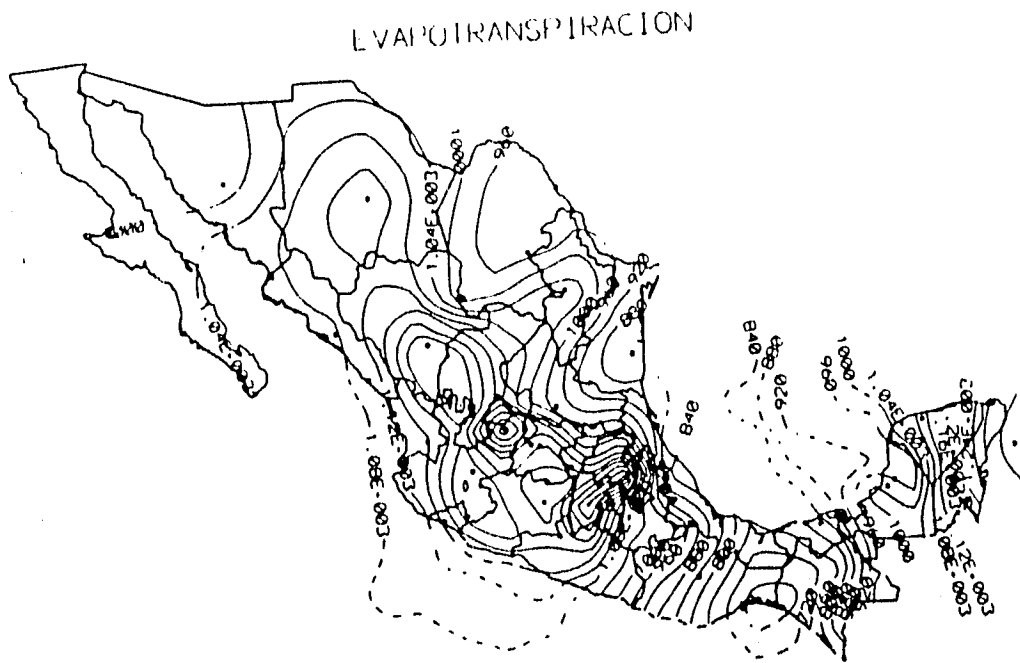


Figura 91. Iso líneas de evapotranspiración (mm) anual + 3 °C.

REFERENCIAS

1. Bruce J.P. (1990). **La atmósfera de la tierra, planeta viviente**. Organización Meteorológica Mundial. Pags. 5,6,7,12,20,43.
2. CEPAL (1993). **Cambio Climático y Gestión del Agua en América Latina y el Caribe**.
3. Chávez Adolfo. (1997). **Estudio del clima solar en la República Mexicana**. Instituto de Geofísica de la UNAM: México.
4. FAO 24. (1976). **Las necesidades hídricas de los cultivos**. Estudio de FAO, Riego y Drenaje. Roma, Italia.
5. Hernández Everardo, Tejeda Adalberto, Reyes Susana (1991). **Atlas Solar de la República Mexicana**. Primera Edición .Universidad Veracruzana, Universidad de Colima.
6. IMI (International Meteorological Institute in Stockholm) (1986). **Executive summary, Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts**, Villach, Austria.
7. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1994). **México Hoy**.
8. Macera C. Omar. (1991). **México y el calentamiento climático global: un balance crítico**. Revista Ciencia y Desarrollo. Pág.55
9. Mundo Molina, Martín. (1994). **El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del Valle del Yaqui, Sonora, México**. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería UNAM.
10. Mundo Molina, Martín. y Martínez Austria P. (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.
11. Mitchell, John F.B (1989). **The greenhouse effect and climate change**, Water Resources Journal (ST/ESCAP/SER.C/162), Naciones Unidas, Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico (CESPAP), Bangkok.
12. Organización Meteorológica Mundial (1992). **Cumbre de la Tierra**. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio Ambiente y Desarrollo. Río de Janeiro, Brasil.

13. 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.
14. Ortiz Solorio Carlos (1987). **Elementos de agrometeorología.** Universidad Autónoma de Chapingo: México.
15. Peterson By Dean; Member Honorary; Keller A. Andrew. **Effects of Climate Change on U.S. Irrigation.** Journal of irrigation and Drainaje Engineering, Vol 116, No.2 March/ April, 1990.
16. PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (1991). **Efectos de los cambios climáticos en los ecosistemas costeros y marinos del Pacífico Sudeste, Plan de Acción para la protección del Medio Marino y areas Costeras del Pacífico Sudeste.** Informe del Grupo de Trabajo Regional, Segunda Reunión, Santiago de Chile.
17. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1988). **Normales Climatológicas, (1941-1970).** Segunda Edición. México.
18. Secretaría de Recursos Hidráulicos.(1976). **Atlas del Agua de la República Mexicana.**
19. Siegenthaler y Oeschger, *Tellus*, 39B, pp.140-154 (1987).
20. Tamayo L. Jorge (1987). **Geografía Moderna de México.** Ed. Trillas.
21. Torres R.E. (1984) **Agrometeorología.** México. Diana.
22. World Climate News (1993), **World Climate Data and Monitoring Programme.** Organización Meteorológica Mundial (OMM). No.2, Ginebra.