

207  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

PATRONES DE PRECIPITACION EN EL VALLE  
SEMIARIDO DE TEHUACAN, PUEBLA MEXICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**B I O L O G O**

P R E S E N T A :

**LEOPOLDO VALIENTE BANUET**

MEXICO, D. F.

AGOSTO 1991

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

## INDICE

| Contenido                                     | Página |
|---|--------|
| INDICE . . . . .                              | i      |
| RESUMEN . . . . .                             | 1      |
| INTRODUCCION . . . . .                        | 2      |
| OBJETIVO . . . . .                            | 5      |
| MATERIAL Y METODO . . . . .                   | 6      |
| Area de Estudio . . . . .                     | 6      |
| Distribución Gamma . . . . .                  | 11     |
| Estacionalidad . . . . .                      | 18     |
| Análisis de los datos . . . . .               | 20     |
| RESULTADOS . . . . .                          | 24     |
| Evaporación en tanque y Temperatura . . . . . | 24     |
| Precipitación anual . . . . .                 | 27     |
| Estacionalidad . . . . .                      | 33     |
| Precipitación Mensual . . . . .               | 35     |
| DISCUSION . . . . .                           | 53     |
| CONCLUSIONES . . . . .                        | 61     |
| BIBLIOGRAFIA . . . . .                        | 62     |

## RESUMEN

A partir del hecho de que las regiones áridas y semiáridas son consideradas como zonas en donde los patrones de precipitación pluvial son altamente impredecibles, en este trabajo se presenta el análisis de los patrones de lluvia en el Valle semiárido de Tehuacán, con base en ajustes a la distribución probabilística Gamma. Se analizaron registros de 10 estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes sitios dentro del valle, utilizando series de promedios mensuales y anuales. Con base en los ajustes se determinó la estacionalidad, se evaluaron niveles de predecibilidad y probabilidades de eventos lluviosos de cierta magnitud, a partir de los cuales se determinó la variación espacial de los patrones para el valle.

Los resultados obtenidos indican que el Valle de Tehuacán es una zona semiárida altamente predecible y con una marcada estacionalidad. Los altos niveles de predecibilidad anual encontrados, se asocian principalmente con ubicación latitudinal del valle, y localmente con la altitud y la orografía. El valle presenta una estacionalidad marcada completamente en verano, con cuatro meses definidos como lluviosos. El mes de junio es el más consistente en cuanto a la presencia de lluvia para todas los sitios y en general explica, en gran medida, la alta consistencia anual. Registros altos de precipitación en el mes de septiembre y con una alta variabilidad sugieren que la zona estudiada es afectada ocasionalmente por perturbaciones tropicales provenientes del Golfo de México, aspecto que se discute en función de su posible importancia para la biota.

El análisis realizado muestra que a nivel geográfico dentro del valle, el efecto de la sombra orográfica de la Sierra de Zongolica se manifiesta diferencialmente, de manera que existe un gradiente creciente de humedad que va de la porción sureste hacia la noroeste.

La alta predecibilidad así como la marcada estacionalidad hacen que el Valle de Tehuacán pueda ser considerado como una zona semiárida atípica, cuando es comparada con otras regiones secas del país. Este aspecto puede ser la base para entender algunos patrones biogeográficos y ecológicos presentes.

## INTRODUCCION

Los ecosistemas desérticos, han sido considerados como sistemas biológicos regulados en sus procesos y en su productividad fundamentalmente por la entrada de agua en forma de precipitación (Noy-Meir 1973). En estos ambientes, la precipitación no sólo se caracteriza por su baja cantidad, sino también por tener una alta variabilidad anual, estacional y local (Noy-Meir op cit.; McGinnies 1979). Esto se debe, por un lado, a la naturaleza advectiva de las lluvias (frecuentemente de tipo monzónico), y por el otro, a las propiedades estadísticas de las series de datos.

Cuando se miden variables estadísticas con nivel inferior cero, y la frecuencia de valores bajos en la variable es alta, como en el caso de la precipitación, la distribución de los datos se hace fuertemente sesgada, y la variabilidad relativa de los datos (la media dividida por el desvío estándar) aumenta considerablemente. Con ésto, los promedios mensuales de lluvias e índices derivados de éstos tienen muy poco significado en las zonas áridas, ya que no indican la distribución estadística subyacente (que no es Gaussiana), ni dan una idea de cuál es la probabilidad de lluvias significativas para el desarrollo de la vegetación y diversos procesos naturales.

Considerando las propiedades de la precipitación de las zonas áridas y semiáridas varios autores han propuesto el uso de la distribución gamma (Hastings & Turner 1965; García et al. 1973),

la cual es una distribución continua, sesgada positivamente y acotada al cero, en el análisis de datos su precipitación. Su uso ha tenido buenos resultados, también en zonas donde la precipitación es abundante (García et al. 1973; Mosiño & García 1978, 1979, 1981; Ezcurra & Rodríguez 1984). A partir del ajuste de esta distribución se han propuesto los parámetros que la definen o estadísticos derivados de ésta, como índices más aceptables de pluviosidad. Sin embargo, el ajuste en sí mismo es importante ya que permite establecer las probabilidades de ocurrencia de determinados eventos lluviosos en cualquier momento o sitio de manera precisa.

Hastings y Turner (1965), fueron los primeros en reconocer que la gran variabilidad de los datos de precipitación para Baja California, expresada en coeficientes de variación mayores que uno, estaba asociada de una manera bastante clara con probabilidades empíricas por lo que en lugar de considerarla como un problema real debiera ser objeto de estudio. Ahora se sabe que el coeficiente de variación está relacionado con la forma de la distribución probabilística Gamma y consecuentemente con las probabilidades de lluvia.

En cuanto a la media aritmética y a la forma de la distribución, de manera general, como lo establecen Ezcurra y Rodríguez (1984), se puede decir que conforme la primera se acerca al cero, la distribución se hace más sesgada, y la media con una distribución asimétrica pierde significado al usarse como un índice de pluviosidad en un tiempo o lugar

determinado. De esta forma es claro que conforme la distribución se hace más simétrica la media y sus índices derivados son más acertados.

En el presente trabajo, se presenta un análisis de los patrones de precipitación en el Valle de Tehuacán, con base en ajustes a la distribución probabilística Gamma. Este análisis comprende, como punto central, el análisis de las relaciones geográficas de factores ambientales de tipo físico, que puedan ser la base para el entendimiento de procesos biológicos que dependen claramente de la entrada de agua en forma de precipitación al sistema y de su predecibilidad.

## OBJETIVO

Hacer una caracterización detallada, con base en el ajuste a la distribución probabilística Gamma, de los patrones de lluvia en el Valle de Tehuacán, Puebla, México, con el objeto de determinar el grado de predecibilidad de la lluvia a escalas anual, estacional y mensual, así como su variación espacial.



## MATERIAL Y METODO

### Area de estudio

El Valle de Tehuacán está localizado en la zona noroeste del estado de Oaxaca y sureste de Puebla (Figura 1), en una latitud promedio de 18°20' N y una longitud promedio 97°20' W. El clima, de manera general es cálido y semiárido (Fuentes 1969; García 1961), con un régimen de lluvias de tipo monsonico de verano, con dos máximos de precipitación (junio y septiembre) que se presentan bajo la influencia del régimen tropical de la corriente del este (Lauer 1973), y con sequía interestival marcada.

El clima está determinado, principalmente, por las características físicas de la atmósfera y de la posición del valle con respecto a la circulación atmosférica general, por su situación entre el Golfo de México y el océano Pacífico, y por un factor regulador muy importante en la región: la topografía accidentada del centro-sur de México (Byers 1967). De acuerdo con la clasificación climática de García (1981), el Valle de Tehuacán comprende zonas de diferentes climas, variando éstos desde climas cálidos a templados y desde muy áridos a semiáridos, aunque en general comparten otras características como son un régimen de lluvias de verano, un bajo porcentaje de lluvia invernal, poca oscilación térmica anual y canícula. Desde este punto de vista, el valle es una entidad heterogénea.

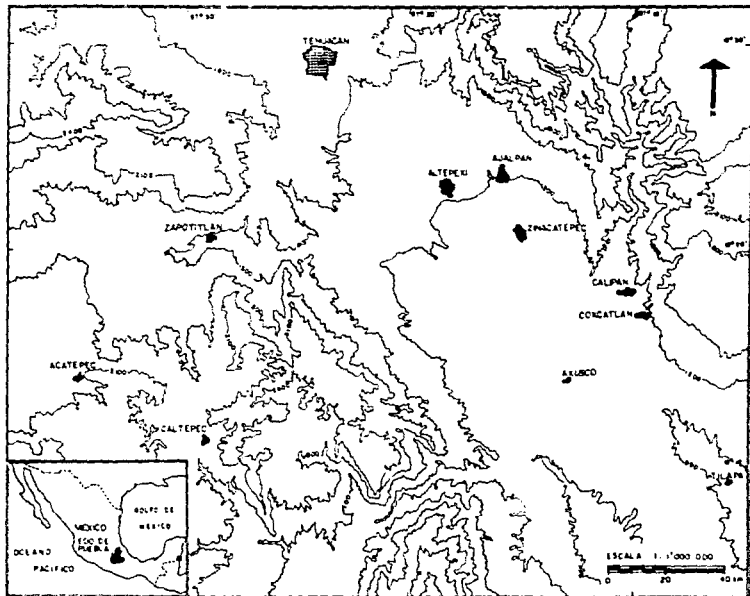


Fig 1.- Zona de estudio Volcans de Tehuacán, Puebla

En este trabajo, el análisis de los datos de precipitación se hizo para 10 estaciones ubicadas dentro del Valle de Tehuacán (Figura 1 y Tabla 1), que contaban con 20 años de registros. La estación de Zinacatepec, que aparece en la Tabla 1, sólo fue considerada en el análisis anual para trazar la tendencia general en la zona, pues su registro consta solamente de 7 años.

Tabla 1. Estaciones climatológicas ubicadas dentro del Valle de Tehuacán, Puebla.

| Estación                     | Latitud |        | Longitud | Altitud<br>m |
|------------------------------|---------|--------|----------|--------------|
|                              | N       | W      |          |              |
| 1. Acatepec                  | 18°15'  | 97°35' |          | 2100         |
| 2. Altepexi                  | 18°26'  | 97°17' |          | 1238         |
| 3. Axusco                    | 18°14'  | 97°12' |          | 955          |
| 4. Cacaloapan                | 18°36'  | 97°34' |          | 1966         |
| 5. Calipán                   | 18°18'  | 97°11' |          | 1110         |
| 6. Caltepec                  | 18°12'  | 97°27' |          | 1400         |
| 7. Coxcatlán                 | 18°16'  | 97°09' |          | 1000         |
| 8. Tehuacán                  | 18°29'  | 97°24' |          | 1648         |
| 9. Tilapa                    | 18°09'  | 97°06' |          | 890          |
| 10. Zapotitlán<br>de Salinas | 18°20'  | 97°28' |          | 1407         |
| 11. Zinacatepec              | 18°20'  | 97°15' |          | 1139         |

La clasificación climática de las estaciones analizadas, de acuerdo con la clasificación de García (1981), se presenta en la Tabla 2. La parte central del valle comprende climas BW (muy áridos) en las estaciones de Altepexi y Axusco. Tehuacán, Cacaloapán y Acatepec, presentan un clima semiárido (BS,) que comprende la parte oeste de mayor altitud. Las demás estaciones del valle son de un tipo árido, que varían en su régimen térmico

dependiendo de su ubicación y altitud en el valle.

Tabla 2. Estaciones climatológicas ubicadas dentro del Valle de Tehuacán y su fórmula climática de acuerdo con la clasificación de García (1981).

---

| Estación                     | Fórmula climática       |
|------------------------------|-------------------------|
| 1. Acatepec                  | $BS_1 Kw(w)g(i)w''$     |
| 2. Altepexi                  | $Bw (h')w(w)(i')gw''$   |
| 3. Axusco                    | $Bw (h')w(w)(e)gw''$    |
| 4. Cacaloapan                | $BS_1 Kw(w)g(i)w''$     |
| 5. Calipán                   | $BS_0 (h')w''(w)(i')g$  |
| 6. Caltepec                  | $BS_0 hw(i')gw''$       |
| 7. Coxcatlán                 | $BS_0 (h')w(w)(e')gw''$ |
| 8. Tehuacán                  | $BS_1 hw(w)(i')gw''$    |
| 9. Tilapa                    | $BS_0 (h')w''(w)(i')g$  |
| 10. Zapotitlán<br>de Salinas | $BS_0 hw(e)gw''$        |
| 11. Zinacatepec              | $BS_0 (h')w''(w)(i')g$  |

---

El Valle de Tehuacán, en su mayoría, está cubierto por un tipo de vegetación denominado como matorral xerófilo (Rzedowski 1978), dentro del cual existen variantes que responden principalmente a factores ambientales. Hacia las partes más húmedas encontramos selvas bajas y medianas como vegetación dominante. Una descripción de la vegetación a lo largo de un gradiente sureste-noroeste fue realizada por Jaramillo y Medrano (1983) trabajando a lo largo de un gradiente altitudinal desde los 540 m a los 2013 m en la misma dirección, en la que reconocen 10 asociaciones vegetales que corresponden a 6 tipos de vegetación definidos de acuerdo con un criterio fisonómico.

Desde el punto de la fisiografía, el valle se extiende longitudinalmente en medio de dos complejos montañosos, de los cuales, la Sierra de Zongolica localizada al este, representa la principal barrera a la llegada de la precipitación al valle. La orografía local, dentro del valle, también tiene un papel importante, pudiéndose presentar variaciones evidentes en la cubierta vegetal aún con cambios moderados en altitud. La altitud varía desde aproximadamente 1000 m en Axusco en la parte central del Valle, a estaciones con altitud de alrededor de 2000 m (Acatepec y Cacaloapan), en los límites occidentales del mismo.

Biogeográficamente, Miranda (1948) reconoce en su trabajo sobre la vegetación de la Cuenca alta del Papaloapan, a los Valles de Cuicatlán y Tehuacán como dos regiones diferentes. Sin embargo, Rzedowski (1978) ubica a la zona dentro de la Provincia fitogeográfica de Tehuacán-Cuicatlán.

### Distribución Gamma

La distribución probabilística Gamma es una distribución de probabilidades sesgada positivamente definida por dos parámetros, uno que define la forma de la distribución (Alfa) y otro (Beta) que ajusta la escala (ambos mayores que cero), y cuya función es:

$$f(x) := \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

para valores de  $x$  mayores o iguales a cero y  $f(x)=0$  para valores de  $x$  menores que cero. Esto significa que es una distribución acotada sólo para valores positivos o mayores que cero. En ésta, la función  $\Gamma(\alpha)$  se refiere a la función Gamma ordinaria o incompleta, también conocida como función factorial, que tiene la forma:

$$\Gamma(\alpha) := \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

y cuya propiedad más relevante es que  $\Gamma(\alpha+1) = \alpha \cdot \Gamma(\alpha)$  de la que se derivan otras.

En esta distribución el sesgo está inversamente relacionado con el parámetro que define la forma  $\alpha$ , de manera que conforme crece  $\alpha$  la distribución se hace más simétrica. Para valores de alfa menores que uno y mayores o iguales que cero, la distribución es en forma de J invertida (muy sesgada) con moda

cero. Para  $\alpha=1$  la distribución es exponencial con intercepción en  $1/\beta$ , y para  $\alpha>1$  la distribución tiende a hacerse más simétrica y la moda es igual a  $\beta(\alpha-1)$ .

El primer momento ( $\mu_1$ ) al origen es  $\beta\alpha$ , el segundo ( $\mu_2$ ) es  $\beta^2\alpha$ , el tercero es ( $\mu_3$ ) es  $2\beta^3\alpha$  y el cuarto momento al origen es  $3\beta^4\alpha(\alpha+2)$ . El sesgo ( $g_1$ ) que corresponde a  $(\mu_3) / (\mu_2)^{3/2}$  en este caso resulta igual a  $g_1 = 2/\sqrt{\alpha}$ . Con esto es claro que el sesgo está inversamente relacionado con el parámetro que define la forma de la distribución.

A partir de estas fórmulas se pueden obtener los parámetros alfa y beta para el ajuste de los datos a la distribución y son llamados estimadores sesgados. En este caso,  $\alpha$  es igual a la media al cuadrado sobre la varianza y la  $\beta$  es igual a la varianza sobre la media.

En este trabajo, la estimación de los parámetros para el ajuste a la distribución se hizo a partir de las ecuaciones de los cocientes de máxima verosimilitud descritos por Thom (1958) que tienen la forma:

$$\ln(\alpha) - \tau(\alpha) := y$$

$$\alpha \cdot \beta := \bar{x}$$

En la primera de estas ecuaciones,  $y$  representa al logaritmo natural de la proporción entre la media aritmética y la media geométrica de los datos y la función Tau de alfa ( $\tau(\alpha)$ ) representa a la función:

$$\gamma(\alpha) := \ln(\alpha) - \frac{1}{2\alpha} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{B_{2n}}{2n\alpha^{2n}}$$

en la que los coeficientes  $B_n$  corresponden a los números de Bernoulli y en la que en la suma  $n$  toma valores de manera descendente desde  $(n-1)$  hasta cero. Los coeficientes de Bernoulli están dados por la relación:

$$B_n := \frac{-\left[ \sum_j \binom{n-1}{j} B_j \right]}{\binom{n-1}{1}}$$

donde  $j$  toma valores desde  $(n-1)$  hasta cero.

Puesto que el parámetro alfa aparece implícito en las ecuaciones de máxima verosimilitud, éste se obtuvo a partir de una función recurrente propuesta por Bowman y Shenton (1988), que converge rápidamente y que tiene la forma:

$$\alpha_{t+1} := \frac{\alpha_t \left[ \ln(\alpha_t) - \gamma(\alpha_t) \right]}{y}$$

Como valor inicial se usó la aproximación derivada por Thom (1958) para el mismo parámetro alfa que tiene la forma:



$$\alpha := \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{1 \cdot 9}{3}}}{1 \cdot 9}$$

Dado que la función Tau de alfa, como aparece escrita arriba, puede diverger para valores pequeños de alfa, se utilizó una función complementaria dada por Bowman y Shenton (1988) para la misma función, que tiene la forma:

$$\tau(\alpha + n) := \tau(\alpha) + \sum_t \frac{1}{n + \alpha - t}$$

de manera que para calcular la función Tau, necesaria para el cálculo del parámetro alfa, se aumenta el argumento de la función hasta un valor que no sea divergente y luego se resta la suma de esta última función para obtener el valor preciso Tau de alfa. En la suma en esta última función  $t$  toma valores desde uno hasta  $n$ . La estrategia, en este sentido, fue que si alfa era menor o igual a 40, aumentar el argumento en 40 y calcular con la primera relación para la función Tau al coeficiente de Bernoulli 16, para luego restar de ésta la sumatoria de la segunda relación. La precisión de  $r$  de  $\alpha$  aumenta conforme más términos de Bernoulli se tomen. En caso que  $\alpha$  fuese mayor que 40, la función Tau de alfa se calculó a partir de la primera función con menos términos de Bernoulli, dependiendo de su valor.

La aproximación que propuso Thom (1958) para obtener el parámetro  $\alpha$  de la distribución, y que en este trabajo se usó como semilla para la relación de recurrencia para obtener al mismo  $\alpha$ ,

involucra sólo al primer término de Bernoulli para el cálculo de la función Tau, y aunque ha sido ampliamente usada en la obtención del parámetro alfa con buenos resultados (Mosiño & García 1981; García et. al. 1973; Ezcurrea & Rodríguez 1984) para  $\alpha$  pequeñas, puede tomar valores aún más pequeños que el valor real. Para valores grandes de  $\alpha$  las diferencias entre ambos métodos es menor.

El parámetro  $\beta$  se obtuvo directamente de la segunda ecuación de máxima verosimilitud, de manera que una vez que se tiene al parámetro  $\alpha$ , resulta al dividir la media aritmética entre éste.

En el caso del término que representa al logaritmo natural de la proporción entre la media aritmética y la media geométrica, y puesto que si hay ceros en la serie la media geométrica es cero y con esto la proporción se vuelve indefinida, se estableció que en caso de que un valor fuese igual con cero se cambiaría por 1 entre el número de datos en la serie.

Lo más relevante del ajuste de los datos a la distribución Gamma es la posibilidad de calcular las probabilidades de algún evento de cierto valor, calculando la integral de la distribución o área bajo la curva desde el cero al valor deseado. De esta manera, se pueden establecer las probabilidades de ocurrencia de estadísticos como la media, la moda o cualquier otro valor de interés. Para este fin, se hizo un programa escrito y compilado en Pascal que calcula la integral considerando que la distribución Gamma y la Distribución Ji-Cuadrada son casos particulares cuando dos veces  $\alpha$  y dos veces los valores de la

distribución en la primera, corresponden con  $\underline{y}$  grados de libertad y los valores de la distribución en la segunda (Zelen & Severo 1970; Bowman & Shenton 1988). Entonces, si la integral de la distribución Ji-Cuadrada está dada por:

$$F(\underline{X}, \underline{v}) := \frac{\left[ \frac{\underline{v}}{2} \right]^{\frac{\underline{v}-\underline{X}}{2}}}{\Gamma\left[\frac{\underline{v}+\underline{X}}{2}\right]} \left[ 1 + \sum_r \frac{\left[ \frac{\underline{X}}{2} \right]^r}{(\underline{v}+2)(\underline{v}+4)\dots(\underline{v}+2+r)} \right]$$

donde  $\underline{r}$  toma valores desde cero hasta  $\infty$ , al sustituir  $\underline{y}$  por  $2\alpha$  y  $\underline{X}^2$  por  $2\underline{x}$  tenemos la integral de la distribución Gamma se simplifica a la función:

$$F(\alpha, \underline{x}) := \frac{\alpha^{-\underline{x}}}{\Gamma(\alpha+1)} \left[ 1 + \sum_r \frac{\underline{x}^r}{(\alpha+1)(\alpha+2)\dots(\alpha+r)} \right]$$

donde la  $\underline{r}$  va desde uno a  $\infty$ . Esta forma de la integral para valores chicos de alfa, dependiendo del valor de  $\underline{x}$ , puede diverger o converger muy lentamente, por lo cual fue necesario considerar otras derivaciones para la integral cuando alfa fuese pequeña. Al incluir  $\underline{x}^r$  y a la función  $\Gamma(\alpha+1)$  en el paréntesis, podemos reescribir la función de la integral a la forma:

$$F(\alpha, x) := c \int_0^x \frac{t^{\alpha-1} e^{-t}}{\Gamma(\alpha)} dt$$

donde  $x$  toma valores desde cero a infinito. Esta forma de la integral se puede transformar, considerando la propiedad de la función gamma ordinaria que establece que  $\Gamma(\alpha+1) = \alpha \cdot \Gamma(\alpha)$ ,  $\Gamma(\alpha-2) = (\alpha-1)\Gamma(\alpha-1) = (\alpha-1) \cdot \alpha \cdot \Gamma(\alpha)$ , etc., a la forma:

$$F(\alpha, x) := \frac{c \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt}{\Gamma(\alpha)} = F(\alpha + 1, x)$$

lo que dice que la integral hasta una cierta  $x$  dada una alfa cualquiera, es igual a una constante dada por el primer término, más la integral de ese mismo valor de  $x$  pero bajo una distribución con su parámetro de la forma igual a alfa más uno y de manera más general se puede reescribir como:

$$F(\alpha, x) := \frac{c \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt}{\Gamma(\alpha)} = \frac{c \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt}{\Gamma(\alpha)} + \frac{c \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt}{\Gamma(\alpha)} + \frac{c \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt}{\Gamma(\alpha)} + \dots + \Gamma(\alpha - 3, x)$$

Esta relación permite, al igual que con la función Tau cuando alfa es chica, aumentar el argumento y luego restar todos aquellos términos que corrigen la igualdad. Esta forma de integrar la distribución es con mucho más fácil de implementar y tiene menos dificultades de cómputo que los métodos similares usado por Pearson (1951) en la construcción de las Tablas de la función gamma incompleta. Para conseguir la integral de esta

distribución, de manera analítica, hay otras formas como las fracciones parciales que Bowman y Shenton (1988) describen, pero resultan difíciles al implementarse y los algoritmos son menos flexibles.

En todos los casos, para el cálculo de la integral, el valor  $x$  esta ponderado por el factor de escala  $\beta$ .

### Estacionalidad

Para evaluar la estacionalidad de los patrones de lluvias es necesario analizar si las cantidades de precipitación están concentradas en ciertos meses y si éstos presentan altas cantidades de lluvia con mayor frecuencia que el resto. Esto implica clasificar cada mes como lluvioso o seco dependiendo de algún criterio establecido. Mosiño y García (1979) han propuesto la moda derivada de la distribución gamma como un criterio de comparación acertado para determinar si un mes es seco o lluvioso, suponiendo que los seres vivos están adaptados a los valores más frecuentes. Sin embargo, la moda cambia para cada mes y las frecuencias relativas entre meses no pueden ser comparadas.

En este trabajo, la estacionalidad se determinó con el método propuesto por Ezcurra y Rodrigues (1984). Este se basa en la construcción de una serie de  $(n-p)$  meses secos sin precipitación y  $p$  meses lluviosos de igual cantidad de lluvia

(parámetro  $\Gamma$ ), a partir del total de ( $n$ ) meses de registro de la estación considerándolos como independientes. Lo anterior tiene la restricción de que una vez que estos registros son ajustados a la función gamma, éstos deben tener los mismos parámetros y por tanto la misma forma de la distribución. De esta manera, bajo la suposición que existen meses que concentran una mayor cantidad de lluvia en el año y que éstos se dividen el total en partes iguales, se puede calcular el número de meses típicamente lluviosos y las cantidades de precipitación típica en éstos. La frecuencia relativa de ocurrencia de cada mes para ser considerado como lluvioso se calcula considerando los meses de mayor precipitación en la serie original, anotando a qué mes corresponde para su frecuencia absoluta, y ponderándolo por el número de años sobre el que está hecho el análisis.

Una medida de la homogeneidad de la serie original está dada por la equitabilidad, la que se define en este caso, como el número de meses típicos lluviosos entre el número total de meses en la serie original ( $E=p/n$ ). Por tanto, la equitabilidad es considerada como una medida de la probabilidad de tener meses lluviosos.

La descripción matemática del método puede verse en la fuente original, pero los valores de  $p$  meses lluviosos es igual  $(\Sigma X)^2 / \Sigma X^2$  y los de  $\bar{x}$  típica de lluvia es igual a  $\Sigma X^2 / \Sigma X$ . El valor de  $p$  coincide con lo que en la teoría de la información y en la teoría de la diversidad derivadas de la primera, se reconoce como una medida de la heterogeneidad o de la cantidad de 'estados

aparentes' (Ezcurra 1980; Ezcurra & Rodrigues 1984), y su valor varía de 1, cuando un mes concentra toda la precipitación, a  $\frac{1}{n}$  cuando existe una total homogeneidad en cuanto a las distribución de la lluvia entre los meses.

De este análisis es interesante notar que el número de meses típicamente húmedos depende de la forma de la distribución o del parámetro alfa, sin estar afectado por las cantidades.

#### Análisis de los datos

Se analizaron series de precipitación mensuales, anuales, y para el análisis de la estacionalidad, una serie por estación, considerando todos los meses como eventos independientes. Previo al análisis de las series de precipitación, se analizaron datos de evaporación potencial en tanque y temperatura promedio mensual de dos de las estaciones analizadas (Tehuacán y Calipán), que coinciden con dos tipos climáticos termicamente diferentes, y que contaban con un registro de 20 años. Este análisis se plantea con la finalidad de tener un factor de comparación para los valores de precipitación esperables y sus probabilidades, y de la relación empírica que establece que la evaporación en tanque mensual puede ser igualada con la temperatura promedio elevada a la 1.2, multiplicada por una constante. Este análisis se hizo mediante una regresión bivalente de ejes principales (Sokal & Rohlf 1981), sobre el logaritmo de ambas variables.

Las series anuales se ajustaron a la distribución Gamma conforme a lo descrito en relación a ésta. Para todos los ajustes a la distribución se realizó una prueba de  $\chi^2$  de bondad de ajuste (Sokal & Rohlf 1982), considerando a la distribución teórica como el modelo nulo.

Los valores anuales, que por su propia escala son los que presentan menor variación, son analizados por estadísticos que consideran normalidad (comparación de medias mediante un ANDEVA de una vía) y contrastados con los resultados que se derivan del uso de la distribución Gamma. La comparación que considera la forma en como se distribuyen los eventos de lluvia anual, se refiere a la comparación de las frecuencias de eventos de 500 mm en 20 años. El valor de 500 mm, tomado como umbral en la comparación, se justifica de acuerdo a la delimitación que algunos autores hacen de las zonas áridas, en especial a las cantidades de lluvia promedio anual que reciben (Noy-Meir 1973).

El análisis de la estacionalidad, como se encuentra descrito arriba, se hizo para cada estación por separado. Las curvas que describen las frecuencias relativas por mes para cada estación, se analizaron al comparar las frecuencias relativas promedio mediante un análisis de la varianza de dos vías, comparando entre meses y estaciones. Los valores de precipitación en meses típicamente lluviosos (valor  $\bar{x}$ ) por estación se compararon mediante una prueba de  $\chi^2$ , para una distribución homogénea.

Las series mensuales, al igual que con las anuales, se ajustaron a la distribución gamma de acuerdo con lo descrito, y



de igual manera cada ajuste fue considerado con una prueba de  $\chi^2$  de bondad de ajuste.

De los ajustes de las series mensuales de precipitación se graficaron los valores de la media, moda, mediana y la probabilidad de la media mensual para cada mes en cada estación, de manera que se pudieran evidenciar el sesgo y los niveles de variación dentro de cada mes. En estas gráficas, el nivel de precisión de la media aritmética como índice de pluviosidad está dado por su probabilidad de ocurrir en ese mes. El sesgo y los niveles de variación en cada una de las distribuciones es mayor conforme la media, la mediana y la moda se encuentran más separadas.

Los meses y las estaciones se analizaron con la comparación, mediante un modelo log-lineal (Everitt, 1977), de la frecuencia de presentar una lluvia mayor o igual al doble de la temperatura promedio por mes en el valle (Promedio de 20 años). Para este análisis solo se consideraron cinco meses del año, los meses de mayor humedad en el valle (mayo a septiembre), que presentaban frecuencias mayores que cinco.

Bajo las mismas distribuciones mensuales para todas las estaciones, se calcularon y graficaron aquellos valores que se esperaba ocurriesen el 10, 30, 50, 70 y el 90 por ciento de los años en todas las estaciones. Estas gráficas también se presentan sin el efecto de la escala en la distribución, lo cual se hace al dividir éstos umbrales esperables por su beta mensual. En estas gráficas, se caracterizan a los meses en función sólo de

su consistencia, sin quitar el efecto de la escala.

Con los datos del parámetro alfa de las distribuciones mensuales por estación, que señalan la forma de las distribuciones, se generó una matriz de los meses por estación y se analizaron por componentes principales a través de una matriz que procesa los datos sin transformación alguna (centrado, estandarizado). La ordenación de los meses y las estaciones que resulta del análisis anterior, se presenta al graficar los dos primeros componentes que explican la mayor proporción de la variación en los datos, para los meses y las estaciones. La significancia del segundo eje se probó al comparar el coeficiente de correlación entre los meses que más se separan en la dirección del mismo.

Los valores umbrales que se esperarían ocurren el 90 y 50 por ciento de los años, también fueron ordenados bajo el mismo procedimiento y se presenta con las gráficas dobles que combinan la ordenación de meses y estaciones.

En todas las gráficas que arreglan los meses y la estaciones, los primero y los segundos componentes se presentan bajo la misma escala y ésta se da ponderada por la varianza que explica cada uno por separado. Esto con el propósito que las distancias en la gráficas de los meses y las estaciones, en el sentido de ambos ejes, sean comparables.

## RESULTADOS

### Evaporación en tanque y Temperatura

En la regresión bivariante por ejes de los valores del logaritmo de la evaporación en tanque contra el logaritmo de la temperatura, el primer eje explica el 86.96 por ciento de la varianza, siendo significativa ( $P < 0.05$ ,  $r^2 = 0.56$ ), con una pendiente diferente de cero de 1.424 (de 1.3 a 1.564) y una ordenada al origen de 0.841 (de 0.42 a 1.21). Al sacar logaritmos en el modelo lineal obtenido, se establece que la evaporación en tanque tiene una relación con la temperatura igual a:

$$\text{Evaporación} = 2.3 (\text{Temperatura promedio})^{1.4}$$

Este resultado, aunque considera el valor de 2 tomado por Walter como factor de la temperatura para obtener la evaporación bajo una relación lineal (Neilson 1986), describe que la relación es de tipo exponencial y no lineal, con un exponente en la temperatura de 1.42. Este valor es mayor al considerarlo en relación empírica descrita con un exponente de 1.2. Los valores de evaporación y temperatura del valle y la relación encontrada se presentan en la Figura 2. Los valores promedio de evaporación y temperatura para las estaciones de Tehuacán y Calipán se presentan en Figura 3. A partir de estas gráficas es evidente que son variables que siguen una dinámica similar en el año.

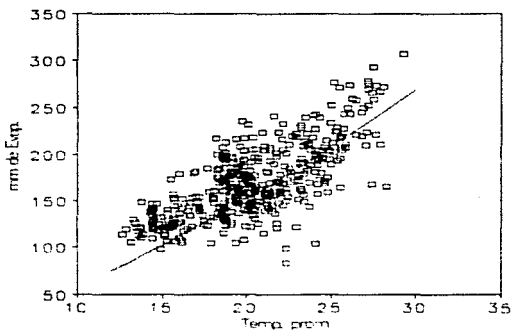
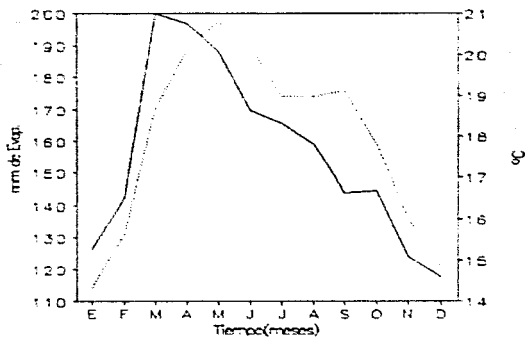


Figura 2. Temperatura Promedio y Evaporación en Tanque en el Valle de Tehuacán. La línea señala la relación exponencial descrita.

El valor máximo de temperatura se presenta en abril y mayo, el segundo valor de temperatura máxima esperable en una zona intertropical se ve enmascarado por la presencia de humedad, y ambas estaciones presentan un rango similar de oscilación térmica anual (aprox. 7°C). Sin embargo, los valores en Tehuacán, clasificada con un clima templado, van de 14 a 20°C, y en Calipán, con un clima cálido, los valores van de 20 a 27°C.

a.



b.

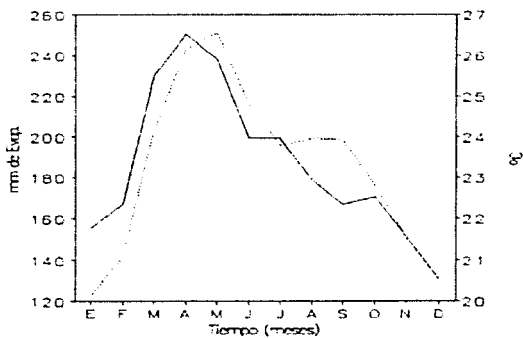


Figura 3. Evaporación Potencial y Temperatura Promedio mensual en (a) Tehuacán y en (b) Calipán, Puebla. La línea punteada señala la temperatura.

### Precipitación Anual

Los valores de precipitación media anual para las 10 estaciones consideradas, que se presentan en la Tabla 3, muestran que el rango de variación encontrado en el Valle de Tehuacán tiene un valor máximo de 618 mm para la estación Acatepec y de 321 mm para Altepeixi, lo cual representa una gran variación entre los valores. Las estaciones restantes presentan valores intermedios entre dichos registros. El análisis de la varianza de una vía, donde se comparan los datos de precipitación anual de las 10 estaciones para un total de 20 años por estación, muestra una F calculada significativa ( $P < 0.01$ ). Al comparar las medias con una prueba de comparaciones múltiples, las estaciones Acatepec y Cacaloapan no difieren significativamente entre si, pero si lo hacen con el grupo restante. Las estaciones Altepeixi, Axusco, Calipan, Caltepec, Coxcatlán, Tehuacán, Tilapa y Zapotitlán forman el segundo grupo homogéneo. En este sentido, de considerar los valores medios de la precipitación, Acatepec y Cacaloapan forman un grupo con valores superiores de lluvia anual.

La Tabla 3 muestra que los niveles de consistencia de la lluvia anual, dados por la separación entre la media, la moda y la mediana, son relativamente pequeños, en relación a las cantidades que presentan y que las estaciones con temperaturas promedio menores son las que presentan medias de precipitación mayor.

Tabla 3. Media, moda, mediana de precipitación anual y temperatura promedio anual las estaciones analizadas.

| Estación                     | Media<br>mm | Mediana<br>mm | Moda<br>mm | T.Prom.<br>°C |
|------------------------------|-------------|---------------|------------|---------------|
| 1. Acatepec                  | 618.3       | 609.0         | 590.3      | 16.35         |
| 2. Altepexí                  | 321.6       | 311.9         | 292.2      | 23.03         |
| 3. Axusco                    | 358.8       | 347.3         | 324.0      | 23.40         |
| 4. Cacaloapan                | 542.2       | 526.3         | 494.1      | 17.79         |
| 5. Calipán                   | 383.9       | 371.6         | 346.8      | 23.29         |
| 6. Caltepec                  | 334.7       | 329.8         | 320.1      | 18.32         |
| 7. Coxcatlán                 | 394.6       | 374.8         | 334.6      | 24.78         |
| 8. Tehuacán                  | 414.9       | 397.6         | 362.5      | 17.96         |
| 9. Tilapa                    | 407.9       | 396.7         | 373.9      | 24.26         |
| 10. Zapotitlán<br>de Salinas | 376.4       | 369.6         | 355.9      | 20.75         |
| 11. Zinacatepec              | 250.8       | 239.5         | 216.5      | 23.35         |

Con el ajuste de las series anuales a la distribución gamma, la probabilidad del valor medio de lluvia anual por estación se encuentra alrededor de 0.45 (Tabla 4), con lo cual se puede decir que a esta escala la media puede ser un buen predictor. En la Tabla 4, se muestra además que al calcular una probabilidad de lluvia común para los 10 sitios de 500 mm en un año, las estaciones son claramente distintas. La comparación de valores de frecuencia para 20 años entre estaciones, sobre la ocurrencia de años con 500 mm de precipitación, indica que hay diferencias entre estaciones, mostrando de una manera clara un gradiente entre estaciones, que según el análisis anterior sólo estaría formado por dos grupos. De acuerdo con este análisis se forman

tres grupos: el primero formado por Acatepec y Cacaloapán ( $P < 0.01$ ), el segundo por Cacaloapan, Tehuacán, Coxcatlán y Tilapa ( $P < 0.05$ ), el tercero formando por los sitios del grupo anterior y además por Caltepec, Zapotitlán, Altepexi, Calipán y Axusco ( $P < 0.05$ ). Este resultado nos sugiere que las diferencias en la forma de la distribución estadística entre cada estación, aunque pequeñas dadas por los valores altos de alfa grande y de sesgo pequeños (Tabla 4), son importantes en definir cierta tendencia general en la zona en cuanto a su precipitación anual, pues nos permite separar, un poco más finamente, las diferencias entre estaciones.

Tabla 4. Alfa, Sesgo, Probabilidad de 500 mm y Probabilidad de la media en las distribuciones anuales en el Valle de Tehuacán.

| Estación                     | Alfa  | Sesgo | P(500) | P(media) |
|------------------------------|-------|-------|--------|----------|
| 1. Acatepec                  | 22.11 | 0.425 | 0.8138 | 0.472    |
| 2. Altepexi                  | 10.96 | 0.604 | 0.0470 | 0.460    |
| 3. Axusco                    | 10.32 | 0.623 | 0.1095 | 0.459    |
| 4. Cacaloapan                | 11.28 | 0.596 | 0.5669 | 0.460    |
| 5. Calipán                   | 10.33 | 0.622 | 0.1613 | 0.459    |
| 6. Caltepec                  | 23.02 | 0.417 | 0.0165 | 0.472    |
| 7. Coxcatlán                 | 6.58  | 0.780 | 0.2238 | 0.448    |
| 8. Tehuacán                  | 7.91  | 0.711 | 0.2552 | 0.453    |
| 9. Tilapa                    | 11.96 | 0.578 | 0.2052 | 0.462    |
| 10. Zapotitlán<br>de Salinas | 18.38 | 0.467 | 0.0878 | 0.469    |
| 11. Zinacatepec              | 7.31  | 0.740 | 0.0131 | 0.451    |

Las variaciones en la probabilidad de 500 mm y sus niveles de sesgo pequeño en las distribuciones anuales (Tabla 4), hacen ver



que aunque el valle es consistente en general anualmente, presenta marcadas diferencias en cuanto a cantidades de precipitación entre sitio.

El mapeo de isolíneas con los valores del parámetro alfa en el Valle de Tehuacán (Figura 4), que no consideran cantidades de lluvia, muestran que la distribución espacial de la precipitación anual en cuanto a su predecibilidad en el valle es heterogénea. De acuerdo con lo esto, las zonas de mayor consistencia de lluvia se encuentran localizadas en la zonas montañosas de mayor altitud al oeste y comprenden Acatepec, Caltepec, Zapotitlán y Cacaloapan. Las de menor consistencia o de mayor variación se ubican en la porción este, inmediata a la zonas bajas de la ladera de sotavento de la Sierra de Zongolica. Ambas zonas se presentan de acuerdo con la topografía local (Figura 4).

El mapeo en el valle de la probabilidad de tener una lluvia de 500 mm (Figura 5) indica que las zonas de muy baja cantidad de lluvia anual se ubican preferencialmente al oeste del valle. Caltepec con un alto nivel de predecibilidad, dado por un alfa máximo entre estaciones, se presenta como la estación con una probabilidad mínima, asociada geográficamente con Acatepec con probabilidad máxima.

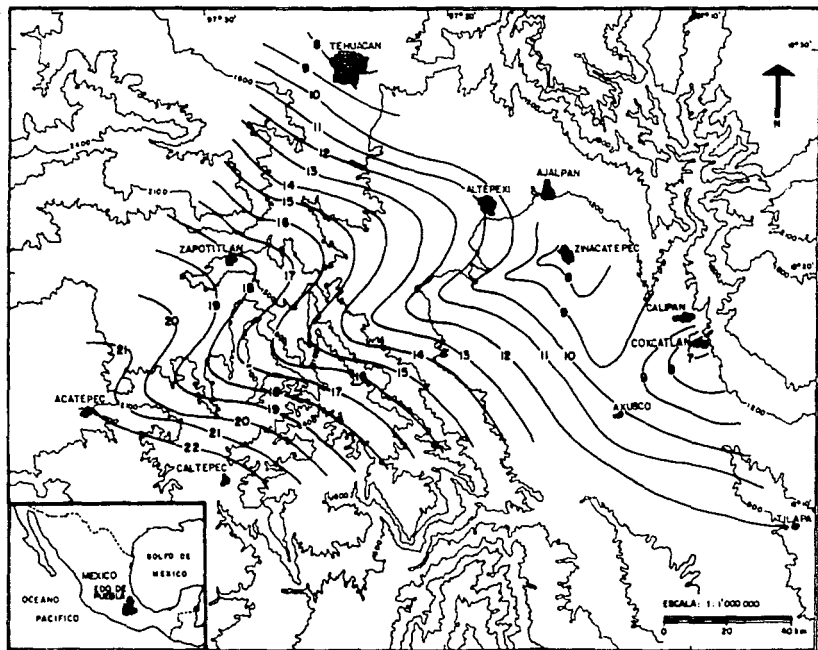


Fig 4- Valores de alfa ( $^{\circ}\text{C}$ ) anuales en el Valle de Tehuacán, Puebla.

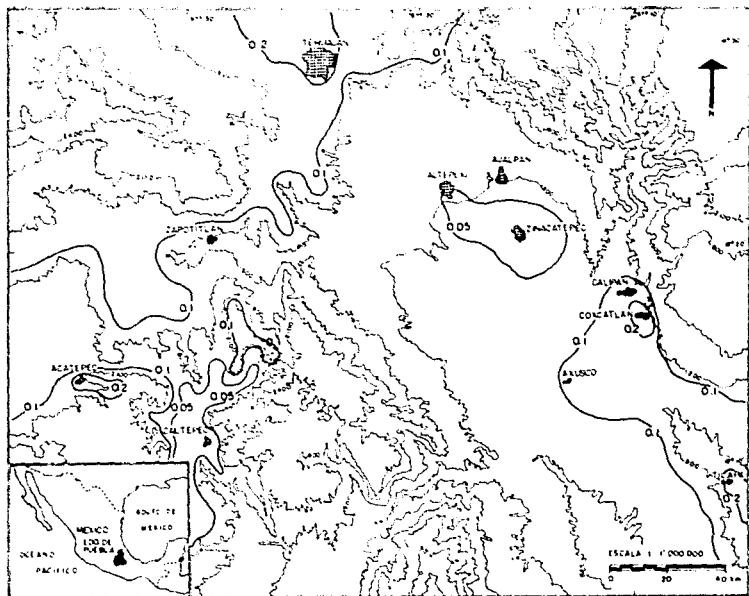


Fig 5. Probabilidad de precipitación anual de 500 mm en el Valle de Tehuacán, Puebla

### Estacionalidad

Los valores de equitabilidad y el número de mm de precipitación que un mes lluvioso tiene para cada estación ( $\bar{x}$ ), se presentan en la Tabla 5. Los valores de equitabilidad, al ser bastante similares con un promedio de 0.34, indican en general que para todas las estaciones analizadas se pueden esperar 4 meses lluviosos en el año. Los valores de  $\bar{x}$  tienen un rango de variación que va de 81 mm en Caltepec hasta 140 mm en Acatepec. La comparación de estos valores con respecto a una distribución uniforme de los valores de  $\bar{x}$  ( $\chi^2 = 35.67$ ; g. libertad = 9) indica que la estación de Acatepec tiene una  $\bar{x}$  superior a la esperada, mientras que Altepexi, Axusco y Caltepec presentan valores de  $\bar{x}$  inferiores. Las demás no difieren de la media.

Tabla 5. Valores de estacionalidad. Se muestran el número de meses típicos lluviosos (p), el número total en la serie original (n), la cantidad en mm de estos meses lluviosos ( $\bar{x}$ ) y la equitabilidad (E).

| Estación                  | (p) | ( $\bar{x}$ ) | (n) | Equitabilidad (E) |
|---------------------------|-----|---------------|-----|-------------------|
| 1. Acatepec               | 86  | 140.2         | 237 | 0.363             |
| 2. Altepexi               | 79  | 81.14         | 238 | 0.332             |
| 3. Axusco                 | 89  | 89.29         | 264 | 0.347             |
| 4. Cacaloapan             | 90  | 114.67        | 232 | 0.388             |
| 5. Calipán                | 66  | 99.76         | 202 | 0.327             |
| 6. Caltepec               | 81  | 84.27         | 240 | 0.338             |
| 7. Coxcatlán              | 67  | 109.53        | 240 | 0.279             |
| 8. Tehuacán               | 75  | 104.4         | 223 | 0.336             |
| 9. Tilapa                 | 69  | 100.44        | 204 | 0.338             |
| 10. Zapotitlán de Salinas | 75  | 96.5          | 214 | 0.350             |

La comparación de las frecuencias relativas de meses considerados lluviosos por medio de un análisis de la varianza de dos vías, tomando en cuenta cada mes del año para las 10 estaciones, indica que la frecuencia relativa promedio de meses lluviosos entre estaciones no difiere ( $F = 1.057$ ;  $P > 0.05$ ); en tanto que si existen diferencias entre meses ( $F = 141.49$ ;  $P < 0.01$ ). Al no existir diferencias entre estaciones, la frecuencia relativa promedio de eventos lluviosos (estacionalidad) para todo el valle de Tehuacán (Figura 6), indica que junio y septiembre, son los meses consistentemente de más eventos lluviosos.

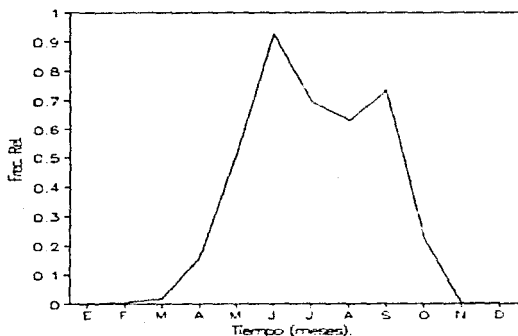


Figura 6. Frecuencia relativa promedio de meses típicamente lluviosos para todas las estaciones en el Valle de Tehuacán.

### Precipitación mensual

Los ajustes a la distribución gamma para los datos mensuales de precipitación en todos los casos fueron significativos ( $p < 0.01$ ). En las figuras, de la 7a a la 16a, se presentan los ajustes con los valores de la media, mediana y la moda, y la probabilidad de la media del mes. En todas las estaciones la media de la precipitación mensual resulta ser un mal predictor de la cantidad esperada de lluvia, dado que en la mayoría de los casos su probabilidad de ocurrencia tiene un rango entre 0.3 y 0.4 para los meses más lluviosos. Estos resultados, se confirman por la separación que presentan los valores de la media, mediana y la moda en todas las gráficas. En estas gráficas, se presentan dos máximos (junio y septiembre) donde la media es mayor a los meses restantes. De las mismas gráficas es evidente que la canícula es más marcada en las estaciones de Cacaloapan, Acatepec, Caltepec y Zapotitlán (ubicadas en la parte oeste del valle), donde se observan las únicas modas de cero en los meses de la época húmeda, presentándose en julio o en agosto, y en Caltepec y Cacaloapan en ambos meses.

El análisis de las frecuencias, de presentar una lluvia mayor o igual a dos veces la temperatura promedio por mes, indica que sólo hay diferencias significativas entre meses ( $P < 0.01$ ) y las estaciones son homogéneas. En este caso, donde la interacción no detecta algún tipo de gradiente o cambio en ciertas estaciones hacia ciertos meses, resultando no existir una diferencia

significativa ( $P > 0.1$ ). De los cinco meses considerados, junio y septiembre tienen significativamente una frecuencia mayor ( $P < 0.05$ ) que mayo, julio y agosto, los que no difieren entre ellos. Sin embargo, junio y septiembre son diferentes en cuanto a su consistencia en cómo se presentan las lluvias y en sus cantidades. Junio es un mes con alta predecibilidad que puede tener medias menores, mientras septiembre además de presentar medias mayores es un mes de menor consistencia.

Las gráficas de las isocías de igual probabilidad para los diferentes meses en relación a sus cantidades se presentan en las (Figuras 7b a la 16b). En éstas, es claro que junio tiene cantidades mayores de lluvia esperada en el 90 % de los años. Conforme consideramos eventos de menor probabilidad o eventos más raros (isocía del 10 % de los años), la tendencia se invierte y los valores ahora son mayores en septiembre.

Al quitar el efecto de la escala en las distribuciones (Figuras de la 7c a la 16c), dividiendo por beta la cantidad de lluvia en mm para las diferentes isocías, los máximos de consistencia en la precipitación ocurren en junio para las estaciones Acatepec, Tehuacán, Caltepec, Cacaloapan, Altepexi y Zapotitlán, mientras que para Calipán, Tilapa y Axusco el máximo se da en julio. Por su parte Coxcatlán comparte ambos máximos, aunque con valores relativamente menores.

El análisis de componentes principales de la matriz de los valores alfa para los meses y las estaciones, indica la existencia de gradientes de consistencia entre los meses y las

estaciones. Al ordenarlos se encuentra que el primero y segundo componente explican el 90.02 y el 7.43 por ciento de la variación respectivamente. Si sólo consideramos el primer componente, se indica un gradiente de meses y estaciones de mayor a menor predecibilidad promedio, de izquierda a derecha como se muestra en la Figura 17, de manera que para todo el valle el mes de junio es el mes de mayor predecibilidad, siguiéndole junio y posteriormente el grupo de los meses de mayo, septiembre y agosto. Los meses de octubre a abril aparecen en un grupo de baja predecibilidad en sus lluvias.

En la gráfica de las estaciones (Figura 17 b), en relación sólo al primer componente, la estación de Tilapa es la que presenta en promedio los valores de alfa mayores, siguiéndole Cacaloapan, Calipán, Axusco, Tehuacán, Zapotitlán, Acatepec, Caltepec y Coxcatlán.

El segundo componente separa fundamentalmente en función de los valores máximos de alfa en junio y julio, y aunque el segundo eje resultó no ser significativo, puesto que la correlación entre los meses que se separan más arriba y abajo (junio y julio) con respecto a éste no es significativa ( $P > 0.05$ ), este eje marca una tendencia en ciertas estaciones a ser en cierto meses más predecibles, con valores máximos de alfa y distribuciones menos asimétricas. El hecho de que la correlación entre los dos meses no se significativa se debe en parte a que las estaciones que se separa más con respecto a un valor máximo en julio (Tilapa, Calipán y Axusco), también tienen valores altos en junio, como lo



marcan las líneas de probabilidad ponderada por el factor de escala. Así, las estaciones por arriba de la línea media son aquellas que presentan un máximo de alfa en junio y lo mismo para las estaciones que se arreglan para abajo en concordancia con un máximo en julio.

La Figura 17b que muestra la ordenación de las estaciones, refleja la ubicación espacial de las localidades en el Valle, marcando de una manera muy clara que las estaciones se arreglan en un gradiente de altitud y de acuerdo con su ubicación en relación a la orografía (Figura 1 y Figura 17b). Así, por ejemplo Tlalapa, en la parte más al sureste en el mapa de la zona de estudio coincide en cuanto a su ubicación con el arreglo que se presenta en función del parámetro alfa. Calipán y Axusco, y en cierta medida Coxcatlán, quedan cercanos a este y coinciden de nuevo en cuanto a su ubicación. En la parte de arriba de la gráfica de las estaciones, quedan agrupados los sitios Cacaloapán, Acatepec, Caltepec, Zapotitlán, Altepexi y Tehuacán, que se asocian con un valor máximo en junio y se encuentran en la parte oeste del valle. Coxcatlán queda un tanto fuera de este esquema y para el cual Byers (1967), trabajando con datos de los años treinta, reportó que se presentaban anomalías importantes.

El arreglo por componentes principales de los meses y las estaciones con los valores esperados de lluvia el 90 y el 50 por ciento de los años se presentan en las Figuras 18 y 19. En estas ordenaciones, el primero y segundo eje de las gráficas explican el 89.94 y el 8.36 % de la variación en la primera y el 93.54 y

el 5.41 en la segunda. En ambas ordenaciones, el segundo componente resultó no ser significativo, aunque en la primera, el segundo componente tiende a serlo con un  $\alpha$  de 0.43, entre mayo y julio.

En las gráficas del 90 % de los años, junio es el mes que en promedio recibe mayor cantidad de lluvia en todas las estaciones, siguiéndole en importancia septiembre, julio y con los mismos valores agosto y mayo. En esta ordenación, el segundo eje separa hacia abajo los meses con valores altos de precipitación fundamentalmente en junio y en menor medida en mayo, y hacia arriba quedan separados los meses de julio y agosto. Las estaciones que se asocian con los máximos de mayo y junio, siguiendo un gradiente hacia las estaciones con máximos en julio y agosto son Acatepec, Cacaloapan, Zapotitlán, Caltepec, y las que se asocian a los segundos son Tilapa, Axusco y Calipán. Coxcatlán, Tehuacán y Altepexi quedan en medio del gradiente.

El arreglo de acuerdo con las cantidades de lluvia esperadas en el 50 % de los años hacen más evidente el gradiente descrito para el 90%, donde septiembre adquiere mayor importancia en relación a la ordenación anterior. El mes de agosto y julio se separan en la gráfica de los meses, y Calipán, Tilapa, Axusco y Coxcatlán en la gráfica de las estaciones. De la comparación de ambas ordenaciones de valores de igual probabilidad, la segunda separa más a lo largo del segundo eje a las estaciones.

Acatepec, Puebla.

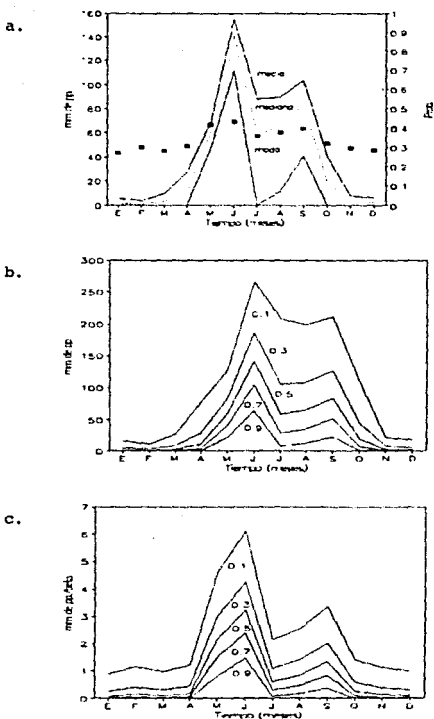


Figura 7. Ajustes de las distribuciones mensuales en Acatepec. A) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. B) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. C) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

Altepexi, Puebla.

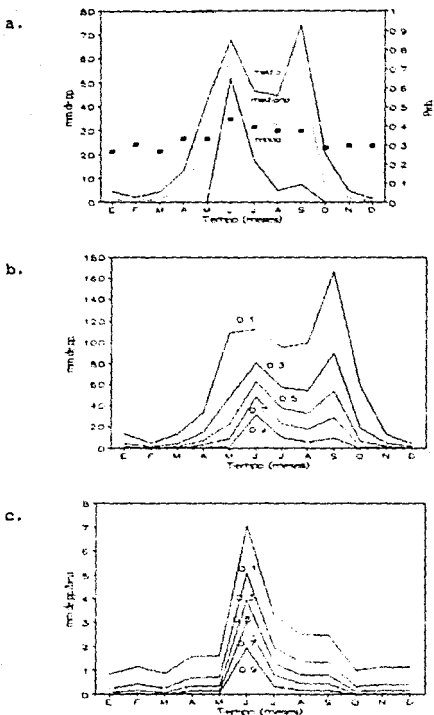


Figura 8. Ajustes de las distribuciones mensuales en Altepexi. A) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. B) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. C) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

Axusco, Puebla.

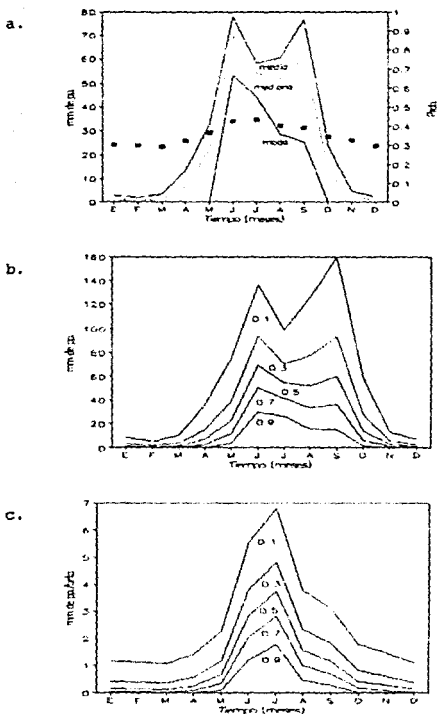


Figura 9. Ajustes de las distribuciones mensuales en Axusco. a) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. b) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. c) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

Cacaloapan, Puebla.

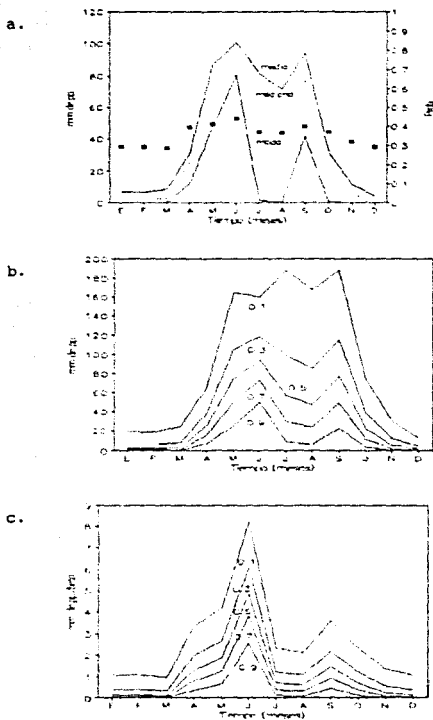


Figura 10. Ajustes de las distribuciones mensuales en Cacaloapan. A) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. B) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. C) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

Calipán, Puebla.

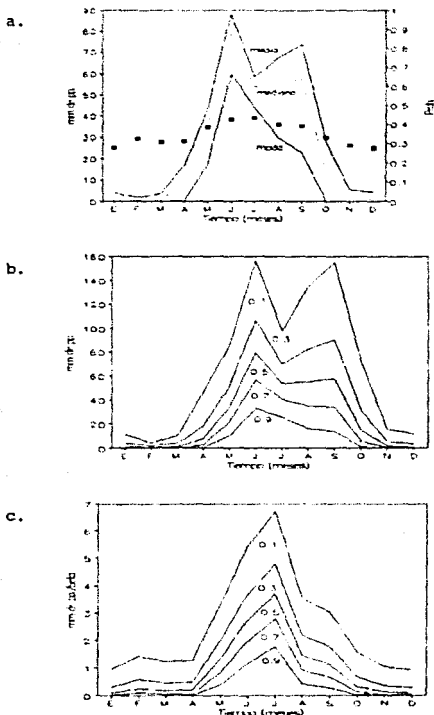


Figura 11. Ajustes de las distribuciones mensuales en Calipán. a) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. b) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. c) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

Caltepec, Puebla.

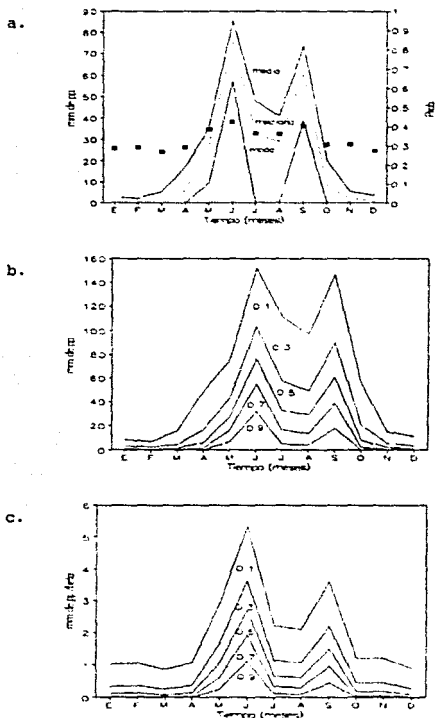


Figura 12. Ajustes de las distribuciones mensuales en Caltepec. A) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. B) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. C) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.



Coxcatlán, Puebla.

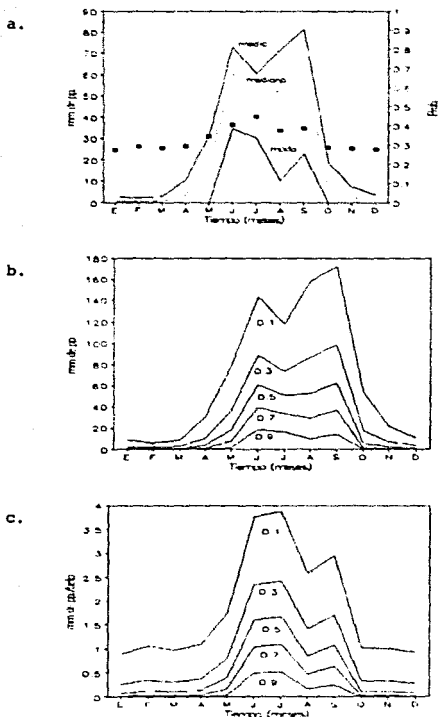


Figura 13. Ajustes de las distribuciones mensuales en Coxcatlán. a) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. b) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. c) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

Tehuacán, Puebla.

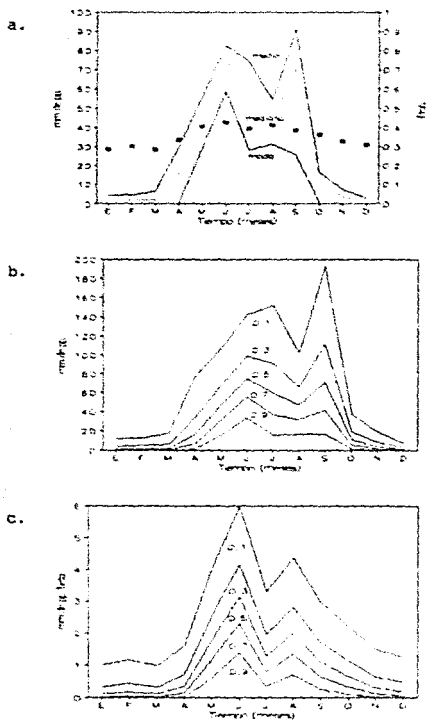


Figura 14. Ajustes de las distribuciones mensuales en Tehuacán. a) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. b) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. c) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

### Tilapa, Puebla.

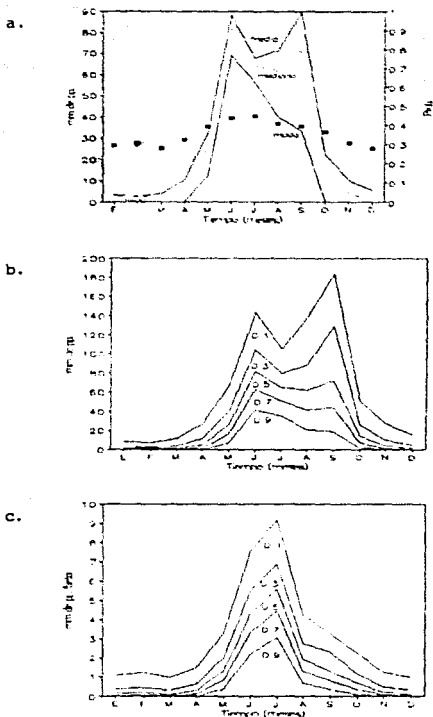


Figura 15. Ajustes de las distribuciones mensuales en Tilapa. a) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. b) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. c) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

Zapotitlán de Salinas, Puebla.

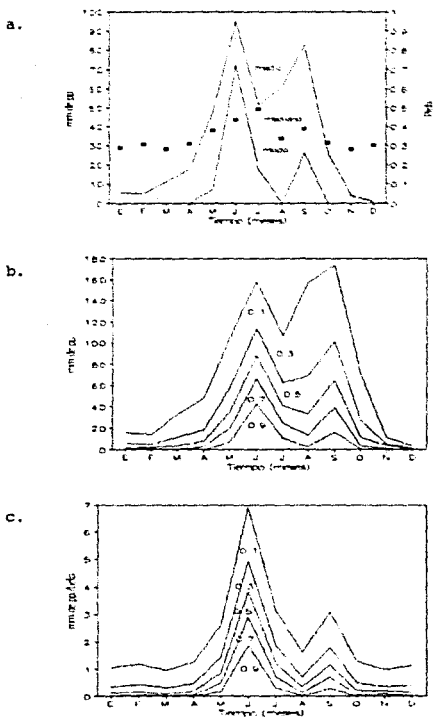


Figura 16. Ajustes de las distribuciones mensuales en Zapotitlán. A) Media, mediana y moda, y la probabilidad de la media. B) Isolíneas de probabilidad para los meses en relación a su precipitación por mes. C) Isolíneas ponderadas por el factor de escala.

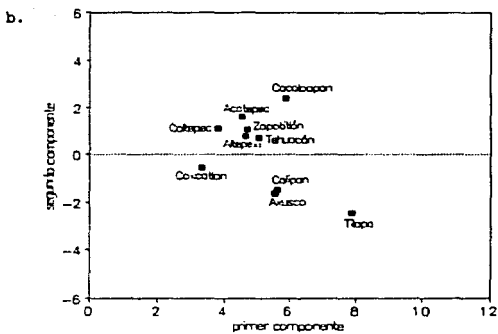
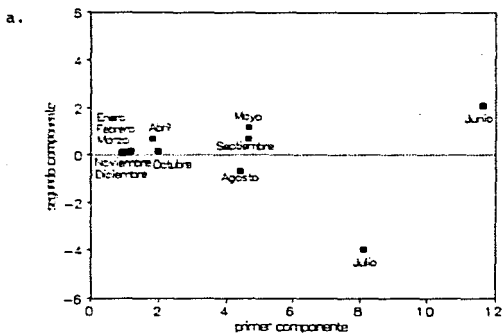


Figura 17. Ordenación de meses (a) y estaciones (b) de acuerdo con el parámetro alfa de las distribuciones mensuales.

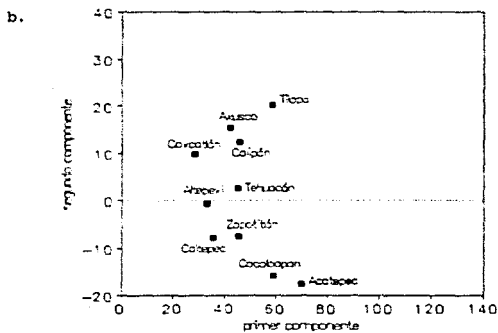
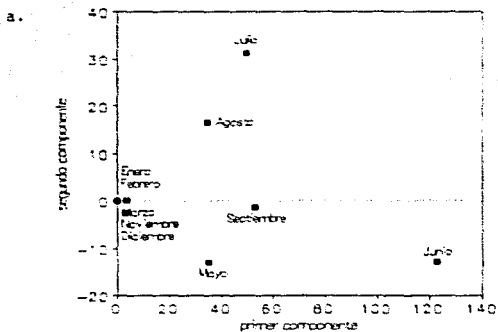


Figura 18. Ordenación de meses (a) y estaciones (b) de acuerdo con las cantidades esperables de precipitación en el 90 % de los años en sus distribuciones mensuales.

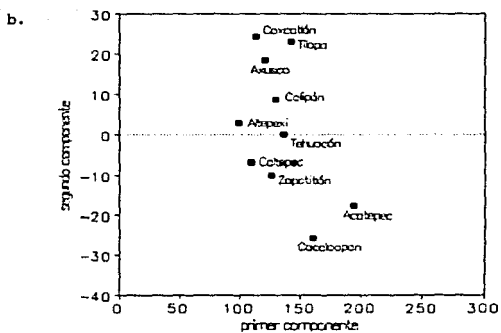
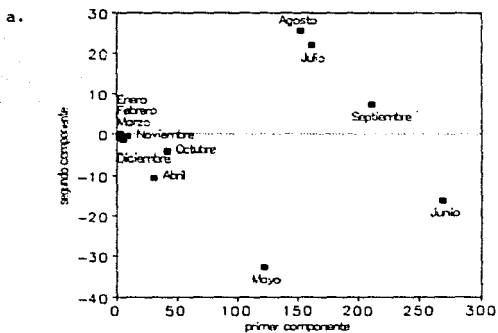


Figura 19. Ordenación de meses (a) y estaciones (b) de acuerdo con las cantidades esperables de precipitación en el 50 % de los años en sus distribuciones mensuales.

## DISCUSION

Son varios los autores que han considerado que el agua es el factor determinante de los procesos biológicos en las zonas áridas y semiáridas (Noy-Meir 1973, 1979; Rzedowski 1968; entre otros). De acuerdo con Noy-Meir (1973), estos ambientes se caracterizan por presentar bajos e impredecibles niveles de precipitación entre años, estaciones y meses, así como a escalas regionales y locales.

De acuerdo con los resultados obtenidos para la predicción de los niveles de lluvia anuales en el Valle de Tehuacán, queda de manifiesto que los promedios anuales son predictores relativamente buenos de la cantidad esperada de lluvia en esta región, lo cual contrasta con lo mencionado por diversos autores (Hastings & Turner 1965; García *et al.* 1973; Mosiño & García, 1981; Ezcurra & Rodríguez, 1984) para otras zonas áridas de México. Considerando lo anterior, el Valle de Tehuacán, constituye una zona árida con altos valores de predecibilidad en su precipitación que recibe anualmente. En contraste con otras zona áridas de México, la zona semiárida de Tehuacán, en promedio recibe cantidades de lluvia anual superiores a las reportadas para la Península de Baja California por Hastings y Turner (1965), con un rango entre 61 y 296 mm, a las mencionadas por Ezcurra y Rodríguez (1984) para el Gran Desierto en Sonora con valores que van desde los 70 a los 140 mm y a lo reportado por Cornet (1986) para el Bolsón de Mapimí con 200 y 264 mm. Esta



alta predecibilidad anual del Valle de Tehuacán, que ahora se reporta, está relacionada principalmente con su ubicación latitudinal, ya que se ubica por fuera de la faja de altas presiones de los 30° y su aridez está definida exclusivamente por un efecto orográfico. A diferencia de otras zonas áridas del norte de México, en donde se conjuntan ambos factores para definir en gran medida su aridez.

Localmente, la predecibilidad anual en las diferentes estaciones en el valle está asociada a la orografía y en menor medida con las cantidades recibidas. Esto contrasta con la idea general para las zonas áridas de que conforme la cantidad de lluvia es menor, la predecibilidad también disminuye (Fogel 1981). Es importante resaltar que en el valle podemos encontrar zonas, como la ubicada hacia las estaciones de Caltepec y Acatepec, con promedios anuales diferentes pero con los valores máximos de predecibilidad. De acuerdo con lo anterior podemos sugerir la existencia de zonas orográficas de alta predecibilidad, donde la orografía local afecta la precipitación principalmente en sus cantidades.

Del análisis de la estacionalidad, es evidente en general que el Valle de Tehuacán presenta un patrón de lluvias altamente estacional para el verano, como ocurre con la mayor parte de las zonas en la porción central de México (Wallen 1955), siendo alrededor de cuatro meses los que se esperan sean lluviosos en todas las estaciones. Sin embargo, si consideramos que el mismo autor describe para la parte central de México 6 meses lluviosos

(Wallén op cit.), que comprenden de mayo a octubre, el valle tiene una estación de lluvia corta. El mes excluido para todo el valle es octubre y en particular todas las estaciones tienden a presentar algún mes, de los cinco restantes, como seco.

Dentro de los 4 posibles meses lluviosos, el mes de junio es el más consistente en cuanto a la presencia de lluvia. Este máximo de precipitación no coincide con el primer máximo de temperatura promedio mensual, el cual ocurre en abril y mayo. Esto contrasta con lo que sucede en otras zonas áridas donde la época de lluvias de verano coincide con los registros máximos de temperaturas (Ezcurra y Rodríguez 1984; Cornet 1988).

El hecho de que el inicio de las lluvias ocurra en meses donde la temperatura desciende, debe tener implicaciones importantes en una disminución de la evaporación y en la disponibilidad del agua para los organismos, tal y como lo ha sugerido Shreve (1914) para los desiertos. Es claro que la demanda evaporativa y la temperatura en el valle están íntimamente relacionadas, lo que resalta la importancia de una disminución de la temperatura con el inicio de las lluvias.

Los datos mensuales muestran que junio es el mes más predecible en todo el valle, el más lluvioso en el 90 y 50% de los años y en donde se presenta el valor modal más alto en relación a los demás meses en todas las estaciones. Este hecho, si se considera que el valle es marcadamente estacional y en donde el inicio de las lluvias es un evento determinante en los ciclos biológicos y en diversos procesos naturales, junio es muy

importante como umbral de inicio altamente predecible y de cantidades de humedad considerables. Para el Valle de Zapotitlán, uno de los componentes orográficos del Valle de Tehuacán, muchos procesos fenológicos, de foliación, floración, fructificación, y producción de semillas, se asocian con este máximo de disponibilidad de agua. Desde el punto de vista del balance hídrico, las lluvias de junio son significativamente muy importantes en los ciclos biológicos, puesto que al venir de la corriente de los alisios, probablemente con intensidades bajas, y sin humedad previa en el suelo, deben tener altas tasas de infiltración, y consecuentemente sea un recurso altamente disponible para las plantas.

Una característica importante, acerca de la predecibilidad mensual de lluvia en el valle, es el hecho de que en su porción este (la zona más cercana a la sierra de Zongolica) el mes de julio resulta ser el de mayor importancia. Esto puede deberse, a que el fenómeno de sombra orográfica afecta de manera más pronunciada las cantidades en junio que llegan a dicha zona y consecuentemente la importancia de julio aumenta. En esta zona se encuentra una tendencia a presentar un patrón unimodal a los meses de julio-septiembre, a diferencia de la región del este donde su canícula es marcada y junio y septiembre son los más húmedos. En la parte oeste del valle, mayo puede aportar cierta cantidad de agua y con ésten quizás adelantar un tanto la época de lluvias.

El hecho de que exista un aumento en la precipitación en el

mes de septiembre, sugiere que la zona estudiada tiene una marcada influencia de perturbaciones de caracter tropical y extratropical, como son los ciclones y tormentas tropicales estudiadas por Jauregui (1967). El impacto de estas alteraciones meteorológicas se ve acentuado en las zonas de Coxcatlán, Calipán y Tilapa. Este hecho fue constatado previamente por Byers (1967), al estudiar la trayectoria de siete tormentas tropicales de 1932 a 1955, notando que aunque el efecto en lluvia en el valle era muy irregular, se manifestaba en mayor grado hacia estas porciones del valle.

Una influencia importante de los ciclones en las cantidades de precipitación recibidas en las regiones áridas de Baja California Sur fue descrita por Latorre y Penilla (1988), en la cual se muestra que las dinámica de la lluvia anual recibida y la derivada de la influencia de ciclones son independientes. Esto nos hace pensar que tratándose de una región árida, al igual que en el Valle de Tehuacán, estos eventos pueden dar razón de mucha de la lluvia en algunos años, sólo que en Tehuacán con una alta predecibilidad anual, queda de manifiesto la importancia que tiene junio y los cambios de relevancia en los meses para la zona este en mantener niveles consistentes de lluvia año con año. La evaluación de la importancia de estos eventos raros pero significativos sobre la biota, es uno de los aspectos quizás más importantes a considerar en el futuro.

En los ambientes áridos, el establecimiento de algunas especies vegetales se ha reportado para años excepcionalmente

húmedos y de manera poco frecuente, tal como es el caso de Routeloua gracilis para el desierto de Nuevo México (Neilson 1986). En el mismo estudio, Neilson sugiere que dada la impredecibilidad de la lluvia dentro de la dinámica anual y entre años, el establecimiento importante de esta planta se asocia no sólo a años muy húmedos, sino además a secuencias de años excepcionalmente húmedos. En Tehuacán, dada su predecibilidad anual, quizás el establecimiento de plantas ocurra en años excepcionalmente húmedos, donde la dinámica entre meses sea la más importante, con lo que la presencia de lluvias en todo el período húmedo sea determinante. A este nivel, las lluvias en septiembre seguramente son de gran importancia en el establecimiento de plantas, sin embargo estudios recientes han considerado que en el proceso de establecimiento pueden estar operando factores microambientales sumamente importantes (Valiente-Banuet 1991), actuando a otras escalas. El establecimiento de otras plantas de zonas áridas, fundamentalmente aquellas que presentan metabolismo fotosintético del tipo CAM y bajas tasas de crecimiento, también se ha reportado sólo para años excepcionalmente húmedos y de manera poco frecuente, como son los caso de Agave deserti (Jordan & Nobel 1979), y de Ferocatus acanthodes y Carnegiea gigantea (Jordan & Nobel 1982) para el Desierto Sonorense.

Dentro de la impredecibilidad en la ocurrencia de lluvia que caracteriza a las zonas áridas y semiáridas, el Valle de Tehuacán puede considerarse como una zona atípica. Su poca variación en

## ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

la precipitación anual, su marcada estacionalidad y la consistencia de ciertos meses lluviosos, quizá sean la clave para entender aspectos biogeográficos y ecológicos. Cabe señalar lo referente a los espectros de formas de vida de las plantas, los cuales en el Valle de Tehuacán, tienen una baja representación de especies anuales y una dominancia de perennes. Lo anterior contrasta con zonas áridas extratropicales en donde se han reportado espectros de formas de vida donde las anuales ocupan porcentajes mayores al 50%. En particular, Felger (1980) reporta para el Gran Desierto en Sonora que las efímeras constituyen el 55% de la flora, lo cual aunque puede ser un reflejo de las condiciones de extrema aridez, también puede estar relacionado con la poca predecibilidad de la lluvia ya señalado por Ezcurra y Rodrigues (1984).

En relación a los valores que se presentan en este trabajo como índices o cantidades más probables de acuerdo a cómo se distribuyen los eventos de lluvia, es necesario resaltar que son cantidades muy aceptables hasta probabilidades de alrededor de 0.3. Esta aseveración resulta del hecho que la distribución gamma es más susceptible en el ajuste a eventos extraordinarios que pueden estar presentes en la serie, y el error al estimar las cantidades esperadas para una probabilidad extrema puede ser muy grande. La dinámica de los ciclos biológicos y algunos procesos naturales, claramente están influenciados por aquellos eventos, que aunque pueden ser pequeños en zonas áridas, son muy significativos. Tal es el caso de Bouteloua gracilis en la cual

su dominancia en el desierto de las Grandes Planicies, está explicada en gran medida por eventos de lluvia menores a 10 mm, los cuales dan razón del 41% de la lluvia total y del 70% de los eventos de lluvia (Sala y Lauenroth, 1982), y sobre los cuales la distribución Gamma es ideal.

## BIBLIOGRAFIA

Bowman, K.O. and Shenton, L.R. 1988. Properties of Estimators for the Gamma Distribution. Marcel Dekker, Inc., New York and Basel. 268 pp.

Button, B.J. & Ben-Asher, J. 1983. Intensity-Duration Relationships of Deserts Precipitation at Avdat, Israel. Journal of Arid Environments, 6: 1-12.

Byers, D.S. Climate and Hydrology. En: Byers, D.S. (Ed). The Prehistory of the Tehuacan Valley. Vol. 1. Environment and Subsistence. University of Texas Press, Austin. pp. 48-65.

Cornet, A. 1988. Principales Características Climáticas. En: Montaña, C. (Ed). Estudio Integrado de los Recursos Vegetación, Suelo y Agua en la Reserva de la Biósfera de Mapimi. I. Ambiente Natural y Humano. Instituto de Ecología, a.c., México, D.F. pp.45-76.

Everitt, B.S. 1977. The Analysis of Contingency Tables. Chapman and Hall. Ltd. London. 128 pp.

Ezcurra, E. & Rodriguez, V. 1986. Rainfall patterns in the Gran Desierto, Sonora, Mexico. Journal of Arid Environments, 10: 13-28.

Felger, R.S. 1980. Vegetation and Flora of The Gran Desierto, Sonora, Mexico. Deserts Plants 2(2): 87-114.

Freas, K.E. and Kemp, P.R. 1983. Some Relationships Between Environmental Reliability and Seed Dormancy in Desert Annual Plants. Journal of Ecology, 71: 211-217.

Fuentes, A. L. 1969. Análisis Climático del Estado de Puebla. Tesis Maestro en Geografía, Colegio de Geografía Fac. Fil. y Letras, UNAM.

García, E. 1981. Modificaciones al Sistema Climático de KÖPPEN. (Para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana) 239 pp.

García, E. Mosiño, P.A. 1968. Los Climas de Baja California. En: Comité Nacional Mexicano para Decenio Hidrológico Internacional. Memoria 1966-1967. Instituto de Geofísica, UNAM. pp. 29-57.

García, E., Vidal, R., Tamayo, L.M., Reyna, T. Sánchez, R., Soto, M. y Soto, E. 1973. Precipitación en la República Mexicana y Evaluación de su Probabilidad. Instituto de Geografía, UNAM-CETENAL, México, 7 pp. + Apéndice (mapas).

García-Oliva, F. 1991. Influencia de la Dinámica del Paisaje en la Distribución de las Comunidades Vegetales en la Cuenca del Río



- Zapotitlán, Puebla. Boletín Instituto de Geografía, (en prensa).
- Hastings, J.R. and Turner, R.M. 1965. Seasonal Precipitation Regimes in Baja California, Mexico. Geografiska Annaler, 47 A: 204-223.
- Jaramillo, L.,V. y González, M.F. 1983. Análisis de la Vegetación Arbórea en la Provincia Florística de Tehuacán - Cuicatlán. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 45: 49-64.
- Jauregui, O.E. 1967. Las Ondas del Este y los Ciclones Trópicos en México. Rev. Ingeniería Hidráulica en México Vol. XXI.:197-206.
- Jordan, P.W. and P.S. Nobel. 1982. Height Distributions of Two Cacti in Relation to Rainfall, Seedling Establishment, and Growth. Botanical Gazette 143(4): 511-517.
- Jordan, P.W. and P.S. Nobel. 1979. Infrequent Establishment of Seedlings of Agave deserti (Agavaceae) in the Northwestern Sonoran Desert. American Journal of Botany, 66(9): 1079-1084.
- Kemp, P.R. 1983. Phenological Patterns of Chihuahuan Desert Plants in Relation to the Timing of Water Availability. Journal of Ecology, 71: 427-436.
- Latorre, C.D. and Penilla, L. 1988. Influencia de los Ciclones en la Precipitación de Baja California Sur. Atmosfera, 1: 99-112.
- Lauer, W. 1973. Problemas climato-ecológicos de la Vegetación de la región montañosa oriental Mexicana. Comunicaciones No. 7: 37-45. Plan Puebla-Tlaxcala.
- Lauer, W. 1978. Tipos Ecológicos del Clima en la Vertiente oriental de la Meseta Mexicana. Comunicaciones No. 15: 235-248. Plan Puebla-Tlaxcala.
- McGinnies, W.G. 1979. General Description of Desert areas. En: Goodall, D.W., Peery, R.A. & K.M., Howes (Eds). Arid Land Ecosystems: structure, functioning and management. Vol. 1 Cambridge Univ. Press, Cambridge. pp. 5-19.
- Miranda, F. 1955. Formas de Vida Vegetales y el Problema de la delimitación de las Zonas Áridas de México. En: Beltrán, G. Mesas Redondas Sobre Problemas de las Zonas áridas de México. Ediciones del I.M.R.N.R., A.C., México, D.F.
- Mosiño, P.A. 1964. Tiempo Superficial y Configuraciones del Flujo Aéreo Superior en México. Geofísica Internacional, 4: 117-168.
- Mosiño, P.A. and García, E. 1979. Rainfall Anomalies in Mexico and Central America. Revista de Geofísica, 10-11: 41-76.

Mosiño, P.A. y García, E. 1978. Caracterización del Régimen Pluviométrico de las Regiones Áridas y semiáridas de México, mediante la Distribución Gamma. Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, 76: 13-24.

Mosiño, P.A. and García, E. 1981. The Variability of Rainfall in Mexico and its Determination by Means of the Gamma Distribution. Geografiska Annaler, 63 A: 1-10.

Neilson, R.P. 1986. High-Resolution Climatic Analysis and Southwest Biogeography. Science, 232: 27-34.

Neilson, R.P. and Wullstein, L.H. 1983. Biogeography of two southwest American Oaks in relation to Atmospheric Dynamics. Journal of Biogeography, 10: 275-297.

Noy-Meir, I. 1973. Desert Ecosystems: Environment and Producers. Annual Review of Ecology and Systematics, 4: 25-51.

Noy-Meir, I. 1980. Structure and Function of Desert Ecosystems. Israel Journal of Botany, 28: 1-19.

Noy-Meir, I. 1981. Spatial Effects in Modelling of Arid Ecosystems. En: Goodall, D.W., Perry, R.A. and Howes, K.M.W. (Eds.) Arid Land Ecosystems: Structure, functioning and management. Vol.2 Cambridge, University Press, Cambridge. pp. 411-432.

Pearson, K. (Ed.) 1951. Tables of The Incomplete Gamma Function. Cambridge: Cambridge University Press. 164 pp.

Rzedowski, J. 1968. Las principales zonas áridas de México y su Vegetación. Revista del Seminario de Estudios Biológicos, 1: 4-24.

Rzedowski, J. 1973. Geographical Relationships of The Flora of Mexican Dry Regions. En: Graham, A. (Ed.). Vegetation and Vegetational History of Northern Latin America. Elsevier Sci. Co., Amsterdam. pp. 61-72.

Rzedowski, J. 1986. Vegetación de México. Editorial Limusa, México. 432 pp.

Sala, O.E. and Lauenroth, W.K. 1982. Small Rainfall Events: An Ecological Role in Semiarid Regions. Oecologia, 53: 301-304.

Sokal, R.R. & Rohlf, F.J. 1981. Biometry. W.H. Freeman and Company, New York. 859 pp.

Thom, H.C.S. 1958. A Note on the Gamma Distribution. Monthly Weather Review, 86: 117-122.

Valiente-Banuet, A. 1991. Dinámica del Establecimiento de Cactáceas: Patrones Generales y Consecuencias de los Procesos de Facilitación por Plantas Nodrizas en Desiertos. Tesis Centro de

Ecología, UNAM.

Villaseñor, J.L., Dávila, P. & Chiang, F. 1990. Fitogeografía del Valle de Tehuacán - Cuicatlán. Boletín de la Sociedad Botánica de México.

Wallén, C.C. 1955. Some Characteristics of Precipitation in Mexico. Geografiska Annaler, 37 : 51-85.

Walter, H. and Stadelmann, E. 1974. A new Approach to the Water Relations of Desert Plants. En: Brown, G.W. (Ed.) Desert Biology. Vol. 2 Academic Press, New York. pp. 213-310.

Yeaton, R.I. and Cody, M.L. 1979. The Distribution of Cacti along Environmental Gradients in the Sonora and Mchave Deserts. Journal of Ecology 67:529-541.

Zelen, M. y M.C. Severo. 1970. Probability Functions. En: M. Abranowitz & I.A. Stegun (Eds). Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications, New York. pp. 927-964.