

141  
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**VARIACIONES MICROCLIMATICAS DE UN DESIERTO  
INTERTROPICAL EN EL CENTRO DE MEXICO:  
ALGUNAS IMPLICACIONES SOBRE LA VEGETACION.**

**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 :  
EDWARD MICHAEL PETERS RECAGNO

México, D. F.

Verano de 1993

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **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

RESUMEN .....	1
<b>I INTRODUCCION .....</b>	<b>3</b>
1.1 Area de estudio .....	10
<b>II METODOS .....</b>	<b>12</b>
2.1 Simulación de la radiación .....	12
2.2 Cálculo de los valores de radiación .....	13
2.3 Balance hídrico .....	17
2.4 Comportamiento de la temperatura .....	19
<b>III RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
3.1 Radiación anual .....	20
3.2 Evaporación .....	22
3.3 Precipitación .....	25
3.4 Perfiles térmicos .....	29
3.5 Temperaturas máximas y mínimas .....	39
<b>IV DISCUSION .....</b>	<b>43</b>
4.1 Vegetación y microclima .....	50
<b>V CONCLUSIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>60</b>

## RESUMEN

El Valle de Zapotitlán Salinas ( $18^{\circ}20' N$  y  $97^{\circ}28' O$ ) es un desierto semiárido intertropical con una estación lluviosa definida y una fisiografía muy heterogénea.

Diversos estudios sobre algunas especies de plantas de esta zona han detectado diferencias dependiendo del azimut de las laderas donde éstas se encuentran confinadas.

Dichos antecedentes crearon la necesidad de caracterizar el ambiente físico del área de estudio, con la finalidad de encontrar una posible respuesta a las diferencias registradas en el campo.

El presente trabajo describe los distintos microclimas que se generan en la zona, a partir de la variable simple: Radiación solar directa (RSD).

Un modelo de RSD para pendientes de ángulo y azimut variables, simulado para las condiciones de la zona de estudio, reveló las diferencias en la cantidad de radiación recibida sobre las distintas laderas a lo largo del año.

La RSD fue estudiada en relación a sus efectos sobre el balance hídrico y la temperatura. Además, se discutieron en conjunto, los posibles efectos de estos factores sobre la vegetación.

Los resultados obtenidos mostraron la existencia de distintos microclimas a nivel de ladera. El análisis se centró en el período de precipitación pluvial por tratarse de un

ecosistema controlado y regulado por el agua.

Los microclimas más contrastantes se presentaron en las laderas norte y sur. La ladera sur a pesar de haber recibido la mayor cantidad de radiación a lo largo del año, presentó el microambiente más favorable para el desarrollo de las plantas debido a que, justo durante la época de lluvias, fue la ladera que recibió la menor radiación convirtiéndose en el microambiente con menor evaporación potencial y menores temperaturas.

La ladera norte recibió en promedio la menor cantidad de radiación a lo largo del año, sin embargo, durante las lluvias la RSD incidió de lleno sobre esta ladera dando lugar ahí al microambiente con mayor evaporación potencial y mayores temperaturas.

Las laderas este y oeste a pesar de haber recibido la misma cantidad de radiación a lo largo del año, presentaron diferencias significativas en la evaporación y las temperaturas, debido principalmente a los efectos producidos por la inercia térmica pero también, presumiblemente, debido a la acción de los vientos y a la nubosidad. La ladera oeste presentó un microambiente donde las temperaturas y la evaporación fueron menores con respecto a la ladera este.

Los resultados se compararon con trabajos hechos en la misma zona, y con ello se obtuvo una mejor caracterización de cómo el entorno físico está actuando sobre la vegetación.

## INTRODUCCION

La información meteorológica convencional contiene datos muy útiles para describir el clima de cualquier región del planeta e inferir algunas características de las agrupaciones vegetales ahí presentes. Sin embargo esta información resulta hoy en día insuficiente si se quieren conocer las variaciones climáticas a una escala más fina, y entender su influencia sobre la vegetación. Potzger (1935) hace referencia desde entonces a esta inquietud: "Mientras la vegetación en general está determinada por el macroclima, el microclima es el clima real de las plantas y un factor determinante para la asociación de éstas..."

Son muchos los factores que pueden producir diferencias microclimáticas en una misma área. Dentro de las causas físicas principales se pueden mencionar la latitud, altitud, topografía, radiación solar, luz, temperatura, disponibilidad de agua y tipo de suelo. La radiación solar es uno de los más importantes, debido a que influye sobre la mayoría de los factores antes mencionados. Su estudio en relación con sus efectos sobre el clima y la vegetación es un tema que ha despertado la inquietud de muchos investigadores desde hace tiempo. Entre otros, destacan los siguientes trabajos:

Gail (1921) trabajando sobre la distribución de Pseudotsuga taxifolia en regiones semiáridas del noreste de Estados Unidos, encontró que ésta especie está confinada a laderas noreste debido a la exposición solar y el viento.

Shreve (1922, 1924, 1927a, 1927b) en una serie de trabajos realizados en el oeste de Estados Unidos, encontró que la vegetación estaba marcadamente afectada por la exposición de las pendientes. También notó que la radiación sobre las laderas determina la temperatura del suelo, la marcha de la humedad de éste y la temperatura del aire. Concluyó que la insolación es más importante que la temperatura del aire para determinar la temperatura del suelo, y que las diferencias en la vegetación confinada en las laderas norte y sur se deben a condiciones iniciadas por diferencias debidas a la insolación y a las temperaturas del suelo.

Bates (1923) estudió en las Rocallosas los tipos de bosques en función de la influencia de la exposición sobre declives situados a una misma altura. Encontró bosques de abetos Douglas sobre la parte superior de las laderas norte, bosques de pinabete Engelmann en la parte baja de las laderas norte y pino amarillo y algunos abetos Douglas jóvenes en las laderas sur. Su estudio climático indicó que las temperaturas del suelo en las laderas sur alcanzan los 65°C y que esto debía limitar a las plántulas menos tolerantes al calor.

Cottle (1932), trabajando en el suroeste de Texas, encontró que la cubierta vegetal era el doble en las laderas norte comparadas con las laderas sur.

Potzger (1935), estudiando la vegetación de Indiana en relación con la exposición sobre las laderas, encontró una marcada segregación de especies, en laderas orientadas hacia el

norte bosques de Acer-Fagus y en el lado sur bosques de Carya-Quercus.

Shanks y Norris (1950) describieron la segregación de especies en laderas norte y sur en un pequeño valle de Tennessee. Encontraron que especies de todos los estratos muestran cierto grado de restricción para una u otra exposición.

Cantlon (1953) estudió la vegetación y el microclima en laderas norte y sur de una serranía en el centro de New Jersey, la cantidad de radiación sobre las dos laderas resultó producir microclimas marcadamente diferentes. Sólo algunas especies se encontraron exclusivamente en una pendiente, las diferencias en la vegetación se debían a la densidad relativa, la frecuencia y la cubierta de las especies.

La medición de la radiación solar en sus principios ha sido determinada de manera empírica, gráfica o tabulada (Haurwitz 1948, Houghton 1954, Johnson 1954, McDonald 1960). Posteriormente se desarrollaron modelos computacionales que permiten simular y calcular la radiación solar directa en cualquier punto de la superficie de la tierra (Garnier y Ohmura 1968, Holland y Steyn 1975, Revfiem 1976, Nunez 1980).

Los investigadores de diversas áreas no tardaron mucho en incorporar los modelos de radiación a sus trabajos, por ejemplo: Williams et al. (1972) demostraron que la ocurrencia de glaciares, en la Isla de Baffin, se debía a la altitud y a la radiación solar. En otro trabajo, Kirkpatrick y Nunez (1980) encontraron diferencias en la vegetación, a lo largo de un



transecto norte-sur, en un valle de Tasmania. Estas variaciones en la vegetación resultaron estar altamente correlacionadas con la radiación total anual calculada para dicho transecto.

La literatura sobre variaciones ambientales debidas a la insolación y su relación con la vegetación, como puede verse, es abundante para latitudes medias. En contraste, existen pocos estudios realizados en las zonas intertropicales (Smith 1977, Kirkpatrick *et al.* 1988). En general se ha encontrado un mayor número de diferencias microambientales en terrenos discontinuos, debido a que los rayos solares inciden de manera muy particular dependiendo no sólo de la latitud y época del año sino también del azimut e inclinación de los terrenos. Estas variaciones locales en el clima influyen sobre la temperatura, la cantidad de luz y la disponibilidad del agua. Por lo tanto, la vegetación se ve afectada por tratarse de factores relacionados con el control del crecimiento, composición y estructura de la cubierta vegetal.

Las diferencias más drásticas se han registrado en las laderas norte y sur. Estas difieren en las temperaturas del suelo y del aire, en la humedad del suelo y atmosférica, en la incidencia de la luz y en la velocidad del viento. Para el hemisferio norte, la ladera sur es la más insolada y, por consiguiente, la que registra las mayores temperaturas, la que dispone de menos agua y la que soporta la vegetación más xérica, en contraste con la ladera norte que alberga la vegetación más mélica.

Holland y Steyn (1975) mostraron con su modelo de radiación

que las diferencias entre las laderas norte y sur son máximas en las latitudes medias.

A estas variaciones climáticas debidas al binomio topografía-radiación solar se les denomina "efectos de ladera"; y son causa no sólo de variaciones en la radiación solar directa sino también de otros factores como la incidencia de los vientos, la cantidad de humedad que éstos porten y la nubosidad, entre otros.

Las zonas áridas al estar muy expuestas y recibir gran cantidad de radiación (debido al alto porcentaje de suelo desnudo, la ubicación geográfica y los cielos despejados) son regiones muy propensas a presentar gran variedad de procesos microclimáticos. Además, la escasa precipitación causa que la disponibilidad de agua sea un factor que controla y determina a estos ecosistemas (Noy-Meir 1973). De ahí que el microambiente que disponga de mayor cantidad de agua será el más favorecido y menos limitado en cuanto al desarrollo de la vegetación.

La incidencia de la radiación solar promueve microclimas a escalas más finas: en algunos casos la incidencia de la radiación no depende ya de un elemento fisiográfico sino de un factor biológico. Destacan los trabajos sobre nodricismo, entendido como la asociación biológica donde una especie es protegida por otra de la radiación solar directa (Shreve 1931, Yeaton 1978, McAuliffe 1984, Valiente-Banuet 1991). Así, la planta protegida tiene una distribución preferencial abajo de la nodriza. La radiación puede afectar a la vegetación a una escala aún más

fina. Walter (en Brown 1974) nos muestra cómo las condiciones microambientales en Arizona afectan los valores del potencial osmótico de Ferocactus wislizenii y Carnegiea gigantea, los valores más bajos se encuentran en el lado suroeste de la planta mientras que los más altos están en el noreste. Estas diferencias afectan la forma de estos cactus, debido a que el parénquima del lado suroeste pierde más agua a lo largo del año, las costillas de este lado sufren un acortamiento entre sus distancias y por consiguiente se presenta simetría bilateral con plano de noreste a suroeste. Nobel et al. (1991), reportan valores de acidez en el clorénquima para dos especies de cactus en el Desierto de Sonora, los valores son claramente más altos para el lado sur de los tallos de ambas especies.

La arquitectura y las estructuras de la vegetación desértica han sido estudiadas también en función de los efectos producidos por la incidencia de la radiación solar (Ehleringer et al. 1980; Nobel 1980, 1981; Herbert 1983; Geller y Nobel 1986, 1987; Ezcurra et al. 1991).

La información de la radiación resulta entonces de particular interés ya que puede darnos una base para predecir algunas variaciones locales en el clima y en aspectos biológicos como la germinación, establecimiento, sobrevivencia, crecimiento, morfología, arquitectura, composición y estructura de la vegetación.

El presente trabajo surge ante la inquietud de mostrar los microclimas que se generan en el área de estudio, dadas las

evidencias indirectas de posibles procesos microclimáticos reflejadas en trabajos realizados en la zona. Valiente-Banuet (1991), estudiando el establecimiento de algunas especies de cactus encontró que éstas se encuentran significativamente debajo de arbustos y Coryphanta pallida se ubica preferentemente hacia el norte y oeste. También, presenta un experimento sobre germinación y sobrevivencia de cohortes, en diferentes condiciones ambientales y orientaciones de ladera. La germinación de semillas fue más alta en tratamientos con sombra y la pendiente que resultó más favorable fue la ladera sur.

Díaz (1991), trabajando sobre los efectos dependientes de la densidad en Neobuxbaumia tetetzo encontró una marcada disimilitud en las densidades, siendo éstas consistentemente mayores en la ladera sur.

En otro trabajo, H. Nuñez (en preparación), estudiando el crecimiento de Neobuxbaumia tetetzo muestra que estos cactus presentan un incremento significativamente mayor en las laderas sur y oeste si se comparan con los individuos confinados en las laderas norte y este.

Estos antecedentes hacen notoria la necesidad de explorar las relaciones entre topografía, radiación solar, temperatura y balance hídrico, con la finalidad de describir las causas y los microambientes que ahí se generan y cómo éstos, pueden estar influyendo sobre la vegetación.

## Area de estudio

El estudio se llevó acabo sobre una colina en el jardín botánico y vivero de cactáceas "Helia Bravo Hollis" ubicado a unos 25 km al sur de la ciudad de Tehuacán, sobre la carretera Tehuacán-Huajuapán de León en el estado de Puebla, México. Este sitio se encuentra dentro del valle de Zapotitlán Salinas, muy cerca del poblado que lleva el mismo nombre. La ubicación geográfica es 18°20' latitud norte, 97°28' longitud oeste y 1407 msnm.

La zona presenta un relieve muy heterogéneo, gran número de componentes montañosos y pocas zonas planas, todo esto debido a la interacción de varios procesos geomorfológicos (García-Oliva 1991). Los suelos son someros y pedregosos, de origen sedimentario principalmente.

El promedio de precipitación y la temperatura media anual es de 380 mm y 21°C respectivamente (García 1981). La fórmula climática reportada para la estación Zapotitlán-Salinas es  $BSohw(e)gw$ , conforme a la clasificación de Köppen modificada por García (1981). Esta corresponde a un clima árido con lluvias en verano, semicálido y extremo con oscilaciones de las medias mensuales entre 7 y 14°C.

La aridez de la zona se debe a la sombra de lluvia causada por la Sierra Madre Oriental (Smith 1965). Sin embargo existe una marcada estacionalidad de las lluvias (estas ocurren completamente en verano), cuatro meses consecutivos están

definidos como lluviosos, comenzando con junio, el más consistente y lluvioso, seguido de una marcada canícula, y después septiembre, no tan consistente debido a la variación de los ciclones tropicales (Valiente 1991).

La región pertenece a la provincia florística conocida como Tehuacán-Cuicatlán y su vegetación corresponde a un matorral xerófilo (Rzedowski 1978). Por otro lado, esta zona es considerada como el centro de más alta diversidad de cactáceas columnares a nivel mundial (Briones et al. 1989). Además, la flora presenta un alto grado de endemismo (Villaseñor 1990) y ha sido dividida en cuatro unidades fisionómicas: matorral espinoso, tetechera, cardonal e izotal (Zavala 1982). En particular en el sitio de estudio destaca la tetechera, siendo las familias con mayor riqueza Cactaceae y Leguminosae.

## **MÉTODOS**

En el presente trabajo se consideraron tres aspectos generales a evaluar, con el propósito de encontrar evidencias de procesos microclimáticos presentes en el área de estudio. El primer aspecto fue la determinación de la cantidad de radiación solar directa interceptada por ladera. El segundo, la evaluación del balance hídrico por ladera y por último, el análisis del comportamiento de la temperatura, también por ladera.

El trabajo de campo comprendió un período de siete meses, de junio a diciembre de 1989, debido a la necesidad primordial de abarcar la época de lluvias, por la importancia biológica del agua, en los ambientes áridos (Noy-Meir 1973).

Para todos los estudios se consideraron cuatro laderas con orientaciones hacia los cuatro puntos cardinales (norte, este, sur y oeste), en algunos estudios se incluyó la cima.

### **1) Radiación solar**

Se utilizó un modelo (elaborado en el Laboratorio de Ecología de Comunidades del Centro de Ecología, UNAM) que calcula la cantidad de radiación solar directa recibida sobre una superficie de inclinación y azimut conocidos. Mediante este modelo se simuló la radiación incidente sobre las pendientes en estudio (Tabla 1) para la latitud de Zapotitlán ( $18^{\circ}20'N$ ) cada 15 días a lo largo de un año. Los datos calculados de radiación que se obtuvieron están expresados en MJ/m<sup>2</sup>día (Megajoules por metro

cuadrado día) .

La inclinación de las pendientes y la orientación de éstas se midió con la ayuda de un clinómetro y una brújula respectivamente.

Se utilizó un valor de 0.75 para la transmitancia (valor que va de 0 a 1) característico de las zonas áridas.

Tabla 1. Azimut e inclinación de las laderas consideradas en el estudio.

Pendiente	Azimut	Inclinación
Norte	0°	17°
Este	90°	23°
Sur	180°	19°
Oeste	270°	23°

#### Cálculo de los valores de radiación

A) Ecuaciones astronómicas clásicas.

Se utilizaron para calcular la posición del Sol para cualquier día del año.



i) Cálculo de la declinación solar (dt):

$$dt = I.S. \times \text{sen} (2\pi t/a) + f.c.$$

$$\text{donde } I.S. = 23^{\circ}27'$$

= inclinación del eje de la Tierra  
sobre el plano de su órbita

$$t = \text{día juliano } (t_0 = 21 \text{ de marzo})$$

$$a = 365.25 \text{ días}$$

= año solar

f.c. = factor de corrección dado por la  
órbita elíptica (f.c.  $\approx$  0)

ii) Cálculo del ángulo del Sol sobre el ecuador celeste  
(anh):

$$anh = 2\pi h/24$$

h = hora local solar.

Así dt y anh definen exactamente la posición del Sol en la esfera celeste para un día t y una hora h.

Por lo tanto, para cada hora de un día dado podemos calcular la posición exacta del Sol sobre la esfera celeste.

iii) Cambio de coordenadas para definir la posición del Sol respecto de un observador cualquiera (en vez de definir las coordenadas con respecto al ecuador celeste las definimos respecto al horizonte celeste del observador).

$$eh = f(dt, anh, lat.)$$

$$ah = g(dt, anh, lat.)$$

donde, eh = elevación del Sol sobre el horizonte

ah = azimut solar

lat. = latitud del sitio

f y g = funciones de transformación de dos sistemas  
de coordenadas esféricas

B) Cálculo de la superficie efectiva de intercepción (s.e.):

$$s.e. = l \times \cos\alpha$$

$$\cos\alpha = s.e./l$$

$$\cos\alpha = s.e./l = s.e.r.$$

$$s.e.r. = \cos\alpha$$

$$0 \leq \cos\alpha \leq 1$$

donde s.e. = superficie efectiva

s.e.r. = superficie efectiva relativa

l = longitud del cuerpo plano

Por lo tanto, la superficie efectiva de intercepción de un cuerpo plano (p.ej. una ladera) es igual al coseno del ángulo formado por la dirección de los rayos solares y la normal al plano del cuerpo.

El coseno de un ángulo definido en coordenadas esféricas es función de los azimuts y las inclinaciones del cuerpo plano y de la radiación incidente, de ahí que:

$$s.e.r. = \cos\alpha = \cos(I) \cdot \text{sen}(eh) + \text{sen}(I) \cdot \cos(eh) \cdot \cos(A-ah)$$

donde I = inclinación de la ladera

A = azimut de la ladera

C) Cálculo de la radiación solar directa (RSD) incidente para un día y hora determinados (Sh):

Sabiendo que el recorrido de los rayos solares a través

de la atmósfera disminuye conforme el sol se aproxima al cenit, la proporción de RSD que es detenida por la atmósfera fue calculada como una función de la elevación angular del Sol sobre el horizonte celeste (Ross 1981). Las estimaciones fueron hechas siguiendo el método de Gates (1980; ver también Monteith & Undsworth 1990) el cual calcula la RSD a una determinada hora del día, calculando el largo del recorrido de los rayos solares a través de la atmósfera, de ahí que

$$S_h = S_0 t^m$$

donde  $S_0$  = constante solar

$$S_0 = 1380 \text{ w/m}^2 = 1380 \text{ J/(s.m}^2)$$

$t$  = transmitancia atmosférica

$t \approx 0.75$  en zonas áridas

$m$  = masa óptica del aire

La transmitancia atmosférica ( $t$ ) es la probabilidad de que un quantum de radiación atraviese la atmósfera sin ser deflectado por partículas suspendidas ni ser absorbido por moléculas de los gases atmosféricos. Obviamente,  $0 < t < 1$ .

La masa óptica del aire es una función de la longitud relativa de la atmósfera que deben recorrer los rayos solares. Si definimos, arbitrariamente, el espesor de la atmósfera como  $ea = 1$ , entonces  $\text{sen}(eh) = ea/m = 1/m$ , y por lo tanto  $m = 1/\text{sen}(eh)$ , donde  $m$  mide cuantas veces más longitud atmosférica deben atravesar los rayos en relación a la posición cenital. Obviamente  $m \geq 1$ .

$$\text{por lo tanto } S_h = S_0 t^{[1/\text{sen}(eh)]}$$

D) Cálculo de la radiación que llega a una ladera para un día y hora dados ( $R_h$ ).

Conociendo la radiación solar directa y la superficie efectiva relativa obtenemos:

$$R_h = s.e.r. (h) \times Sh$$

E) Cálculo de la cantidad de radiación interceptada por una ladera a lo largo de un día cualquiera ( $D$ ):

$$D = \int_0^{24h} s.e.r. (h) \times Sh \times dh$$

Los valores obtenidos se expresan en MJ/m<sup>2</sup>día

## 2) Balance hídrico

Para determinar el balance hídrico por ladera se colocaron tres pluviómetros y tres evaporímetros en cada ladera y en la cima, sumando así un total de quince pluviómetros y quince evaporímetros. Estos instrumentos meteorológicos, fueron diseñados y armados en el laboratorio con materiales económicos tomando en cuenta los principios y consideraciones de los instrumentos industriales.

Los pluviómetros consistieron en un embudo de plástico de 12 cm de diámetro unidos a la tapa de un recipiente de plástico con una capacidad de 3 litros.

Para calcular la precipitación en milímetros se calculó el área de captación del embudo:  $A = \pi D^2/4$  donde;  $A$  (área) = 113cm<sup>2</sup>,

D (diámetro) = 12cm y  $\pi = 3.1416$ . Como el recipiente donde se colectaba el agua tenía un área mayor que la del embudo la precipitación no se podía calcular directamente por lo que se obtuvo así:  $h = V/A \times 10$  donde; h = lámina de agua en mm, V = volumen en ml o cm cúbicos y A = área del embudo.

Para evitar la pérdida de agua en los pluviómetros por evaporación, éstos fueron provistos en su interior con una película de 2 mm de aceite mineral.

Los evaporímetros consistieron en botes de lata de 5 litros de capacidad con una altura de 25 cm y un diámetro de 17 cm. Estos se marcaron 7 cm abajo del borde superior tomando esta marca como nivel cero de evaporación y dejando así un margen suficiente en caso de que la precipitación superara a la evaporación.

Los pluviómetros y evaporímetros fueron protegidos, para evitar su remoción o pérdida de agua, con pequeñas casetas rectangulares de 120x60x60 cm construidas con armazón de alambros y malla de alambre de 1.27 cm de abertura.

La evaporación total en cada ladera se calculó para cada mes, restando a los promedios de evaporación de cada ladera, los promedios de precipitación correspondientes.

Las mediciones se hicieron cada quince días para la evaporación y cada mes para la precipitación. Con los valores registrados y siguiendo la misma metodología de las estaciones meteorológicas, se obtuvieron los datos de precipitación, evaporación y balance hídrico (evaporación - precipitación),

expresados en milímetros.

### 3) Comportamiento de la temperatura

Se realizaron perfiles térmicos y se registraron temperaturas máximas y mínimas en cada ladera.

Los perfiles térmicos se registraron mediante el uso de un teletermómetro YSI (Yellow Spring Instrument Co.), modelo 44 TD, serie 6513, con un sensor número 408, útil para medir la temperatura (°C) de superficies y aire.

Los perfiles se realizaron en fechas cercanas al solsticio de verano, equinoccio de otoño y solsticio de invierno (25 de junio, 24 de septiembre y 20 de diciembre respectivamente). Se registraron temperaturas desde la superficie del suelo hasta los dos metros de altura para las cuatro laderas. Estas mediciones se hicieron con un intervalo de tres horas comenzando a las 0630 y terminando a las 2130 horas.

Las temperaturas máximas y mínimas (°C) se registraron con termómetros Taylor-Sybron de máxima y mínima, colocados en cada ladera a una altura de un metro sobre el suelo y protegidos de la radiación directa por cajas de cartón ventiladas. Las temperaturas se tomaron al final de cada mes, durante los últimos cinco meses del estudio.

## RESULTADOS

### 1) Simulación de la radiación

La simulación de la radiación para las laderas en estudio, mostró la existencia de grandes diferencias en la intercepción de la radiación a lo largo del año (Figura 1). Durante la época de mayor radiación en el hemisferio norte, el sol se encuentra radiando al norte del área de estudio, por lo que las pendientes orientadas hacia el norte reciben más radiación solar que las pendientes con azimut sur, con una diferencia máxima el 21 de junio, fecha correspondiente al solsticio de verano.

La ladera con orientación sur resultó ser la más estable en la cantidad de radiación interceptada, ya que su variación anual fue la menor si se compara con las otras laderas (Figura 1). También se observaron en esta ladera dos máximos de radiación que correspondieron a fechas cercanas a los equinoccios, entre estos máximos, la curva decreció y durante ese período fue la ladera que recibió menor radiación. Durante el invierno, la ladera sur experimentó su mínimo de radiación; sin embargo, fue la ladera que recibió mayor radiación en esa época del año.

La ladera con orientación hacia el norte fue la que tuvo mayor variación a lo largo del año (Figura 1). Como se puede observar esta ladera presentó en verano su máximo de radiación, superando a todas las laderas. En invierno presentó su mínimo de radiación interceptada. Además, fue la ladera que recibió la menor cantidad de radiación anual.

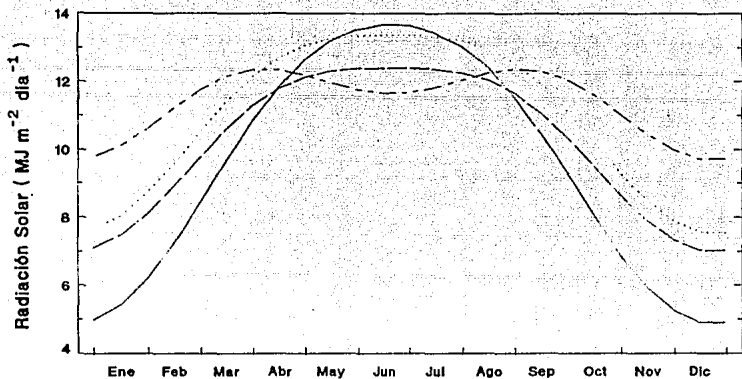


Figura 1. Cantidad de radiación solar directa recibida a lo largo de un año en Zapotitlán (18°20'N), sobre la cima de un cerro y sus cuatro laderas situadas en los cuatro puntos cardinales norte (---), este-oeste (—), sur (-.-.) y cima (.....).



Las laderas este y oeste recibieron la misma cantidad de radiación a lo largo del año, debido a la trayectoria del sol y por tener el mismo ángulo de inclinación, por ello se les representó con una misma línea en la Figura 1. Estas laderas recibieron el máximo de radiación en verano, que fue mayor al de la pendiente sur y menor a la del norte. En invierno presentaron el mínimo de radiación, que fue mayor al mínimo de la pendiente norte y menor al mínimo de la sur.

La cima representó a una zona plana (existen pocas en el área de estudio) y su máximo de radiación, también en verano, superó a todas las laderas excepto la norte. En invierno recibió la menor cantidad de radiación superando al resto de las laderas, excepto la sur.

El cruce que experimentaron las curvas de radiación, tiene una duración aproximada de cuatro meses. El más contrastante fue el que se dió entre las laderas norte y sur (Figura 1). Estos cruces son propios de las zonas intertropicales de relieve heterogéneo (Figura 2), si se observa en la simulación estos no se presentaron fuera de los trópicos.

## **2) Balance hídrico**

### **Evaporación**

La marcha de evaporación por ladera se muestra en la Figura 3. Las lecturas fueron mensuales y están dadas en milímetros de pérdida por mes.

En junio al comenzar las mediciones, la ladera sur registró

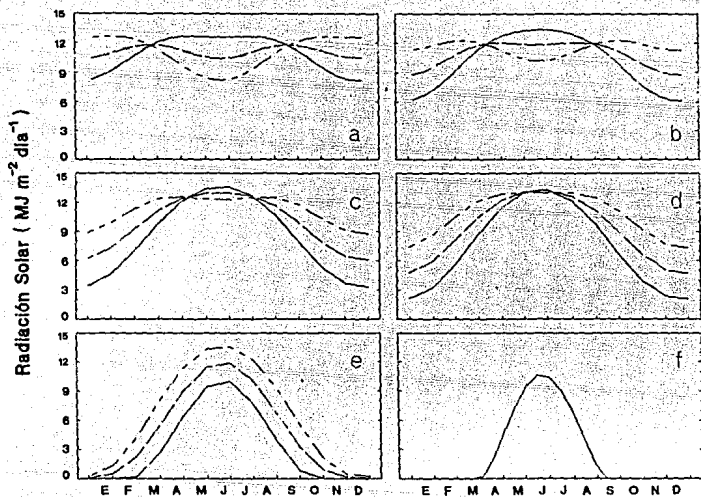


Figura 2. Variación estacional de la radiación solar directa recibida sobre faderas con  $20^\circ$  de inclinación, situadas al norte (—), este-oeste (- - -) y sur (- · - ·), a diferentes latitudes escogidas: a)  $0^\circ\text{N}$ , b)  $10^\circ\text{N}$ , c)  $23^\circ 27'\text{N}$ , d)  $30^\circ\text{N}$ , e)  $60^\circ\text{N}$  y f)  $90^\circ\text{N}$ . En la simulación a  $90^\circ$  todas las orientaciones reciben la misma cantidad de radiación.

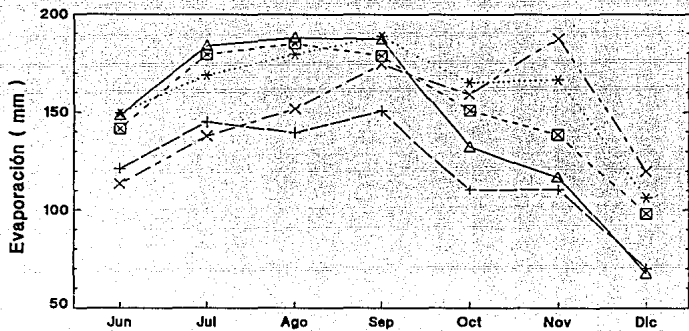


Figura 3. Curso de la evaporación mensual para las cuatro laderas: norte (Δ), este (◻), sur (×), oeste (+) y la cima (\*).

la menor evaporación, sin embargo, con el paso de los meses aumentó en evaporación, hasta superar a todas las pendientes a mediados de septiembre y continuó así el resto del año. La ladera oeste fue la que presentó menor evaporación a lo largo de los siete meses.

La ladera este, tuvo un comportamiento similar (paralelo) a la ladera oeste, sin embargo la primera presentó mayor evaporación, aproximadamente 35 mm más en cada mes.

La ladera norte, registró la mayor evaporación, respecto a las laderas sur y oeste, durante los cuatro primeros meses del estudio; después sus valores de evaporación fueron decreciendo hasta diciembre, donde registró la menor evaporación. Existieron diferencias significativas en la evaporación entre las laderas y entre los meses (ver análisis de varianza - ANDEVA - en la Tabla 2 ).

### Precipitación

El curso de la precipitación para cada ladera y la cima se muestran en la Figura 4. Las lecturas fueron mensuales y están expresadas en milímetros de lluvia captada por mes. Como puede verse, en junio y septiembre se presentaron dos máximos de precipitación siendo mucho mayor el primero. Estos dos máximos están separados por una fuerte merma en las lluvias o canícula.

Existieron diferencias significativas en la precipitación debido principalmente a los meses (ver ANDEVA en la Tabla 3). El promedio de la precipitación mensual puede verse en la Figura 5.

Tabla 2. Análisis de varianza (ANDEVA) para la evaporación por ladera.

Factor	S de C	gl	C.M.	F	P
Mes	59659	6	9943.17	120.48	<<0.000001
Ladera	18013	4	4503.25	54.57	<<0.000001
Mes x ladera	21496	24	895.67	10.85	<<0.000001
Error	4704	57	82.53		
Total	103871	91			

Tabla 3. Análisis de varianza (ANDEVA) para la precipitación por ladera.

Factor	S de C	gl	C.M.	F	P
Mes	126090.0	6	21015.00	5347.3	0.000000
Ladera	145.6	4	36.40	9.26	0.000043
Mes x ladera	555.5	24	23.15	5.89	0.000003
Error	227.9	58	3.93		
Total	127019.0	92			

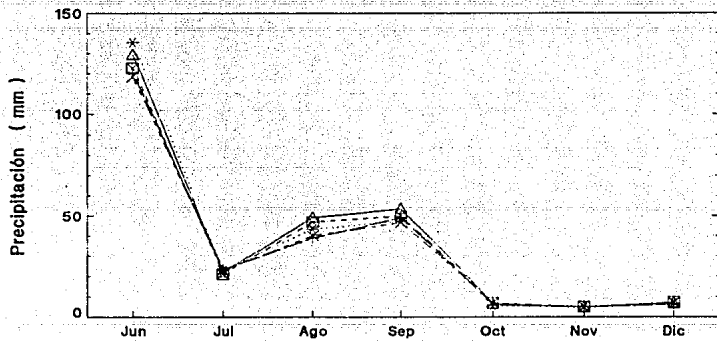


Figura 4. Curso de la precipitación mensual en las cuatro laderas: norte ( $\Delta$ ), este ( $\boxplus$ ), sur ( $\times$ ), oeste ( $-$ ) y cima ( $-$ ).

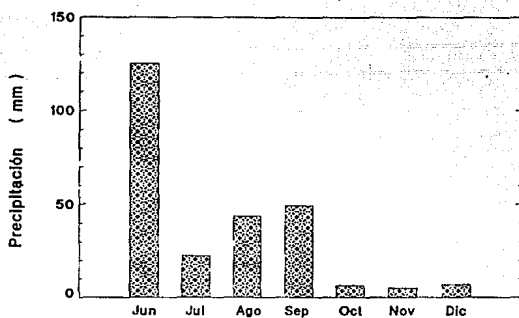


Figura 5. Promedio de la precipitación mensual para las cuatro laderas y cima.

### 3) Comportamiento de la temperatura

#### Perfiles térmicos

Los registros de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) de los perfiles térmicos se presentan para cada ladera, a intervalos de tres horas para cada fecha (Figuras 6, 7 y 8).

En la figura 6 se presentan los perfiles térmicos realizados el 25 de junio (fecha cercana al solsticio de verano). A las 0630 horas se registraron los perfiles térmicos con menor temperatura para las cuatro laderas, la temperatura se incrementó paulatinamente hasta encontrar su máximo en el registro de las 1230, posteriormente empezó a disminuir hasta el último registro (2130), sin embargo a esta hora la temperatura fue aún mayor que a las 0630. También podemos notar en general que la temperatura a lo largo del día fluctuó de 12 a  $14^{\circ}\text{C}$ , que la temperatura mínima estuvo entre 18 y  $20^{\circ}\text{C}$  y la máxima alrededor de  $32^{\circ}\text{C}$ . Continuando con la figura 6, vemos que las temperaturas en general no mostraron fuertes variaciones con el cambio de altura, sin embargo sí hubo una ligera tendencia de la temperatura a disminuir conforme aumentó la altura.

Los perfiles térmicos realizados el 24 de septiembre (fecha cercana al equinoccio de otoño) se muestran en la Figura 7. A las 0630 se registraron las temperaturas más bajas para las cuatro laderas y ésta fluctuó entre 15 y  $16^{\circ}\text{C}$ , la temperatura se fue incrementando hasta encontrar su máximo a las 1230 y decreció hasta las 2130 siendo, este último registro  $2^{\circ}\text{C}$  aún mayor comparado con las 0630. La temperatura a lo largo de los



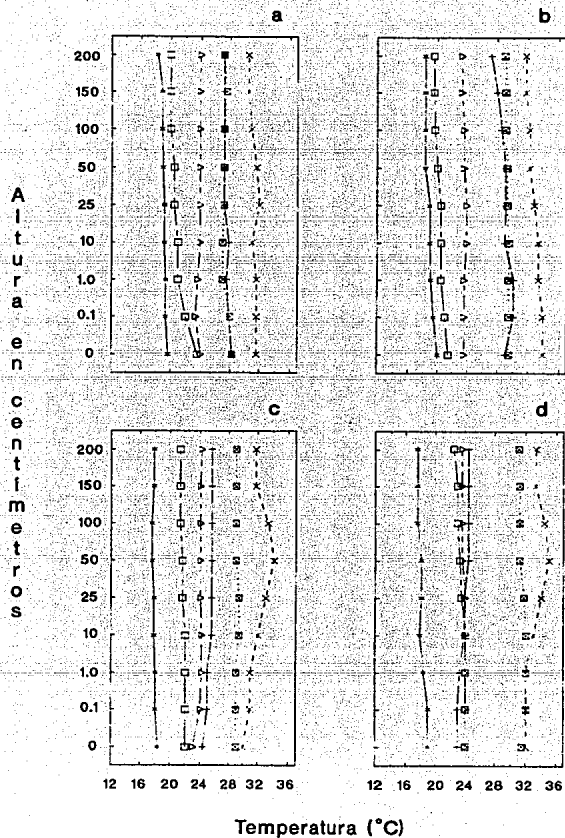


Figura 6. Perfiles térmicos realizados en las laderas norte (a), este (b), sur (c) y oeste (d), el 25 de junio. Cada perfil representa diferente hora local: 0630 (\*), 0930 (+), 1230 (∧), 1530 (Σ), 1830 (▷) y 2130 (▢).

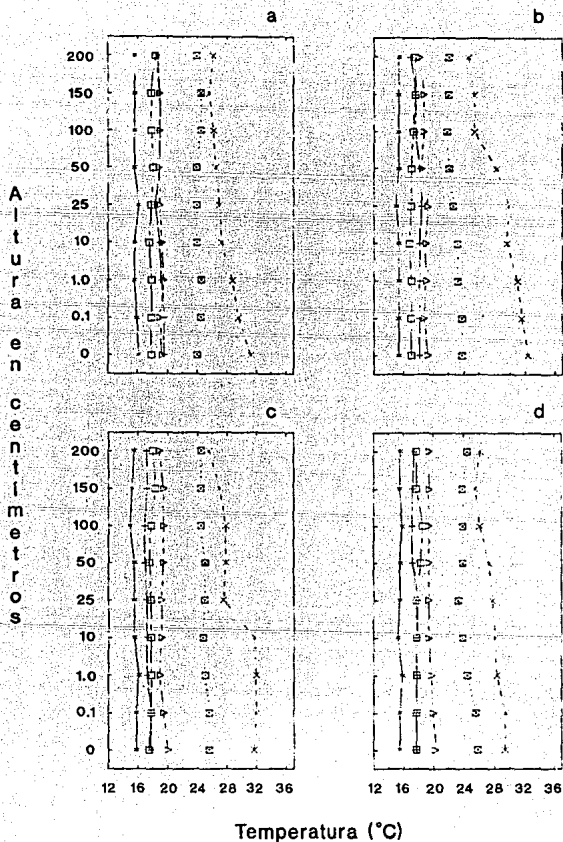


Figura 7. Perfiles térmicos de las laderas norte (a), este (b), sur (c) y oeste (d), para el 24 de septiembre. Cada perfil representa diferente hora local: 0630 (x), 0930 (-), 1230 (x), 1530 (□), 1830 (∇) y 2130 (□).

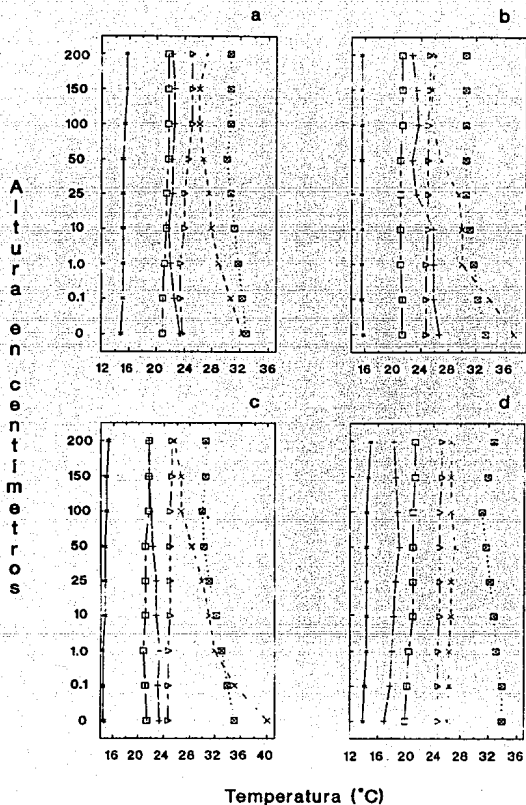


Figura 8. Perfiles térmicos de las laderas norte (a), este (b), sur (c) y oeste (d), para el 20 de diciembre. Cada perfil representa diferente hora local: 0630 (\*), 0930 (+), 1230 (>), 1530 (⊚), 1830 (▷) y 2130 (□). Nota: la escala utilizada en (c) es diferente al empleado en el resto de la figura.

registros fluctuó alrededor de 17°C en la superficie, en contraste con alrededor de 10°C a los 200 cm de altura. Sin embargo, las temperaturas de los perfiles no mostraron gran variación con la altura con excepción del realizado a las 1230, que mostró una clara evidencia de la disminución de la temperatura conforme aumentó la altura (en la ladera este fue 8°C menor comparado con el valor del suelo). Continuando con la figura 7 es notorio que cuatro de los perfiles se encontraron acotados entre los 15 y 20°C.

Los perfiles térmicos realizados el 20 de diciembre (un día antes del solsticio de invierno) se pueden observar en la Figura 8. Los registros de temperatura más bajos para las cuatro laderas se obtuvieron a las 0630, y estos fluctuaron entre 14 y 16°C. Las temperaturas fueron ascendiendo hasta las 1530, donde se registraron los perfiles más cálidos; sin embargo, la temperatura máxima se registró a las 1230 en la ladera sur y al nivel del suelo. A esa hora también se observó que la temperatura disminuyó drásticamente conforme aumentó la altura.

Los resultados de los perfiles térmicos también se presentaron graficando las temperaturas de todas las laderas a una misma hora y para cada fecha (Figuras 9, 10 y 11).

Las laderas a las 0930 se pudieron ordenar de mayor a menor temperatura (Figura 9). Para junio el orden fue: este, norte, sur y oeste. Para septiembre no hubo un orden claro, pero para diciembre fue: este, sur-norte y oeste.

En la Figura 10 se observa el comportamiento de la

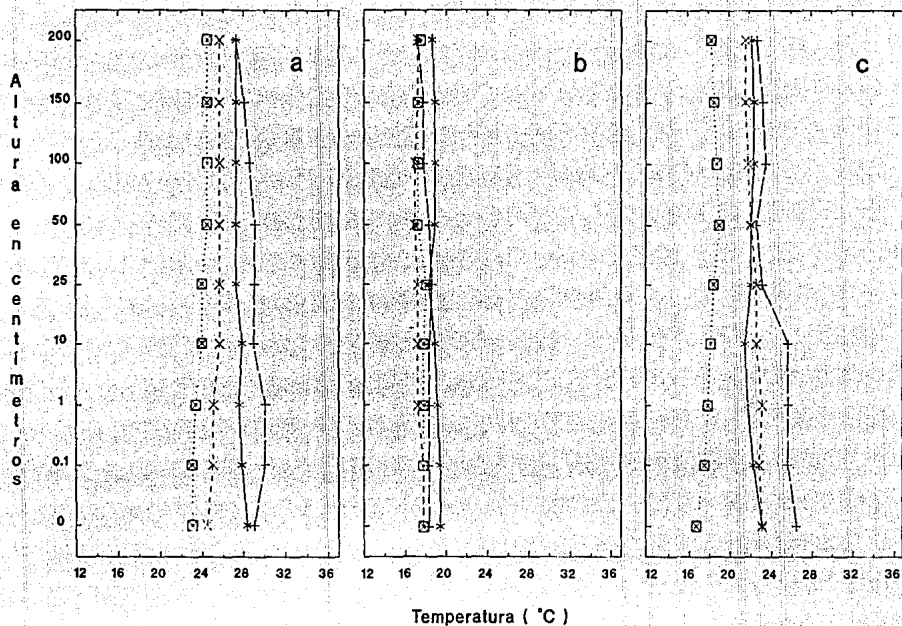


Figura 9. Perfiles térmicos realizados en las laderas norte ( · ), este ( + ), sur ( x ) y oeste ( □ ), a las 0930 hora local para el 25 de junio (a), 24 de septiembre (b) y 20 de diciembre (c).

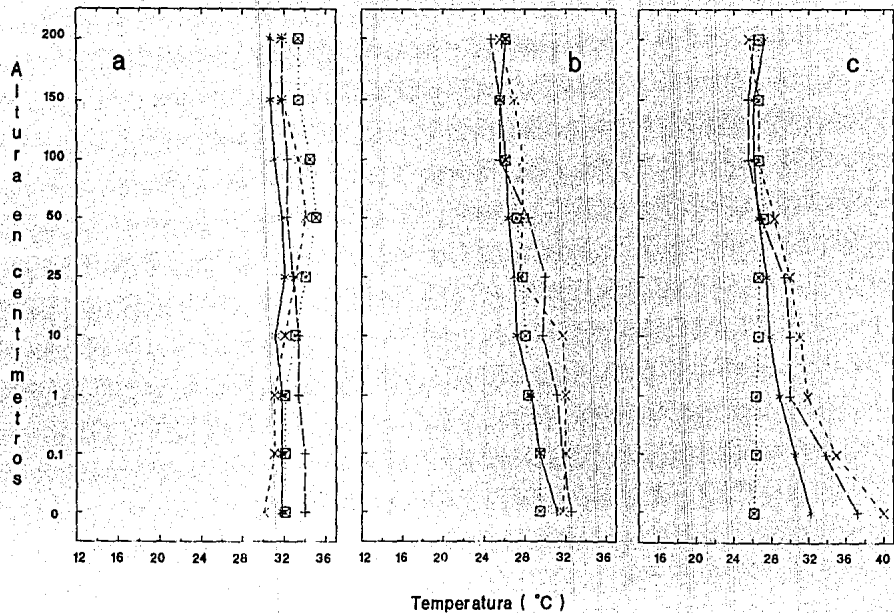


Figura 10. Perfiles térmicos realizados en las laderas norte (\*), este (+), sur (x) y oeste (□), a las 1230 hora local para el 25 de junio (a), 24 de septiembre (b) y 20 de diciembre (c).

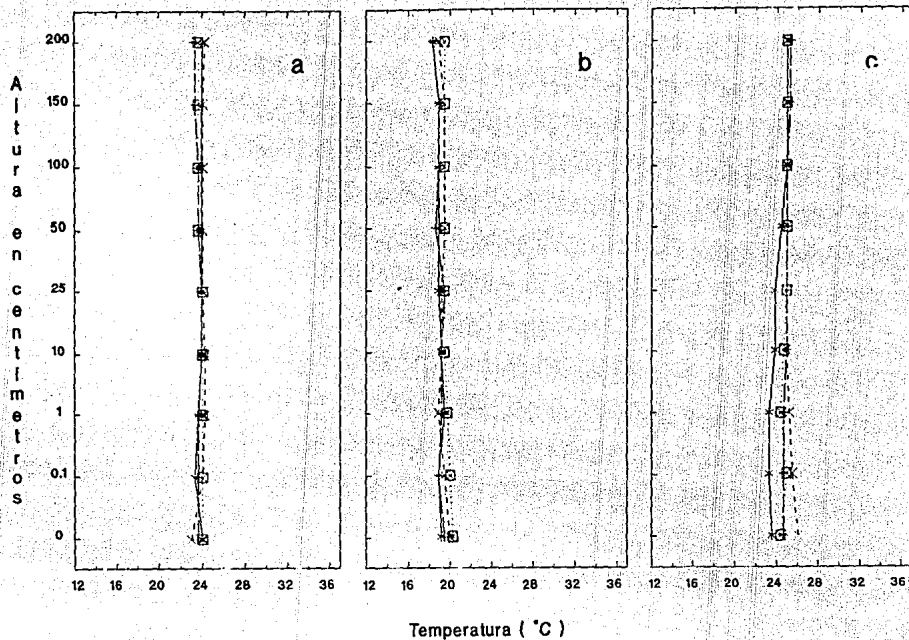


Figura 11. Perfiles térmicos realizados en las laderas norte (\*), este (+), sur (X) y oeste (M), a las 1830 hora local para el 25 de junio (a), 24 de septiembre (b) y 20 de diciembre (c).

temperatura a las 1230 (en las Figuras 6, 7 y 8, las temperaturas de los perfiles alcanzaron su máximo a las 1230 salvo dos casos en diciembre). En junio los perfiles tuvieron poca variación en la temperatura con respecto a la altura, fueron parecidos entre sí y tuvieron mayor temperatura, comparados con los perfiles térmicos realizados en septiembre y diciembre. En septiembre también los perfiles fueron parecidos entre sí aunque la temperatura disminuyó considerablemente con la altura. En diciembre los perfiles a nivel del suelo fueron muy distintos entre sí, conforme aumentó la altura los perfiles se homogeneizaron y presentaron una disminución drástica de la temperatura. Sur, este, norte y oeste fue el orden de mayor a menor temperatura que presentaron las laderas en diciembre.

En los perfiles térmicos de las 1830 (Figura 11) se puede notar que para las tres fechas todas las laderas presentaron homogeneidad en la temperatura con excepción de los primeros 10cm para diciembre, donde hubo una diferencia de poco más de 2°C entre la ladera norte y la sur, siendo la primera la de menor temperatura.

La Figura 12 muestra las temperaturas obtenidas a nivel del suelo para cada fecha y horario de registro: para las cuatro laderas (a, d, g); laderas este y oeste (b, e, h) y laderas norte y sur (c, f, i). Las temperaturas aumentaron hasta llegar a un máximo a las 1230, después fueron decreciendo. Las áreas bajo las curvas representan la cantidad de calor acumulado por cada ladera durante el día. Al comparar las áreas se vió que algunas



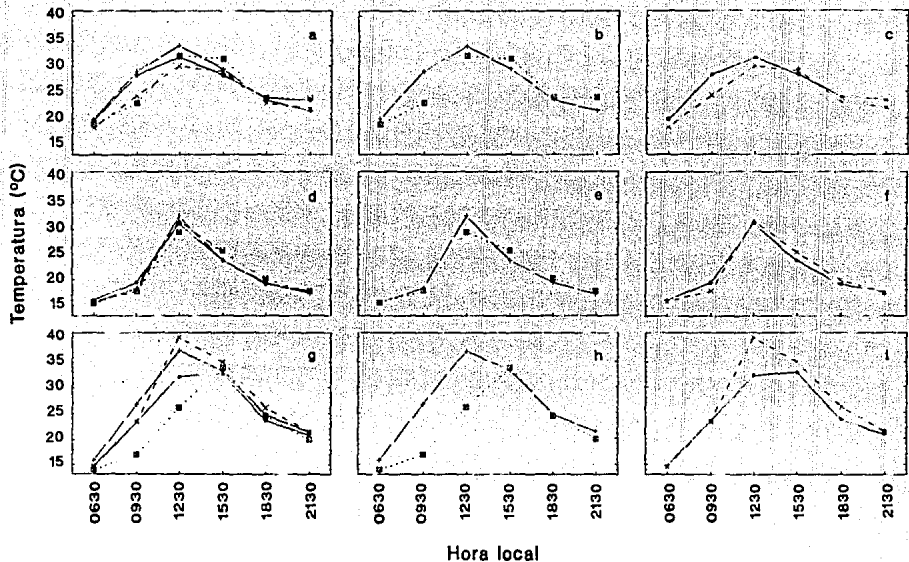


Figura 12. Marcha de la temperatura al nivel del suelo para las laderas norte (\*), este (+), sur (v) y oeste (□), correspondientes al mes de junio (a-c), septiembre (d-f) y diciembre (g-i).

son notoriamente mayores que otras. Nótese que la Figura 12 (h), presentó las diferencias más grandes, a pesar de que las laderas que se comparan (este y oeste) recibieron la misma cantidad de radiación. Las posibles explicaciones se discuten más adelante.

#### Temperaturas máximas y mínimas

Las temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) máximas y mínimas, del aire a 1 m de altura, se obtuvieron mensualmente. En la Tabla 4 se pueden observar los valores. En las Figuras 13 y 14 se muestran las temperaturas máximas y mínimas de las cuatro laderas respectivamente. Existen varios cruces formados por las curvas de la temperatura máxima en las distintas laderas; el más importante fue el que se presentó entre las laderas norte y sur. En la Figura 14 se muestra la trayectoria de las temperaturas mínimas mensuales para las cuatro laderas en estudio. Puede observarse que las temperaturas disminuyeron claramente con el paso de los meses.

Tabla 4. Temperaturas máximas y mínimas mensuales obtenidas en las cuatro laderas: Norte (N), este (E), sur (S) y oeste (O). Los valores están dados en grados centígrados.

Mes	Ladera	Máxima	Mínima
Agosto	N	37.5	15.0
	E	37.0	14.0
	S	36.5	13.0
	O	38.0	10.0
Septiembre	N	37.5	13.0
	E	34.5	12.5
	S	33.5	11.5
	O	37.0	11.0
Octubre	N	35.0	8.0
	E	34.5	8.0
	S	39.0	7.0
	O	38.5	9.0
Noviembre	N	36.0	9.5
	E	37.0	10.0
	S	38.0	9.0
	O	36.5	10.0
Diciembre	N	33.0	0.0
	E	37.0	2.5
	S	36.5	1.5
	O	34.0	1.0

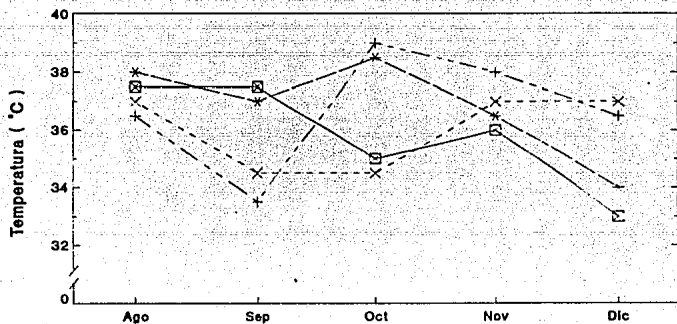


Figura 13. Marcha de las temperaturas máximas mensuales para las laderas: norte (◻), este (x), sur (+) y oeste (-).

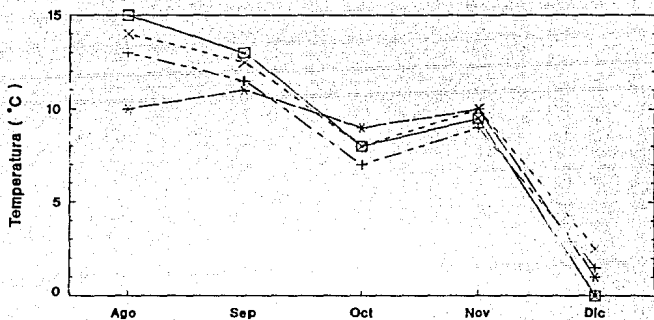


Figura 14. Marcha de las temperaturas mínimas mensuales para las laderas: norte (□), este (·), sur (+) y oeste (\*).

## DISCUSION

El modelo de radiación utilizado en este trabajo fue comparado contra mediciones climatológicas hechas en una zona plana y en declives con orientación hacia los cuatro puntos cardinales. El modelo resultó ser una valiosa herramienta para estimar variaciones de la radiación solar directa en el tiempo y en el espacio. Sin embargo hay que tomar en cuenta ciertas limitaciones del modelo: a) no considera a las radiaciones difusa y reflejada, b) no considera ciertos factores que atenúan la transmitancia, como la cantidad y tipo de nubes (Haurwitz 1948), la humedad atmosférica (McDonald 1960) y los efectos de sombra producidos por la topografía o la vegetación cercana al lugar.

Algunos de estos factores pueden ser incorporados al modelo utilizado, como lo ha propuesto Nunez (1980). Sin embargo, parece no ser necesaria esta incorporación ya que varios de los factores anteriores afectan mínimamente al sitio de estudio o no tienen relevancia en este trabajo. La radiación difusa, provoca efectos menores en las variaciones de la radiación debidas a la orientación y ángulo de las laderas (Williams et al. 1972). La nubosidad se discute más adelante.

Según García (1986), las curvas de insolación anual sobre zonas planas pueden clasificarse en tres categorías:

a) La intertropical o de bajas latitudes, comprendidas entre el Trópico de Cancer y el Trópico de Capricornio, cuya insolación es alta y experimenta pocas variaciones durante el año.

b) El tipo de curva de las latitudes medias con un solo máximo y un solo mínimo.

c) El tipo de curva polar, presente dentro de los círculos polares Artico y Antártico, con solo un máximo de insolación y varios meses al año sin radiación.

En la figura 2 se presentan las simulaciones de la cantidad de radiación recibida sobre las laderas orientadas hacia los cuatro puntos cardinales y con 20° de inclinación. Las figuras 2a, b y c corresponden a simulaciones de latitudes tropicales, en las gráficas que se obtienen se ven claramente los cruces que experimentan las curvas de radiación correspondientes a las distintas laderas. En contraste, en las latitudes extratropicales (Figura 2d, e y f) los cruces ya no se presentan y siempre habrá una ladera que reciba más radiación durante todo el año: aquella que esté orientada hacia el Ecuador.

Los cruces que presentan las curvas de radiación, han sido poco estudiados, debido a que la mayoría de los trabajos que versan sobre el tema han sido realizados en latitudes medias, y en los pocos trabajos realizados en las latitudes intertropicales, estos cruces no parecen tener mucha importancia por las características climáticas y topográficas presentes en los sitios estudiados (Smith 1977, Kirkpatrick et al. 1988). Sin embargo en el presente trabajo, la distribución peculiar de la radiación en las regiones montañosas tropicales, resultó ser el generador de distintos microclimas.

Las condiciones de aridez y la alta estacionalidad de las

lluvias aunadas al patrón de radiación, son las condiciones básicas que conforman los principales microambientes presentes en la zona de estudio. En áreas con la misma latitud pero con mayor precipitación, la influencia de la radiación solar sobre la evaporación y la transpiración perdería de alguna forma su importancia, ya que al no haber déficit de agua las diferencias en la radiación solar prácticamente no afectarían la disponibilidad potencial de agua.

En la Figura 15 se puede observar la cantidad de radiación y precipitación recibida sobre las laderas. La conjunción de la precipitación, en verano y el cruce de las curvas de radiación en esta misma época son la parte medular del estudio ya que buena parte de los eventos biológicos en los desiertos ocurren gracias a la disponibilidad de agua y esta última depende tanto de la precipitación como de la radiación.

La ladera sur en la época de lluvias (jun-sep) presenta el microambiente que dispone de mayor cantidad de agua debido a la merma que presenta en la radiación recibida durante esa época del año, dando lugar a una disminución en las tasas de transpiración y evaporación (Abd El Rahman y Batanouny 1965). En contraste, la ladera norte será la ladera que presente el microambiente con menor cantidad de agua disponible debido a su alta radiación.

Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la cantidad de agua disponible para la vegetación no sólo depende de la insolación y del aumento en la temperatura que ésta produce, sino de una amplia variedad de factores como son la duración y frecuencia de



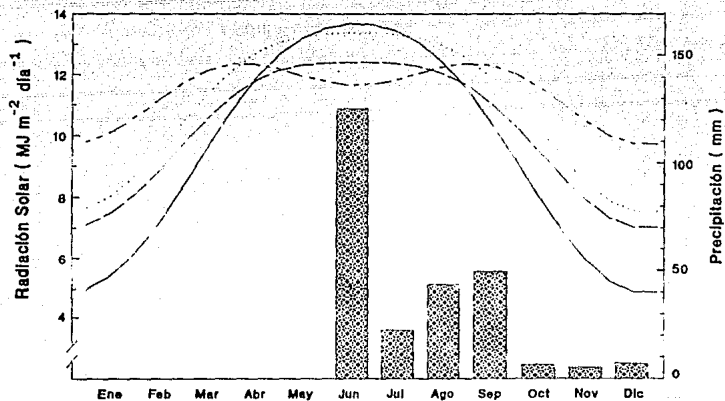


Figura 15. Cantidad de precipitación y radiación solar directa recibida sobre laderas situadas al norte (—), este-oeste (---), sur (- - -) y cima ( ····) en la zona de estudio.

los episodios de lluvia, la humedad relativa, el viento, la captación del suelo, el desagüe, la intercepción por el dosel, la abertura de los estomas de cada especie y el sistema radicular de éstas (Noy-Meir 1973).

La evaporación que presentan las distintas laderas (Figura 3) tiene un patrón que se comportó como lo esperado si se compara con los resultados obtenidos en la simulación de la radiación (Figura 1). Las laderas norte, sur y la cima experimentaron los mismos cruces en los valores de evaporación, en cambio, las laderas este y oeste (que recibieron la misma cantidad de radiación) tuvieron un comportamiento distinto pero paralelo, como si alguna de ellas o ambas se viese afectada por una constante no considerada. La ladera este, a pesar de haber recibido la misma cantidad de radiación que la ladera oeste, registró mayor evaporación que la ladera oeste. La mayor evaporación registrada para la ladera este, se puede deber a una mayor acumulación de calor por inercia térmica. En la figura 12 (g-i) se compararon las temperaturas superficiales de las laderas este y oeste, en particular en (h), la diferencia entre el calor acumulado durante el día (área bajo la curva) es muy notoria, siendo en la ladera este mayor que en la oeste. Por lo tanto, la inercia térmica puede ser una explicación a la mayor evaporación registrada en la ladera este. Además, no se debe descartar la acción de los vientos. Los vientos que inciden sobre el valle provienen principalmente del Golfo de México. Estos vientos al pasar por la Sierra Madre Oriental pierden su humedad y continúan

luego su trayectoria llegando secos y calientes sobre las laderas de la zona que "miran" hacia esta dirección.

La menor evaporación registrada para la ladera oeste se puede deber a la menor cantidad de calor que esta pendiente acumula durante el día y, al menos para los cuatro primeros meses del estudio, también se puede deber al efecto de sombra que producen las nubes al formarse en la tarde debido al carácter convectivo de las lluvias en esta región (García y Vidal 1981).

Smith (1977) trabajando en Papua, Nueva Guinea (5°47'S) registró microambientes muy distintos en las laderas este y oeste por diferencias en la insolación debidas a mañanas despejadas comúnmente seguidas de tardes nubladas.

Con todo lo anterior se ve que las laderas norte y este presentan el mayor déficit de agua mientras que las laderas sur y oeste son las que disponen de más agua durante las lluvias. Se podría pensar entonces que la orientación noreste, al menos para la época de crecimiento de la vegetación, es la que presenta mayor estrés hídrico (por la combinación de alta radiación y vientos secos), mientras que su opuesta, la ladera suroeste es la más favorecida (por recibir menos radiación y presentar tardes nubladas).

Las temperaturas máximas mensuales (Figura 13) presentaron también los cruces de sus valores entre las distintas laderas. En particular, el cruce más notorio, por ser el más drástico, fue el que presentaron las laderas norte y sur. El cruce entre estas dos laderas ocurrió un poco después respecto a la marcha de la

insolación. Esto se puede explicar en términos de inercia térmica estacional. García (1986) menciona que el calor recibido sobre la Tierra es mayor al irradiado, aún después de disminuir la cantidad de insolación, y no es hasta que ambas energías se igualan que comienza a haber enfriamiento. Este razonamiento también puede ser útil para explicar el desfaseamiento que presentó la evaporación respecto a la insolación.

Las temperaturas mínimas no muestran diferencias apreciables entre laderas, al parecer no dependen del patrón de insolación ya que se presentan durante la madrugada (García 1986).

En relación a los perfiles térmicos sería útil explicar ciertos comportamientos generales reflejados en los resultados. El perfil térmico realizado en septiembre (Figura 9b, 10b y 11b) fue considerablemente más frío comparado con los de junio y diciembre. Es importante agregar que la nubosidad (calculada con mediciones en el campo) para el 24 de septiembre fue en promedio de 90%, el 25 de junio de 65% y el 20 de diciembre se encontraba completamente despejado. La nubosidad claramente influyó sobre la cantidad de radiación recibida y a su vez sobre la temperatura, esta última disminuyó en la superficie y se homogeneizó en el aire.

Los perfiles realizados en diciembre mostraron de manera más contrastante el cambio en la temperatura respecto a la altura y entre laderas. Por ejemplo, en la figura 10c, la ladera sur alcanzó 40°C en la superficie, mientras que a 2 m de altura fue de 26°C, 14°C menos que en la superficie. Las diferencias más

grandes en temperaturas fueron registradas dentro de los primeros 10 cm. A los 2 m de altura se registraron las temperaturas más bajas y homogéneas entre laderas.

### **Vegetación y microclima**

Las variaciones diarias y estacionales de la radiación solar recibida en cualquier punto de la superficie de la Tierra, están altamente correlacionadas con la disponibilidad de agua, la temperatura, la humedad y la intensidad de luz. Todos estos factores, incluyendo las condiciones edáficas, influyen sobre la vegetación.

En los trabajos citados (en la introducción) se puede ver claramente la relación entre la variación de la vegetación y la variable simple, la radiación solar anual. Esto hace pensar que el grado de insolación se puede usar como un predictor general de los tipos de vegetación al menos para zonas áridas, ya que en áreas de alta precipitación perdería de alguna manera su importancia.

Varios de los trabajos que versan sobre el tema han querido concluir diciendo que la vegetación de las regiones montañosas presenta diferencias que dependen de la orientación de la ladera donde se encuentren y que estas diferencias son mínimas o no se presentan dentro de los trópicos. Dicha afirmación debe tomarse con más cuidado considerando los resultados de este trabajo y de otros realizados también en latitudes intertropicales dado que muestran lo contrario. Es verdad que en las latitudes medias

podemos encontrar los microambientes más contrastantes debido a la incidencia de la radiación solar, pero esto no es una razón suficiente para concluir que estos contrastes no suceden en los trópicos. De hecho, los procesos microclimáticos en los trópicos parecen ser incluso más complejos debido a los cruces que experimentan las curvas de radiación de las laderas.

En el área de estudio no parece ser posible dividir a la vegetación en xérica y mélica como lo reportado en trabajos realizados en las latitudes medias. En Zapotitlán, más que hablar entonces de tipos de vegetación confinados a alguna ladera en especial, sería más adecuado hablar de laderas más o menos propicias dependiendo del evento biológico, especie o forma de vida.

Noy-Meir (1973) menciona que cuando las lluvias ocurren en la temporada calurosa, la temperatura y la humedad del suelo son óptimos, lo que provoca pulsos rápidos de crecimiento de las plantas. Al parecer la productividad primaria no se ve afectada por las altas temperaturas siempre que exista suficiente humedad. Existe más humedad en aquellos lugares en donde haya menos radiación y en donde la velocidad del viento sea menor. Esto puede darse en las laderas menos insoladas o donde la cubierta vegetal es mayor, por la reducción en la tasa de evaporación que presentan estos sitios.

Las temperaturas superficiales en la zona de estudio nunca superaron los 40°C, por lo que al parecer la temperatura no es un elemento que directamente afecte eventos como germinación,

supervivencia y establecimiento de plántulas. Bates (1923) habla de temperaturas superficiales superiores a los 60°C que afectan la germinación y el desarrollo de las plántulas. Nobel *et al.* (1986), trabajando en el Desierto de Chihuahua, reportan temperaturas superficiales que alcanzan los 70°C y que afectan definitivamente la germinación.

Por lo tanto el punto a considerar de manera directa sería la disponibilidad de agua. La ladera sur, a pesar de recibir mayor radiación en promedio a lo largo del año, en la época de crecimiento es la ladera que recibe menor radiación por lo que tiene la tasa de evaporación y las temperaturas superficiales más bajas, de ahí que esta ladera presente el microambiente más propicio para el desarrollo de la vegetación por su mayor disponibilidad de agua. Lo contrario ocurre en la ladera opuesta (ladera norte), ya que al recibir mayor radiación en esta época del año la disponibilidad de agua es menor y las especies que se puedan establecer con mayor éxito serán las que tengan una pronta germinación y un inmediato enraizamiento profundo.

En la ladera este la vegetación también encontrará un ambiente desfavorable debido a la inercia térmica y a la alta fuerza evaporativa del viento que incide sobre esta orientación de ladera.

La ladera oeste en cambio, presenta un microambiente muy propicio para la vegetación ya que recibe la menor evaporación en promedio, presumiblemente debido a la nubosidad presente durante las tardes en la época de lluvias y por ser la ladera más

protegida de los vientos.

Por otro lado en la zona de estudio no podemos hablar de efectos destructivos sobre la vegetación debido al congelamiento como ocurre en otros desiertos, a pesar de haber tenido un registro mínimo mensual de 0°C en diciembre.

En Zapotitlán se han desarrollado varios trabajos de carácter ecológico y algunos de los realizados recientemente se podrían enriquecer al ser analizados a la luz de los datos microclimáticos obtenidos en el presente trabajo.

Valiente-Banuet (1991) reúne tres trabajos realizados en la zona, donde el tema central es el establecimiento de especies vegetales en comunidades regidas por el proceso conocido como nodricismo, provocado principalmente por las inclemencias del ambiente físico presente en las zonas áridas.

El primer artículo, es un estudio sobre el establecimiento de cinco especies de cactus. Estos cactus resultaron encontrarse significativamente debajo de arbustos. Las especies no mostraron una tendencia clara en su distribución debajo de la nodriza, aunque una de ellas, Coryphanta pallida se ubicaba preferentemente hacia el norte y oeste. Esto se puede explicar quizá en términos microclimáticos debido a que la orientación norte de cualquier cuerpo en la zona de estudio recibe en promedio la menor cantidad de radiación a lo largo del año.

En el segundo artículo, se estudia la interacción entre el cactus Neobuxbaumia tetetzo y la nodriza Mimosa luisana. Dentro de las conclusiones del autor tenemos que N. tetetzo se



desarrolla debajo de M. luisana debido principalmente al microambiente que se genera bajo la sombra de la copa de esta planta. Esta protección representa una disminución en el rigor de algunos factores físicos, como son la radiación solar directa, la temperatura y la evaporación.

Desde el punto de vista microclimático las temperaturas superficiales registradas en la zona están dentro de los límites de tolerancia para el desarrollo de la mayoría de las especies presentes en la zona, esto hace suponer que el reclutamiento se deba no sólo a la protección de la insolación sino también a otras causas como una mayor disponibilidad de agua debajo de las plantas.

En el tercer trabajo se hizo un experimento en el campo sobre germinación y sobrevivencia de cohortes, en diferentes condiciones ambientales con el fin de determinar los mecanismos asociados al establecimiento de N. tetetzo por debajo del dosel de M. luisana. Los tratamientos del experimento consistieron en tres niveles de radiación (suelo desnudo, sombra homogénea artificial y sombra producida por M. luisana), dos niveles de depredación (exclusión y no exclusión de depredadores), y cuatro orientaciones de ladera (norte, este, sur y oeste).

La germinación de semillas fue más baja en espacios abiertos y al final del experimento sólo había individuos vivos en los tratamientos con sombra. La exclusión de depredadores aumentó significativamente el establecimiento de plántulas. Los resultados sugirieron que la interacción entre estas dos especies

se debe a la menor radiación que recibe N. tetetzo bajo la sombra de M. luisana, aunado a la disminución de temperatura y menor tasa de evaporación. Los factores que resultaron entonces más significativos fueron la depredación y la radiación.

La pendiente que resultó más favorable fue la ladera sur. Esto se puede explicar en términos microclimáticos debido a que esta ladera recibe menos radiación durante el verano, época durante la cual transcurrieron las primeras semanas del experimento, sin olvidar que de manera natural es cuando ocurre la dehiscencia de los frutos del cacto, seguido de la temporada de lluvias encontrando así las semillas en esta ladera el microambiente más propicio para la germinación y el establecimiento. Después de dos años fueron más las plántulas que sobrevivieron en las laderas sur y oeste, que son las pendientes más favorables en terminos microclimáticos si se observan los resultados obtenidos en el presente estudio. Sin embargo lo anterior debe tomarse con precaución ya que no se cuenta con datos estadísticos que afirmen estos resultados por el número tan reducido de individuos que sobrevivieron al finalizar el experimento citado.

En otro estudio sobre los efectos dependientes de la densidad en Neobuxbaumia tetetzo (Díaz 1991), se consideraron dos orientaciones de ladera, la pendiente norte y la pendiente sur, que en términos de radiación son las más contrastantes. Analizando la densidad poblacional y la estructura de tamaños entre las dos laderas, el autor no encontró una diferencia en la

estructura de tamaños. Sin embargo encontró una marcada disimilitud en las densidades de las categorías por debajo de los 60 cm y para los intervalos restantes, aunque no tan marcada. Las densidades fueron consistentemente mayores en la ladera sur. Estas diferencias en las densidades se pueden explicar en términos microclimáticos como ya sugiere Díaz (1991).

La ladera sur al ser la que recibe la menor cantidad de radiación justo durante la época de lluvias, representa el microambiente más favorable en términos de balance hídrico y temperaturas, en contraste con la ladera norte que es la más insolada en esta misma época del año. La ladera sur entonces presenta un superávit hídrico y por lo tanto un microambiente más benigno para la germinación y el establecimiento de las plántulas.

Por otro lado, Díaz (1991), al estudiar el efecto de la vecindad sobre el crecimiento, concluyó y aportó más evidencias de la respuesta biológica ante el microclima: "El factor que mayor influencia ejerce en el crecimiento de Neobuxbaumia tetetzo es la orientación de la pendiente sobre la cual medran los individuos. Este hecho es muy notorio ya que en las pendientes que miran al sur los incrementos en altura llegan a duplicar los valores máximos alcanzados por los individuos en la pendiente norte."

H. Nuñez (en preparación) en su trabajo sobre crecimiento de Neobuxbaumia tetetzo, midió el incremento anual en la altura de individuos de diferentes tallas creciendo en laderas con

orientación hacia los cuatro puntos cardinales. Los resultados mostraron que los individuos de N. tetetzo ubicados en las laderas sur y oeste presentaron un incremento significativamente mayor comparados con aquellos individuos confinados en las laderas norte y este.

Por otro lado, en ese mismo trabajo, quedó una evidencia más de la importancia del agua en las zonas áridas, dado que los incrementos más importantes en la altura de los individuos estudiados, se dieron en el período de lluvias.

Los resultados de Nuñez (en preparación) pueden tener como causa principal las diferencias microclimáticas presentes en las distintas laderas. Las laderas que presentaron los incrementos mayores en altura de N. tetetzo corresponden a las laderas con los microclimas más favorables (menor evaporación potencial de agua y menores temperaturas) durante la época de crecimiento y viceversa.

Las evidencias anteriores sugieren que para tener una mejor comprensión de los procesos biológicos originados por las diferencias microclimáticas, los datos del medio ambiente necesitan ser analizados durante todas las fases de los ciclos de vida de las plantas que se desarrollan en las laderas con diferente exposición.

## CONCLUSIONES

- 1) El modelo de radiación utilizado es una valiosa herramienta para predecir las variaciones microclimáticas que ocurren debido a la variación diaria y estacional de la radiación y la causada por las diferencias en la topografía del terreno.
- 2) La variación de la incidencia de la radiación sobre las distintas laderas está altamente correlacionada con la evaporación del agua y el comportamiento de la temperatura.
- 3) La zona de estudio presenta claras diferencias microclimáticas entre laderas. Las pendientes sur y oeste presentaron menor evaporación durante la época de lluvias, de ahí que se puedan considerar como los microambientes más favorables para el establecimiento y desarrollo de la vegetación. Las pendientes norte y este son las que presentan mayor evaporación durante el verano y esto las convierte en los sitios con mayor estrés hídrico.
- 4) Los factores directos responsables de las diferencias microclimáticas son en primer lugar la radiación seguida posiblemente de la nubosidad y los vientos.
- 5) Al parecer la temperatura en general es un factor que influye en menor grado en el establecimiento y desarrollo de la vegetación, debido a que los registros obtenidos están lejos de los límites de tolerancia de las plantas.
- 6) La respuesta de la vegetación a las variaciones en la incidencia de la radiación solar puede ser razonablemente

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

predecible conociendo la ubicación y topografía del lugar, así como el régimen de las lluvias y de las temperaturas.

7) Las diferencias en la vegetación reportadas en los trabajos realizados en el sitio tienen como responsable principal a los distintos microclimas presentes en la zona de estudio.

8) Una mejor comprensión de los procesos biológicos que ocurren en la zona de estudio puede lograrse si se consideran las diferencias microclimáticas presentes en ésta.

## REFERENCIAS

- Abd El Rahman A.A. y Batanouny K.H. 1965. Transpiration of desert plants under diferent enviromental conditions. J. Ecol. 53: 267-272.
- Bates C.G. 1923. The transect of a mountain valley. Ecology 4: 54-62.
- Briones V.O., Escurra E., García-Oliva F., López-Portillo G., Rosas M. y Valiente-Vanuet A. 1989. Patrones geográficos de diversidad y termorregulación en las cactáceas columnares de México. Simposio sobre diversidad biológica en México, Oaxtepec Mor. México.
- Brown G.W. (Ed.) 1974. Desert Biology Vol. II. Academic Press. New York & London p. 257-259.
- Cantlon J.E. 1953. Vegetation and microclimates on north and south slopes of Cushtunk mountain, New Jersey. Ecol. Monog. 23: 241-270.
- Díaz P.G. 1991. Efectos dependientes de la densidad en una cactácea columnar [*Neobuxbaumia tetetzo* (Coulter) Backeberg] del valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla. Tesis de licenciatura, Facultad de ciencias, UNAM.
- Cottle H.J. 1932. Vegetation on north and south slopes of mountains in southwestern Texas. Ecology 13: 121-134.
- Ehleringer J.R., Mooney H.A., Gulmon S.L. y Rundel P. 1980. Orientation and its consequences for Copiapoa (Cactaceae) in Atacama Desert. Oecologia (Berl.) 46: 63-67.
- Escurra E., Montaña C. y Arizaga S. 1991. Architecture, light intercepcion, and distribution of Larrea species in the Monte Desert, Argentina. Ecology 72(1): 23-34.
- Gail F.W. 1921. Factors controlling the distribution of Douglas fir in semi-arid regions of the northwest. Ecology 2: 281-291.
- García E. 1981. Modificaciones al sistema de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Offset Larios. 3ªed. México D.F., 217pp.
- García E. 1986. Apuntes de climatología. Offset Larios. 5ª ed. México D.F., 155pp.

- García E. y Vidal R. 1981. La tendencia en la precipitación en la parte central de México en los últimos 50 años. Biotica 6(1): 103-115.
- 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 del Instituto de Geografía. 23: 53-70.
- Garnier B.J. y Ohmura A. 1968. A method of calculating the direct shortwave radiation income of slopes. J. Appl. Meteor. 7: 796-800.
- Gates D.M. 1980. Biophysical ecology. Springer-Verlag. New York, N.Y., USA.
- Geller G.N. y Nobel P.S. 1986. Branching patterns of columnar cacti: Influences on PAR interception and CO<sub>2</sub> uptake. Amer. J. Bot. 73(8): 1193-1200.
- Geller G.N. y Nobel P.S. 1987. Comparative cactus architecture and PAR interception. Amer. J. Bot. 74: 998-1005.
- Haurwitz B. 1948. Insolation in relation to cloud type. J. Meteorol. 5: 110-113.
- Herbert T.J. 1983. On the relationship between interception of direct solar radiation by cactus bodies and plant leaves. J. theor. Biol. 105: 619-629.
- Holland P.G. y Steyn D.G. 1975. Vegetational responses to latitudinal variations in slope angle and aspect. J. Biogeog. 2: 179-183.
- Houghton H.G. 1954. On the annual heat balance of the northern hemisphere. J. Meteorol. 11: 1-9.
- Johnson F.S. 1954. The solar constant. J. Meteorol. 11(6): 431-439.
- McAuliffe J.R. 1984. Sahuaro-nurse tree associations in the Sonoran Desert: Competitive effects of sahuaros. Oecologia 64: 319-321.
- McDonald J.E. 1960. Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor. J. Meteorol. 17: 319-328.
- Monteith J.L. y Undsworth M.H. 1990. Principles of environmental physics. Ed. E. Arnold. London. p. 25-73.



Nobel P.S. 1980. Morphology, surface temperatures, and northern limits of columnar cacti in the Sonoran Desert. Ecology 61(1): 1-7.

Nobel P.S. 1981. Influences of photosynthetically active radiation on cladode orientation, stem tilting, and height of cacti. Ecology 62(4): 982-990.

Nobel P.S., Geller G.N. Kee S.C. y Zimmerman A.D. 1986. Temperatures and thermal tolerances for cacti exposed to high temperatures near the soil surface. Plant, Cell and Environment 6: 279-287.

Nobel P.S., Loik M.E. y Meyer R.W. 1991. Microhabitat and diel tissue acidity changes for two sympatric cactus species differing in growth habit. J. Ecol. 79: 167-182.

Noy-Meir I. 1973. Desert ecosystems: environment and producers. Ann. Rev. Ecol. Syst. 4: 25-51.

Nunez M. 1980. The calculation of solar and net radiation in mountainous terrain. J. Biogeog. 7: 173-186.

Potzger J.E. 1935. Microclimate and a notable case of its influence on a ridge in central Indiana. Ecology 20: 29-37.

Kirkpatrick J. B. y Nunez M. 1980. Vegetation-radiation relationships in mountainous terrain: eucalypt-dominated vegetation in the Ridson Hills, Tasmania. J. Biogeog. 7: 197-208.

Kirkpatrick J.B., Fensham R.J., Nunez M. y Bowman D.M.J.S. 1988. Vegetation-radiation relationships in the wet-dry tropics: granite hills in northern Australia. Vegetatio 76: 103-112.

Revfiem K.J.A. 1976. Solar radiation at a site of known orientation on the earth's surface. J. Appl. Meteorol. 15: 651-656.

Ross J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk, The Hague, The Netherlands.

Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México. 432pp.

Shanks R.E. y Norris F.H. 1950. Microclimatic variations in a small valley in eastern Tennessee. Ecology 31: 532-539.

Shreve F. 1922. Conditions indirectly affecting vertical distribution on desert mountains. Ecology 3(4): 269-274.

Shreve F. 1924. Soil temperature as influenced by altitude and slope exposure. Ecology 5(2): 128-136.

- Shreve F. 1927a. The vegetation of a costal mountain range. Ecology 8(1): 27-44.
- Shreve F. 1927b. The physical conditions of a costal mountain range. Ecology 8(4): 398-414.
- Shreve F. 1931. Physical conditions in sun and shade. Ecology 12(1): 96-104.
- Smith J.M.B. 1977. Vegetation and microclimate of east and west facing slopes in the grasslands of Mt Wilhelm, Papua New Guinea. J. Ecol. 65: 39-53.
- Smith E.C. 1965. Flora, Tehuacan Valley. Fieldiana, Bot. 31: 101-143.
- Valiente-Banuet A. 1991. Dinámica del establecimiento de cactáceas: Patrones generales y consecuencia de los procesos de facilitación por plantas nodriza en desiertos. Tesis doctoral, Centro de Ecología, UNAM.
- Valiente L. 1991. Patrones de precipitación en el Valle semiárido de Tehuacán, Puebla. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Villaseñor J.L., Dávila P. y Chiang F. 1990. Fitogeografía del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Bol. Soc. Bot. México 50: 135-149.
- Williams L.D., Barry R.G. y Andrews J.T. 1972. Application of computed global radiation for areas of high relief. J. Appl. Meteorol. 11: 526-533.
- Yeaton R.I. 1978. A ciclical relationship between Larrea tridentata and Opuntia leptocaulis in the northern Chihuahuan Desert. J. Ecol. 66: 651-656.
- Zavala J.A. 1982. Estudios ecológicos en el valle semiárido de Zapotitlán de las Salinas, Puebla. I. Clasificación numérica de la vegetación basada en atributos binarios de presencia o ausencia de las especies. Biótica 7(1): 99-120.