

11911  
265



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DE LA FORMA DE LA PENDIENTE EN LAS PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO Y SU CAPACIDAD DE RETENCION DE AGUA, EN UNA CUENCA TROPICAL ESTACIONAL

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

LICENCIATURA EN GEOGRAFIA

P R E S E N T A :

LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO

DIRECTOR DE TESIS: DR. FELIPE GARCIA OLIVA

MEXICO, D. F.



OCTUBRE DE 1992

TESIS CON 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.

## CONTENIDO

RESUMEN	Pág.
INTRODUCCION	1
SITIO DE TRABAJO	7
CAPITULO 1.- CARACTERIZACION DEL RELIEVE EN UNA CUENCA TROPICAL ESTACIONAL: CUENCA 1	17
CAPITULO 2.- DISTRIBUCION DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS SUELOS AL INTERIOR DE UNA CUENCA, EN RELACION A LA CARACTERIZACION DEL RELIEVE.	51
CAPITULO 3.- INFLUENCIA DEL RELIEVE EN LA INCIDENCIA DE RAYOS SOLARES, HUMEDAD Y VEGETACION EN UNA CUENCA TROPICAL ESTACIONAL.	91
CONCLUSIONES	115

## RESUMEN

El estudio se llevó a cabo en la Estación de Biología de Chamela en el Estado de Jalisco. La zona es una selva baja caducifolia y con marcada estacionalidad de la precipitación.

El presente trabajo describe la heterogeneidad morfológica del relieve y su influencia en la distribución de las características físicas del suelo. El arreglo espacial del relieve evidencia la alternancia de procesos, es decir existe una dinámica y una distribución diferencial de los procesos que en ella se dan (movimiento de agua, procesos de erosión-depositación, almacenamiento de agua de el suelo, contenido de nutrientes y distribución de la incidencia de radiación solar), modificados por las características del relieve (geometría de la ladera).

En función de la morfología se definieron 14 unidades de ladera en la cuenca. De las mismas se encontraron que se encuentran agrupadas en cinco tipos de curvatura: i) Cóncavo-convexas, ii) convexas con marcada inclinación de pendiente, iii) convexas con baja inclinación de pendientes, iv) lineal-convexas y v) lineales.

La variabilidad morfológica al interior de cada unidad de ladera es el resultado de los rompimientos de pendiente. En al número de rompimientos de pendiente, se encontraron unidades de ladera homogéneas y heterogéneas.

Se definió la configuración de la red de drenaje de la cuenca. La cuenca fue de tercer orden, se identificaron 18 subcuencas (9 de primer orden y 8 de segundo orden).

Existe influencia de la curvatura, inclinación de la pendiente, longitud y rompimientos de pendiente en la distribución de las propiedades físicas de los suelos. Por lo tanto existen tres tipos de variación: a) en la distribución, b) variabilidad entre unidades de ladera y c) al interior de la unidad de ladera. Las propiedades físicas que el relieve influyo en su distribución fueron la profundidad, los contenidos de arenas, arcillas y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Por el contrario, la materia orgánica y el pH, presentaron una distribución heterogénea y su distribución fue determinada por factores bióticos. En la zona alta de la cuenca (laderas homogéneas) existe la mayor profundidad, mayor contenido de arcillas y mayor capacidad de retención. En la parte baja de la cuenca (laderas con mayor inclinación) existe menor profundidad, menor contenido de arcillas y menor capacidad de retención de agua en el suelo.

Se encontró que existe una distribución heterogénea temporal y espacial de la incidencia de rayos solares dentro de la cuenca por efecto del relieve y la orientación. La mayor incidencia de rayos solares se presentó en los meses de julio y agosto, por el contrario, los meses con menos incidencia de rayos solares se presentaron en los meses de diciembre y enero. La distribución de los de rayos solares en función a la orientación, fue mayor en la porción sur, que en la porción norte. La incidencia de rayos solares se vio modificada por la inclinación de la pendiente, en zonas de baja inclinación de pendiente la incidencia fue mayor independientemente de la orientación y de la latitud, por el contrario, en zonas con marcada inclinación de la pendiente la incidencia de rayos fue menor. La interrelación de la geometría del

relieve, la configuración de la red de drenaje, la incidencia de rayos solares y las características físicas de los suelos determinan la distribución del porcentaje de humedad. De la distribución de la humedad, se encuentra que también existe una distribución espacial heterogénea, en la porción baja de la cuenca (mayor inclinación de pendiente, suelos más arenosos y menor capacidad de retención), existe mayor porcentaje de humedad con respecto a la porción alta (laderas con menor inclinación de la pendiente, suelos más profundos, mayor porcentaje de arcillas y mayor capacidad de retención) y mayor porcentaje de humedad en norte que sur.

## **INTRODUCCION**

## LISTA DE FIGURAS

### SITIO DE TRABAJO

Figura 1.- Localización de Chamela, Jalisco.

### CARACTERIZACION DEL RELIEVE EN UNA CUENCA TROPICAL ESTACIONAL

Figura 1.- Mapa de clases de altitud.

Figura 2.- Mapa de clases de pendientes.

Figura 3.- Mapa de orientación.

Figura 4.- Distribución de clases de pendiente con el factor orientación.

Figura 5.- Distribución de las clases de pendiente con el factor escalonamiento.

Figura 6.- Distribución de las clases de pendiente con los factores orientación y escalonamiento.

Figura 7.- Mapa de relieve sombreado.

Figura 8.- Perfiles topográficos de las unidades de ladera (14).

Figura 9.- Distribución de las clases de pendiente con el factor unidad de ladera.

Figura 10.- Mapa de la red de drenaje.

### DISTRIBUCION DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS SUELOS AL INTERIOR DE UNA CUENCA EN RELACION A LA CARACTERIZACION DEL RELIEVE.

Figura 1.- Mapa de isolíneas de la profundidad del suelo.

Figura 2.- Mapa de isolíneas del porcentaje de arenas.

Figura 3.- Mapa de isolíneas del porcentaje de arcillas.

Figura 4.- Mapa de isolíneas del porcentaje de limos.

Figura 5.- Mapa de isolíneas de la capacidad de retención.

Figura 6.- Mapa de isolíneas del porcentaje de la materia orgánica.

Figura 7.- Mapa de isolíneas de la densidad aparente.

Figura 8.- Variabilidad y distribución de las características físicas de los suelos en un sistema de ladera.

Figura 9a.- Ordenación de las variables, serie total.

Figura 9b.- Ordenación de los perfiles, serie total.

Figura 10a.- Varianza explicada por variable, serie de 10 cm.

Figura 10b.- Ordenación de los perfiles, serie de 10 cm.

Figura 11a.- Varianza explicada por variable, serie de 20 cm.

Figura 11b.- Ordenación de los perfiles, serie de 20 cm.

Figura 12a.- Media y error estándar de la profundidad, por unidad de ladera.

Figura 12b.- Media y error estándar del porcentaje de arenas, por unidad de ladera.

Figura 13a.- Media y error estándar del porcentaje de arcillas, por unidad de ladera.

Figura 13b.- Media y error estándar de la capacidad de retención, por unidad de ladera.

**INFLUENCIA DEL RELIEVE EN LA INCIDENCIA DE RAYOS SOLARES, HUMEDAD Y VEGETACION EN UNA CUENCA TROPICAL ESTACIONAL.**

- Figura 1.-Modelo de incidencia de rayos solares.  
Figura 2a.-Radición a 19° de latitud, considerando el espacio homogéneo.  
Figura 2b.-Angulo de incidencia de rayos solares para 2° de inclinación de pendiente.  
Figura 3a.-Angulo de incidencia de rayos solares para 4° de inclinación de pendiente.  
Figura 3b.-Angulo de incidencia de rayos solares para 8° de inclinación de pendiente.  
Figura 4a.-Angulo de incidencia de rayos solares para 16° de inclinación de pendiente.  
Figura 4b.-Angulo de incidencia de rayos solares para 20° de inclinación de pendiente.  
Figura 5a.-Angulo de incidencia de rayos solares para 30° de inclinación de pendiente.  
Figura 5b.-Angulo de incidencia de rayos solares para 40° de inclinación de pendiente.  
Figura 6.-Mapa de distribución de incidencia de rayos solares dentro de la cuenca, para el 22 de marzo.  
Figura 7.-Mapa de distribución de incidencia de rayos solares dentro de la cuenca, para el 22 de septiembre.  
Figura 8.-Mapa de distribución de incidencia de rayos solares dentro de la cuenca, para el 22 de junio.  
Figura 9.-Mapa de distribución de incidencia de rayos solares dentro de la cuenca, para el 22 de diciembre.  
Figura 10a.-Distribución del porcentaje de humedad por cuadro (1989).  
Figura 10b.-Distribución del porcentaje de humedad por cuadro (1990).  
Figura 11a.-Distribución del porcentaje de humedad por orientación (1989).  
Figura 11b.-Distribución del porcentaje de humedad por orientación (1990).  
Figura 12a.-Distribución del porcentaje de humedad por profundidad (1989).  
Figura 12b.-Distribución del porcentaje de humedad por profundidad.  
Figura 13.- Distribución de la densidad de arboles al interior de la ladera para tres cuadros (alto, medio y bajo), dos orientaciones (norte y sur) y divididos en cuadros de 100 m<sup>2</sup>.



## CONSERVACION DE SUELO Y AGUA

El manejo de cuencas hidrológicas es importante para el adecuado uso del agua y suelo (Russel, 1981). El manejo del agua y su dinámica dentro de una cuenca, tiene un efecto directo en los almacenes y los flujos de agua dentro de ella. La cantidad de agua en el suelo dentro de la cuenca depende de la diferencia entre la lluvia y la evapotranspiración. A su vez la evapotranspiración depende de la vegetación, la profundidad del suelo, la capacidad de retención de agua del suelo y la superficie de escurrimiento. En regiones donde la precipitación es menor que los períodos de transpiración potencial en el año, la actividad agrícola es limitada por el déficit de agua. Un adecuado análisis de los flujos y almacenes del agua a nivel de una cuenca hidrológica, pueden permitir un manejo que minimice las demandas de evapotranspiración y aumente la cantidad de agua disponible para la agricultura (Russel, 1981).

### RELIEVE

En los modelos teóricos sobre hidrología, el espacio ha sido considerado homogéneo y estático. Sin embargo, en trabajos recientes se esta dando importancia a la influencia de la heterogeneidad espacial en la dinámica de los procesos (Forman and Godron, 1986). Una de las principales causas de la heterogeneidad es el relieve local (Forman and Godron, 1986).

Es necesario considerar a la geometría de la cuenca. La geometría de una cuenca es la mezcla de diferentes formas, longitudes y angulos de inclinación de ladera, por lo anterior el paisaje de un lugar debe ser analizado en tercera dimensión y no solamente como una sobreposición de perfiles. En dicho análisis deben considerarse las diferentes condiciones de los suelos (Johnson, 1988). La inclusión de la geometría de la cuenca, la escala y la heterogeneidad de las propiedades de los suelos, son elementos importantes, para entender los cambios hidrológicos en una cuenca (O'Loughlin, 1986). Estos elementos adquieren importancia en la conservación de suelo y agua, cuando la cuenca sea parcial o totalmente perturbada.

El manejo de una cuenca demanda por tanto la evaluación de las características topográficas, las cuales poseen una gran variabilidad a nivel cuenca, por lo que es imperativo que éstas sean estimadas en puntos y a escalas en las que puedan reflejar sus efectos sobre el contenido de humedad en el suelo y la generación de escurrimiento a nivel local y a diferentes escalas de la cuenca (Beven *et al.*, 1988). Las variables topográficas requeridas para modelar los fenómenos de escurrimiento incluyen: a) Area de contribución ladera arriba b) Pendiente y c) Orientación. Estas variables han sido usadas para diferentes aplicaciones como: a) identificación de zonas de saturación (O'Loughlin, 1988), b) identificación de zonas de erosión-depositación y c) la estimación de la radiación potencial diaria (Moore y Murch, 1990).

La geometría de la ladera modifica significativamente la humedad en el suelo, particularmente la inclinación de la pendiente modifica dicho almacenamiento afectando la velocidad de escurrimiento. En las pendientes más inclinadas el agua escurre más rápido permitiendo una menor infiltración y por lo tanto un menor almacenamiento de agua. Por el contrario, en pendientes más planas la velocidad de escurrimiento decrece permitiendo una mejor infiltración y por lo tanto una mayor cantidad de agua en el suelo.

Numerosos trabajos han demostrado que existe una gran variabilidad del contenido de humedad en el suelo al interior de una cuenca. Bajo estas observaciones se ha generalizado a las partes cóncavas como zonas húmedas y las partes convexas como zonas secas (Helvey y Patric, 1984). Es necesario mencionar que estas generalizaciones sólo son válidas para los trabajos a nivel parcela (Helvey y Patric 1984). Debido a lo anterior debe existir una sub o sobreestimación del contenido de humedad en el suelo al extrapolar estos resultados a nivel cuenca, ya que la configuración espacial del relieve promueve una distribución espacial heterogénea del contenido de humedad en el suelo (O'Loughlin, 1986).

Otro tópico del estudio de la forma de pendiente es el de conocer el efecto de la irregularidad de la pendiente en el proceso de erosión de suelos, las cuales han sido extendidas a ampliar las relaciones que existen entre la pérdida de suelos en relación con la morfología de las pendientes irregulares para detectar las fuentes del material que se erosiona (Young y Mutchler 1969).

#### CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS SUELOS

Las características físicas de los suelos varían considerablemente bajo cada forma de pendiente, lo que trae como consecuencia que exista una gran variabilidad del proceso de infiltración. De igual manera el relieve influye las rutas que toma el agua sobre la forma de pendiente bajo estudio (Young, 1969). Las características físicas del suelo dentro de una cuenca juegan un papel importante en la determinación de la capacidad de infiltración, distribución de la humedad y el contenido de nutrientes en el suelo (Leopold, 1978). Como los suelos están compuestos de partículas que varían tanto en tamaño como en la forma, se necesitan parámetros para describir su estructura, que dan una indicación de sus propiedades físicas. Las características de los suelos que producen la variabilidad en el almacenamiento de agua son: a) la textura, b) el diferente nivel de intemperismo, c) la densidad aparente, d) la densidad real y e) la porosidad (Brady, 1974).

La textura de los suelos influye la capacidad de infiltración de los suelos. La textura gruesa de los suelos como el de las arenas, permite fácilmente la infiltración, por la cantidad de poros grandes que contienen, mientras que los poros finos de las arcillas retardan la percolación, impidiendo así la entrada de agua al suelo. Si las partículas de los suelos son contenidos conjuntamente en agregados de materia orgánica y pequeñas cantidades de arcilla, el suelo podría ser poroso y de estructura

friable el cual podría permitir una rápida infiltración (Leopold, 1978).

La Densidad de volumen o densidad aparente es un parámetro para expresar el peso de un suelo. En este caso se calcula el volumen total del suelo (espacio ocupado por los sólidos y los espacios de los poros en forma conjunta). La densidad de volumen se define como la masa (o peso) de una unidad de volumen de suelo seco. Este volumen puede incluir, desde luego, tanto los sólidos como al espacio poroso (Brady, 1974).

La densidad real es un parámetro que expresa el peso del suelo en relación a la densidad de las partículas sólidas que lo constituyen. Comúnmente se define como la masa (o peso) de una unidad de volumen de sólidos del suelo y es llamada densidad de la partícula. En el sistema métrico decimal la densidad de las partículas se expresa generalmente en términos de gramos por centímetros cúbicos (Brady, 1978).

La porosidad es el espacio vacío que existe entre las partículas de un suelo, los cuales están ocupados por aire y agua. La cantidad de este espacio está determinada casi totalmente por la colocación de las partículas sólidas. Si ellas tienden a ligarse estrechamente entre sí, como en las areniscas o en suelos compactos, la porosidad total es baja. Si se colocan en agregados porosos, como en el caso frecuente de una textura media de los suelos con alto contenido de materia orgánica, el espacio de los poros será mayor por unidad de volumen (Brady, 1978).

La máxima cantidad de agua que puede ser almacenada por un suelo está determinada por su porosidad. Dentro de la condición de máximo almacenaje, se ha dicho que el suelo puede estar saturado y el contenido de humedad de saturación es igual a la porosidad (Leopold, 1978). Cuando el agua entra al suelo, una porción es almacenada dentro de sus poros aumentando así el contenido de humedad (Leopold, 1978).

Por lo tanto la capacidad de almacenamiento de agua está influida por la cantidad y tamaño de los poros en el suelo, la estabilidad de los agregados y la forma del perfil del suelo.

Los suelos con agregados estables mantienen mejor los espacios porosos que los suelos con arcillas y minerales inestables, donde el suelo tiende a tener baja capacidad de infiltración (Morgan, 1979).

La capacidad de infiltración de los suelos varía en gran medida a lo largo de un ciclo anual. Estos cambios estacionales de las características de los suelos afectan la hidrología de laderas y cuencas de drenaje (Morgan, 1979).

Al estudiar las características de las diferentes formas de humedad reconocidas en los suelos, se ha ido dando más importancia a su movimiento. Esto se debe a que el agua es un constituyente del suelo notablemente dinámico. Dos tipos de movimiento dentro del suelo han sido reconocidos: flujo saturado y flujo no saturado (Brady, 1974).

El Flujo No saturado (fenómeno de capilaridad) es cuando el agua se mueve hacia arriba, desde una lámina acuosa a través de los microporos de un suelo, este proceso es idéntico en principio al de

la elevación capilar, en dónde la adherencia y la cohesión actúan de igual forma. El fenómeno de capilaridad se inicia por la atracción de las partículas del suelo por el agua (adherencia), lo que provoca que el líquido suba alrededor de las paredes del tubo. Al mismo tiempo, debido a la atracción de las moléculas del agua entre sí (cohesión), aquella porción de líquido no afectada por la adherencia es empujada progresivamente hacia arriba, conservándose así la columna intacta (Brady, 1974).

La combinación de los factores anteriores (relieve, características físicas de los suelos y el almacenamiento de agua en el suelo), juegan un papel importante en la distribución y estructura de la vegetación.

El relieve afecta también la cantidad de radiación recibida, la cual es importante desde el punto de vista hidrológico y ecológico. Desde el punto de vista hidrológico la radiación potencial diaria esta en función de los atributos topográficos de la pendiente y la orientación, la cual tiene influencia en la demanda evaporativa dentro de una cuenca.

Es importante que en esta clase de investigaciones se tome en cuenta la heterogeneidad del paisaje, ya que influye en algunos de los componentes del ecosistema, como la vegetación y la disponibilidad de agua.

Los procesos geomorfológicos, como el movimiento de suelo y agua, por efecto de la variabilidad de las propiedades del relieve, deben incluirse en los estudios ecológicos para entender el comportamiento de los ecosistemas.

En los últimos años los estudios ecológicos han sido dirigidos a conocer los efectos de la manipulación de un factor sobre el estado de un sistema. En estos trabajos de investigación es importante tener un control sobre otros factores que pudieran afectar el estado del sistema actual. Esta nueva línea de investigación en ecología integra el estudio de ciclo de nutrientes, de flujo de energía y el ciclo de agua dentro de los ecosistemas. En México los estudios de ecosistemas son pocos e incipientes. Recientemente el Centro de Ecología de la UNAM, ha dado inicio a un proyecto que tiene como finalidad entender la estructura y el funcionamiento de un ecosistema en una Selva Baja Caducifolia en Chamela, Jalisco. El proyecto contempla tres etapas: a) El entendimiento del funcionamiento y la estructura del ecosistema, b) evaluación del impacto y de los diferentes grados de perturbación que tiene el ecosistema y c) El estudio de la capacidad y velocidad de recuperación del ecosistema. (Sarukhán y Maass, 1990).

El siguiente trabajo pretende integrarse a dicho proyecto caracterizando en una cuenca hidrológica la morfología del relieve y su influencia en la distribución de las propiedades físicas de los suelos, las cuales tienen implicaciones en el ciclo del agua y busca establecer la relación entre el ciclo del agua y el relieve.

## OBJETIVOS

### A) Objetivo General

Conocer la distribución de la humedad al interior de una cuenca hidrológica.

### B) Objetivos particulares

- a) Caracterizar el relieve de una cuenca y como afecta el arreglo espacial de las características del relieve.
- b) Conocer la variabilidad de las propiedades físicas del suelo en relación a las formas de pendiente existentes en una cuenca.
- c) Conocer la importancia de la forma de la pendiente, las características físicas de los suelos y su relación con la disponibilidad de agua en una cuenca.
- d) Conocer la importancia de la forma del relieve en la incidencia de los rayos solares en una cuenca.

La tesis está estructurada en tres capítulos, el capítulo 1 es un análisis de la configuración y variabilidad espacial de las formas del relieve al interior de la cuenca. El capítulo 2 es un análisis de la distribución y la variabilidad de las propiedades físicas de los suelos como consecuencia de la distribución de los atributos del relieve y también se analizan las consecuencias de las propiedades físicas de los suelos en la distribución de agua y nutrientes. El capítulo 3 es un estudio de la distribución de la estructura de la vegetación, como consecuencia del relieve, las propiedades físicas de los suelos, la humedad en el suelo y la radiación solar.

La tesis se estructuró en tres capítulos, ya que se plantearon tres preguntas de manera interdependiente, cada pregunta tiene diferentes objetivos, metodologías y sus propias conclusiones.

## REFERENCIAS

- Brady, N.C. 1974. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Ed. Harla. 427 pags.
- Daniels, R.B., Gillian, E., Cassel, D.K. and Nelson, L.A. 1987. Quantifying the effects of past soil erosion on soil present productivity. *J soil and Water*. 42: 183-187.
- Leopold, L. B. and T. Dunne. 1978. *Water and Environmental Planning*. Freeman and Company. 818 pgs.
- Dunne, T. and W. Dietrich. 1982. *Sediment Sources in Tropical Drainage Basins*. American Society of Agronomy.

- Forman, R. T. and Godron. 1986. **Landscape Ecology**. John Wiley and Sons. 780 pp.
- Halvey, J.D. and Patric J.H. 1984, Research on interception losses and soil moisture relationships. in Swank and Crosely (eds.) **Forest Hidrology and Ecology at Coweeta**. Springer-Verlag 129-137.
- Hewlett. 1982. **Principles of Forest Hidrology**. The University of Georgia Press. Athens, E.U.A.
- Hibbert, A. R. and C.A. Troendle. 1984, Stream Flow generation by variable source area. In Swank and Crosely (eds.). **Forest Hidrology and Ecology at Coweeta**. Springer-Verlag. 111-118.
- Morgan, R. P. C. 1979. **Soil Erosion**. Longman Group Limited London, 111 pags.
- O'Loughlin, E.M. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchment by topographic analysis. **Water Resources Research**. 122: 704-804.
- Pennock D.J. and E De Jong, 1987. The influence of slope curvature on soil erosion and deposition in Hummock terrain. **Soil Science**. vol:144 No 3:209-217.
- Pereira, C. 1981. "Land-Use Managment on tropical watersheds" In: R Lal and E. W. Russell (Ed.). **Tropical Agricultural Hydrology**. Jonh Wiley and Sons. 11-18.
- Johnson, R 1988. Putting soil movement into perspective. **J: Prod. Agric**. Vol 1, No 1, 4-12
- Russell, E.W. 1981. "Role of watershed managment for arable land-use in the tropics" In: R. Lal and E. W. Russell (Ed.). **Tropical Agricultural Hydrology**. Jonh Wiley and Sons. 3-10.
- Sarukhán, J. y J M Maass. 1990. "Bases ecológicas para un manejo sostenido de los ecosistemas en el sistema de cuencas hidrológicas". In: Leff, E.(eds.). **Medio ambiente y Desarrollo en México**. UNAM-Porrúa: 81-114.
- Young, R.A.and C.K. Mutchler. 1969. Effect of slope shape on erosion and run-off. **Am. Soc. Agr. Eng**. 12:231-239.
- Young, R.A. and C.A. Mutchler. 1969. Soil movement on irregular slopes. **Water Resource Research**. vol 5:1084-1089.

**SITIO DE TRABAJO**

## LOCALIZACION

El presente trabajo se desarrolló en la Estación de Biología Chamela (Instituto de Biología, UNAM) Estado de Jalisco, México. La Estación se localiza al suroeste de la costa del Pacífico, entre los 19° 30' y 19° 33' latitud norte y 105° 00' y 105° 05' longitud oeste (figura 1). Desde el punto de vista fisiográfico, esta zona, corresponde a la porción norte de la Sierra Madre de Sur, que se extiende de la parte occidental del estado de Jalisco, limitando al W con el océano Pacífico, al E y N con el sistema neovolcánico transversal y al sur con el Estado de Oaxaca (INEGI, 1985).

La estación tiene un área de 1600 hectáreas, y dentro de está se encuentran cinco cuencas de similar orientación, superficie y pendientes. El presente trabajo se llevo a cabo en una de las cuencas, la que llamaremos cuenca 1.

## ESTRATIGRAFIA

En esta zona afloran las rocas metamórficas más antiguas del estado, que pertenecen al período Jurásico, localizadas al sur de Puerto Vallarta, NW de Mascota, W de Talpa de Allende y NW de Tecalitlán.

En la porción occidental de ésta provincia fisiográfica, durante el cretácico superior, fue emplazado un batolito con rocas ígneas graníticas, el cual provocó grandes dislocaciones, fallas y fracturas de las rocas preexistentes. Durante el período terciario se originaron los depósitos de rocas volcánicas que cubrieron una gran parte del área y al mismo tiempo se formaron los depósitos de rocas sedimentarias continentales. En el cuaternario se formaron los suelos de deposición que se encuentran en los litorales y en los valles de esta región (INEGI, 1985).

Estas sierras contienen dos tipos de roca: granitos y rocas volcánicas con alto contenido de sílice. Las primeras son rocas ígneas formadas a partir de minerales en fusión (magma) y las segundas, son rocas lávicas formadas a partir del magma parental derramado en la superficie terrestre (INEGI, 1985).

Estas sierras están constituidas en más de la mitad de su extensión por un enorme cuerpo de granito, la emersión de estos batolitos, a lo que no sería ajeno de la placa de cocos, la cual debe haber involucrado el levantamiento simultáneo de rocas (INEGI, 1985).

Esto no excluye que la dominancia de rocas volcánicas llegue a ser absoluta en esta región. En su estado actual, el batolito integra una sierra de median. altitud en la que se han abierto valles intermontanos de disección todavía muy escasa. La sierra se levanta más o menos abruptamente del mar y presenta un desarrollo incipiente de valles y llanuras costeras. El sistema de topofomas dominantes son lomeríos y lomeríos con llanos aislados con altitudes que van de los 20 a los 180 m.s.n.m. con pendientes de 15° a 60° y con formas predominantemente convexas (INEGI, 1985).



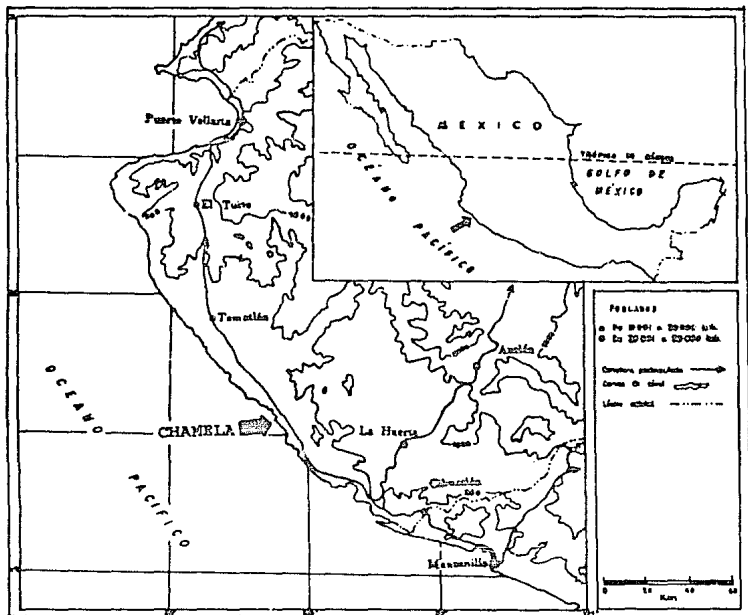


Figura 1. Mapa de localización de la Estación de Biología Chamela, Jalisco, México.

## HIDROGRAFIA

Prácticamente no existen corrientes superficiales de flujo constante, pero existe un gran número de arroyos intermitentes que sólo llevan caudal durante los grandes eventos de lluvia en el mes de septiembre.

## VEGETACION

En el área de la estación de Biología y sus alrededores existen básicamente dos tipos de vegetación dominantes, selva mediana subcaducifolia y selva baja caducifolia de acuerdo a la clasificación de Miranda y Hernández (1963).

La selva baja caducifolia es el tipo de vegetación que da la fisonomía general del área. Se establece en las laderas y partes altas de los cerros, donde los suelos son someros, pedregosos y de color pardo oscuro. La característica más importante de esta formación vegetal la constituye la pérdida de sus hojas durante la época de sequía. La selva mediana subcaducifolia está localizada en las partes bajas de los lomeríos, siguiendo el curso de los arroyos en donde los suelos son más profundos, de color oscuro y de texturas francas.

Se distinguieron tres estratos: 1) arbóreo superior de 15 a 25 m de altura; 2) arbóreo inferior de 7 a 15 m de altura y 3) herbáceo-arbustivo, que se caracteriza por presentar alturas menores a 5 metros. Las especies arbóreas más frecuentes fueron: *Thouinidium decandrum*, *Astronium graveolens*, *Brosimum allicastrum* y *Sideroxylon capiri* (Lott, 1985).

Lo más frecuente es que exista un estrato arbóreo, aunque puede haber dos. El estrato arbóreo-arbustivo es el dominante con dos alturas, un estrato entre 7 y 15 m de altura y el otro, de 4 a 8 m que algunas veces se comportó como estrato arbustivo (Solís-Magallanes, 1980). Algunas de las especies arbóreas más importantes son: *Cordia alliodora*, *Croton pseudoniveus*, *Croton sp.*, *Lonchocarpus lanceolatus*, *Trichilia trifolia*, *Thouinia arvidontata*, *Caesalpinia orioetachys*, *Amphitrygium adstringens* y *Randia thurberi* (Lott, 1985). En lugares poco perturbados el estrato herbáceo se encontró poco desarrollado y generalmente sólo se manifestó en la época de lluvias.

De las 107 familias que se registraron en la zona y sus alrededores, 29 representaron un 76.9% de las 749 especies reportadas. La familia *Leguminosae* representa el 15.3% del total con 110 especies, la familia *Euphorbiaceae* el 8.7% con 66 especies y la familia *Gramineae* un 4% con 30 especies (Lott, 1985).

## CLIMA

Según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1973), la región de la costa de Jalisco presenta un clima del tipo Aw(x) i, lo que significa que es el clima más seco de los cálidos húmedos, con regímenes de lluvia en verano y poca oscilación térmica.

La temperatura media anual fue 24.9°C. Existió una marcada estacionalidad de temperaturas medias mensuales mínimas (15 a 23°C; Bullock, 1986).

La precipitación media anual fue de 748 mm concentrándose en los meses de verano (Bullock, 1986). El patrón de lluvias fue unimodal (septiembre), con bajo nivel de precipitabilidad y con presencia de eventos erráticos debido a la influencia de los ciclones tropicales (García-Oliva *et al.*, 1991). El patrón de lluvias de la zona, tuvo una marcada influencia de la incidencia de ciclones (Tabla 1). En costa de Chamela se presentaron en promedio 5 meses húmedos. Entre estos cinco meses, tres fueron típicamente húmedos (julio, agosto y septiembre) y dos presentaron una gran variación entre años (junio y octubre) (García-Oliva *et al.* 1991).

Tabla 1. Frecuencia de ciclones en el NW del Pacífico mexicano (1953-1978) García-Oliva, 1992.

Meses	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Frec.Rel.	0.11	0.10	0.21	0.38	0.19

#### DESCRIPCION DEL SITIO DE TRABAJO A NIVEL CUENCA

##### A) Precipitación

García-Oliva (1992), encontró que existe una gran variabilidad en el número de tormentas entre los años, observó una relación positiva entre el número de tormentas y la precipitación anual. Este autor encontró que del número total de tormentas el 62% fueron menores a 8 mm aunque se presentan tormentas mayores a 60 mm. El 57% de las tormentas tuvieron una duración menor a 1.30 horas, aunque se registraron tormentas mayores a 8 horas (Tabla 2).

La variación entre los años dependió de las frecuencias mensuales de las tormentas con mayor cantidad de lluvia, ya que pocas tormentas explican el mayor porcentaje de la precipitación total. La frecuencia de las tormentas más importantes definieron el patrón de lluvias. La mayor proporción de tormentas que se presentan en Chamela, correspondió a eventos de muy poca cantidad y duración. No se encontró una relación significativa entre la intensidad y la duración. En cambio la cantidad de lluvia fue la que explicó la variación de la intensidad de lluvia. En Chamela se encontraron pocas tormentas con intensidades mayores a 25 mm h<sup>-1</sup> (13 tormentas en el período de 1982-1990). Sin embargo las tormentas más importantes son las más erosivas.

Tabla 2. Número de tormentas por año, cantidad de precipitación anual, cantidad de precipitación por tormenta, promedio mensual, porcentaje de tormentas por año y porcentaje de lluvia por año (García-Oliva, 1992)

Año	Número de tor por año	Cantidad en mm. por año	Cantidad por torm	Prom. mensual	% torm. por año	% lluvia por año
82	32	424.6	13.8	35.33	7.23	7.55
83	56	826.6	14.0	68.63	12.66	14.70
84	64	819.6	12.7	68.30	14.77	14.56
85	42	375.7	8.9	31.14	9.50	6.65
86	44	367.0	8.3	30.48	9.95	6.63
87	51	564.1	11.1	47.00	11.53	10.04
88	59	781.9	13.2	65.16	13.34	13.41
89	66	896.5	14.3	74.70	14.93	15.95
90	28	565.2	20.1	47.1	6.33	10.06

#### B) Hidrología

Durante la época de lluvias, el drenaje principal de la zona lo constituye el Arroyo Chamela, que tiene numerosos afluentes de corriente temporal y se encuentra en el nornoroeste de la estación corriendo en dirección de este-oeste. La red de drenaje de la estación está constituida por los arroyos: Colorado, Zarco y Cuestecomate.

López-Guerrero (1992), evaluó para las 5 cuencas de la Estación de Biología el promedio anual del volumen de escurrimiento, lámina de escurrimiento anual y el porcentaje de lluvia anual escurrida, los datos que se presentan son sólo para la cuenca 1 (Tabla 3).

**Tabla 3. Volumen, lámina y porcentaje de lluvia escurrida para la cuenca 1, (Lopez-Guerrero, 1992).**

Cuenca 1	Volumen (m <sup>3</sup> )	Lámina (mm)	Lluvia Escurrida (%)
Media	4520.173	30.316	3.908
Desviación Est.	6030.683	40.407	4.638

Las cuencas cinco presentaron valores bajos para los coeficientes de escurrimiento y porcentaje de lluvia anual escurrida, pero se registraron altos valores de índices de infiltración. En cambio, se encontraron diferencias del porcentaje anual de lluvia escurrida entre años, como resultado de la variabilidad de los patrones de lluvia (Tabla 4).

**Tabla 4. Porcentaje de lluvia anual escurrida, volumen y lámina de escurrimiento anual, cuenca 1 (López-Guerrero, 1992).**

Año	Volumen (m <sup>3</sup> )	Lámina mm	Lluvia Escurrida (%)	Lluvia (mm)
1983	1359.810	9.120	1.104	820.00
1984	3386.100	22.710	2.771	819.60
1985	0.000	0.000	0.000	373.70
1986	1385.158	9.290	1.729	573.30
1987	3284.717	22.030	3.905	564.10
1988	18845.002	126.390	14.854	850.90
1989	5634.499	37.790	4.215	896.50
1990	2266.089	15.198	2.689	565.20

Por otra parte no encontró correlación entre la precipitación anual y la escorrentia, debido a que la relación lluvia-escurrimiento esta determinada por los patrones de lluvia mensuales y las características de las tormentas (Tabla 5).

Tabla 5. Resumen de la distribución anual de la precipitación (PA) y la escorrentía (Qs) en Chamela Jalisco, (D.S. desviación estándar y C.V. coeficiente de variación, López-Guerrero, 1992).

Año	Número de Tormentas	(PA) (mm)	Precipitación por tormenta	Número de Qs	Qs Anual (mm)
1983	56	826.0	14.75	-	-
1984	64	819.6	12.80	5	27.35
1985	42	373.7	8.89	0	0.00
1986	44	537.3	12.21	4	8.48
1987	51	564.1	11.06	5	22.69
1988	59	850.9	14.42	6	157.50
1989	66	896.5	13.58	6	35.41
1990	28	565.2	20.18	3	22.82
Total	410	5433	-	29	274.25
Media	51.2	679.3	13.48	4.14	39.18
D.E.	12.8	191.8	3.30	2.16	53.49
C.V.	0.2	0.2	0.28	0.24	1.36

#### C) Características físicas de los suelos

García-Oliva (1992) reporta que las clases texturales en la cuenca 1 fueron predominantemente arenosas, Este autor encontró que existe un mayor contenido de arenas en pie y ladera que en cresta. También encontró que la densidad aparente en los pies de ladera es mayor que en las laderas y crestas. La densidad aparente aumentó con la profundidad.

García-Oliva (1992) reporta que la mayor concentración de materia orgánica y nutrientes se presentó en los primeros cuatro centímetros de profundidad a excepción de  $\text{Na}^+$  y P Total, ya que a esa profundidad se encontró la mayor proporción de las superficies de adsorción debido a la presencia de la materia orgánica. Los nutrientes con mayor concentración fueron:  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{PO}_4$ .

#### D) Productividad

Martínez (1990) encontró que la precipitación tuvo una marcada influencia en la productividad de este ecosistema. Se encontró diferencias en la productividad del ecosistema entre años, entre sitios y entre estaciones (seca y húmeda) (Tabla 6).

Tabla 6. Producción de hajarasca total anual ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), en relación a años, sitios y período, (Martínez-Yrizar, 1992).

Año	Humedo		Seco		Anual	
	Media	D.S.	Media	D.S.	Media	D.S.
			Valle			
77-78	2.42	0.19	4.58	0.25	7.00	0.33
78-79	2.24	0.10	4.20	0.22	6.44	0.29
79-80	2.51	0.15	4.00	0.17	6.51	0.26
80-81	2.71	0.17	4.08	0.19	6.79	0.28
81-82	2.75	0.16	3.38	0.52	6.13	0.36
Media	2.53		4.05		6.58	
C.V.	8.40		10.70		5.00	
			Ladera			
77-78	1.54	0.09	2.15	0.11	3.69	0.15
78-79	1.66	0.07	2.68	0.14	4.34	0.16
79-80	0.75	0.06	2.88	0.15	3.63	0.17
80-81	1.03	0.09	3.31	0.15	4.34	0.18
81-82	0.81	0.05	2.94	0.16	3.75	0.17
Media	1.16		2.79		3.95	
C.V.	36.10		15.20		9.10	

La cantidad de biomasa de raíces reportada por Castellanos *et al.* (1991) fue de  $30.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ . El 73% ( $22.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) fueron raíces gruesas y el 27% ( $8.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de raíces finas. Más del 62% de la biomasa de raíces se encuentra en los primeros 20 cm.

Kummerow (1990), encontró que la biomasa aérea es de  $51 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $32 \text{ Mg ha}^{-1}$  la subterránea. La distribución de las raíces finas se concentró el 50% en los primeros 10 cm y 30% en la profundidad de 10 a 20 cm. Kummerow *et al.*, (1990) encontró que en el período seco existe una biomasa de raíces muertas de  $300 \text{ g m}^{-2}$  y en el período de lluvia  $110 \text{ g m}^{-2}$ . También encontró que existieron más raíces finas en los sitios con exposición al norte que los de exposición al sur en la estación seca pero en la época lluviosa los sitios con orientación al sur tuvieron una mayor biomasa de raíces finas vivas y muertas.

Patiño, (1990) encontró que el total de mantillo por ladera fue mayor en la ladera norte ( $8687 \text{ kg ha}^{-1}$ ), que en la ladera sur ( $6597 \text{ kg ha}^{-1}$ ). También encontró que existen diferentes tasas de descomposición y de mantillo por ladera (Tabla 7).

Tabla 7. Producción de hojarasca por cuadro, y orientación en la cuenca 11 en una selva tropical estacional (Patiño, 1990).

Cuadro	Mantillo (kg ha <sup>-1</sup> )	K Norte	K Sur
Alto	4522	0.42	0.49
Medio	4174	0.28	0.49
Bajo	3952	0.40	0.52

Patiño (1990), atribuye las diferentes tasas de descomposición entre los sitios a los diferentes porcentajes de humedad. Asimismo, las diferencias entre cuadros se debe posiblemente a la diferente composición de especies y a la diferente contribución en la producción de la hojarasca, que a su vez determinaron la calidad del mantillo (Tabla 8, Perez-Jimenez, comunicación personal).



Tabla 8. Las cinco especies más importantes en cada cuadro permanente de muestreo según el índice de dominancia (I.D.), definido como el producto de la densidad, la frecuencia y el área basal de cada especie de la cuenca 1 (A. Pérez-Jiménez, com. pers.).

Especie	I.D.
Transecto Bajo	
Guapira sp.	4134.7
Plumeria rubra L.	2842.0
Lonchocarpus constrictus Pitt.	1281.3
Bursera instabilis.	1109.7
Colubrina heterneura.	609.2
Transecto Medio	
Guapira sp.	16132.9
Plumeria rubra L.	4920.7
Lonchocarpus constrictus Pitt.	3300.2
Piptadenia obliqua.	3009.4
Bursera instabilis.	2129.4
Transecto Alto	
Thouinidium decandrum.	7695.5
Guapira sp.	6441.9
Astronium graveoloens Jacq.	1855.3
Casaria corymbosa HBK.	640.7
Lonchocarpus constrictus Pitt.	397.4

## REFERENCIAS

- Bullock, S.H. 1986. Climate of Chamela, Jalisco, and trends in the south coastal region of Mexico. *Arch. Met. Geoph. Biocl.* 36:297-316.
- Castellanos, J., M. Maass and J. Kummerow. 1991. Root biomass of dry deciduous tropical forest in Mexico. *Plant and Soil.* 131: 225-228.
- García-Oliva, F., E. Ezcurra and L. Galicia. 1991. Pattern of rainfall distribution in the central pacific coast of Mexico. *Geografiska Annaler.* 73. A. 179-186.
- García-Oliva, F. 1992. Erosión y pérdida de nutrientes del suelo en una cronosecuencia de uso agropecuario en un ecosistema tropical estacional mexicano. Tesis de doctorado en ecología. Centro de Ecología-UNAM.
- Kummerow, J, J. Castellanos, M. Maass, and A. Larigauderie. 1990. Production of fine roots and the seasonality of their growth in a Mexican deciduous dry forest. *Vegetatio.* 90: 73-80.
- López-Guerrero, A. 1992. Escorrentía en pequeñas cuencas hidrológicas con selva baja caducifolia. Tesis de licenciatura, ENEP-Iztacala, UNAM.
- Lott, E.J. 1985. Listado florístico de la Estación de Biología Chamela, Instituto de Biología, UNAM.
- Martínez-Yrizar, A. and J. Sarukhán. 1990. Litterfall patterns in a tropical deciduous forest in Mexico over a five-year period. *Journal of Tropical Ecology.* 6: 433-444.
- Miranda, F. y Hernández, X. E. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot. Mex.* 28: 29-179.
- Patiño A.M.C. 1990. Variación espacial y temporal de la capa de hojarasca (mantillo) en una selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. 78 pp.

**CAPITULO 1**  
**CARACTERIZACION DEL RELIEVE EN UNA CUENCA TROPICAL ESTACIONAL:**  
**CUENCA 1**

## INTRODUCCION

En los modelos teóricos sobre hidrología el espacio se ha considerado homogéneo y estático. Sin embargo, en trabajos recientes se ha dado importancia a la influencia de la heterogeneidad espacial en la dinámica de los procesos (Forman & Godron, 1986). Una de las principales causas de heterogeneidad es la topografía local.

La geometría de una cuenca es la mezcla de diferentes formas, longitudes, ángulos de inclinación de laderas y orientación, por lo que el paisaje debe ser analizado como un modelo de tercera dimensión y no sólo como una sobreposición de perfiles.

Por lo anterior el manejo de una cuenca, demanda la evaluación de las características topográficas, las cuales poseen una gran variabilidad a este nivel. Por esta razón, es imperativo que dichas características sean estimadas en lugares y a escalas en las que puedan reflejar efectos locales e integrados del contenido de humedad en el suelo y la generación de escorrentía dentro de una cuenca (Beven, *et al.*, 1988). El paisaje (*e.g.* cuenca hidrológica), puede ser dividido en subunidades topográficas de acuerdo a sus características morfológicas, las cuales permiten evaluar la heterogeneidad de las propiedades del terreno (la profundidad de suelo, las propiedades físicas de los suelos y la capacidad potencial de almacenamiento de agua en suelo), la distribución de la disponibilidad de agua y su influencia en los procesos hidrológicos y ecológicos (O'Loughlin, 1990).

Las formas del relieve se pueden definir por sus semejanzas con modelos geométricos, por medio de la cuantificación de determinadas características. Estas características son: su superficie, la forma de pendiente, la longitud de pendiente, la inclinación de la pendiente, su altura absoluta, la altura relativa y la orientación. Los métodos morfométricos permiten la elaboración de mapas específicos que contribuyen al conocimiento del relieve.

Las variables topográficas requeridas para modelar el relieve en tercera dimensión y los fenómenos de escurrimiento incluyen: a) El área de contribución ladera arriba b) La inclinación de la pendiente y c) La orientación. Estas variables han sido usadas para diferentes aplicaciones, como identificación de las zonas de saturación (O'Loughlin 1988), las zonas de erosión-depositación y la estimación de la radiación potencial diaria (Moore y Murch, 1990).

Los modelos digitales del terreno son los métodos más comunes para la obtención de las variables topográficas mencionadas, los cuales pueden ser obtenidas a través de sistemas de información geográfica (SIG). Este sistema permite la entrada, almacenamiento, representación, manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos referidos espacialmente.

Los objetivos de este trabajo son: realizar la descripción de la configuración del relieve y la distribución del arreglo espacial de sus propiedades a diferentes escalas, en una cuenca hidrológica en un ecosistema tropical estacional de la costa de Jalisco, México.

## METODO

### A) Sistema de Información Geográfica

#### a) Captura de la información

El procesamiento de las variables topográficas se realizó con el Sistema de Información Geográfica ILWIS (Intergrated Land and Watershed Management Information System, 1990), instalado en una computadora de tipo AT/286-386-486. Dicho sistema (ILWIS) permite el manejo de información en formato vectorial, matricial y tabular. El procedimiento seguido para el análisis espacial del relieve fue el siguiente:

1) Captura de la información básica: el mapa topográfico base fue elaborado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), a una escala de 1:10 000 con una equidistancia entre curvas de nivel de 2 m.

2) Se digitalizó y codificó la información topográfica contenida en el mapa (parteaguas, curvas de nivel, unidad de ladera y red fluvial). Este procedimiento se realizó en una tableta Houston Instruments de formato mediano (44 x 34 cm).

3) Conversión de la información vectorial altitudinal a formato raster. La información altitudinal (segmentos que definen las trayectorias de las curvas de nivel) se transformaron de formato vectorial (datos secuenciales de coordenadas X Y) a formato raster (formato matricial). Con esto se definió el tamaño de pixel (unidad mínima de imagen). Para este caso fue de 1.5 m, de tal manera que el mapa resultante fue de 70576 pixels (478 renglones y 578 filas).

4) Modelo Digital del Terreno y Mapa de relieve sombreado.

#### b) Modelo digital del terreno (MDT)

El Modelo Digital del Terreno es la representación digital de la superficie terrestre. Este modelo es un conjunto de puntos de los cuales las coordenadas X Y y Z son registradas en una base de datos. Una de las aplicaciones del modelo es la elaboración de un mapa del relieve sombreado (Palacio et al., 1991).

#### c) Mapa sombreado

La obtención de modelos de terreno sombreados implican, en términos generales, la aplicación de filtros direccionales al MDT, ajustables para simular iluminaciones desde diferentes orientaciones (Pelton, 1987; Romo, 1989; Ware, 1989; Savazzi, 1990). De esta manera se logra una aparente tercera dimensión definida por la distribución de tonos de gris que facilita la percepción visual de las características del terreno.

Para la generación del mapa sombreado se requiere de la estimación de la orientación de las celdas individuales (o pixeles) y de un modelo que determine la reflectancia de cada una de dichas celdas cuando es iluminada por una fuente de luz localizada a 45° sobre la horizontal. Esta posición de altura angular se considera como estándar o "normal" (Burrough, 1986).

De acuerdo con Horn (1981), pueden seguirse los siguientes

pasos para la obtención del modelo sombreado.

El primer paso consiste en calcular las pendientes p,q para cada celda o "pixel" en cada uno de los ejes X y Y (direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente) de acuerdo a las siguientes fórmulas definidas a partir de análisis numérico:

para el eje de las X, ó p: Y

$$[Z/X]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i+1,j} + Z_{i+1,j-1}) - (Z_{i-1,j+1} + 2Z_{i-1,j} + Z_{i-1,j-1})] / 8 \times$$

para el eje de las Y, o q.

$$[Z/Y]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + Z_{i-1,j+1}) - (Z_{i+1,j-1} + 2Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1})] / 8 \times Y$$

De la formulación anterior se deriva un "kernel" o matriz de 3 x 3 que es sucesivamente aplicada a todos las celdas del MDT, con lo cual se obtienen los valores p,q para cada una de ellas. La matriz es la siguiente:

$$\begin{array}{c}
 Y \\
 \left| \begin{array}{ccc}
 Z_{i-1,j+1} & Z_{i,j+1} & Z_{i+1,j+1} \\
 Z_{i-1,j} & Z_{i,j} & Z_{i+1,j} \\
 Z_{i-1,j-1} & Z_{i,j-1} & Z_{i+1,j-1}
 \end{array} \right. \\
 \square
 \end{array}
 \quad \xrightarrow{\hspace{10em}} \quad
 \square \quad X$$

El siguiente paso consiste en convertir los valores p,q a valores de reflectancia que quedan representados en forma gráfica con distintos tonos de gris. Para ello, Horn (1981) sugiere la siguiente fórmula de reflectancia:

$$R(p,q) = (1/2) + 1/2(p'a) / b$$

donde: p' = (p0 p + q0 q) / (p0² + q0²) es la pendiente (o ángulo de inclinación) de la celda con respecto a la fuente de luz. p0 = 1/2 y q0 = -1/2 para una fuente de iluminación en la posición cartográfica estándar (noroeste 45°), a = 0 y b = 1/2 (Horn, 1981). Los parámetros a y b permiten la elección de valores de gris para superficies horizontales y el cambio progresivo de tonalidades en función de los valores de inclinación de cada celda.

Algunas soluciones para la definición de reflectancia son analíticamente complejas y puede ser más eficiente crear una tabla de colores ("look-up-table") para convertir directamente pendientes a valores de reflectancia (Burrough, 1986).

En terminos prácticos, el procedimiento seguido en este trabajo consistió en los siguientes pasos:

El filtrado direccional, o de convolución lineal (aplicación del "kernel"), es un proceso en el cual cada valor de pixel en un mapa

de formato de celdas, es sustituido por un nuevo valor obtenido a partir de la aplicación de cierta función sobre los píxeles y sus vecinos (ILWIS, 1990). En este caso, los píxeles vecinos fueron los 8 píxeles adyacentes por tratarse de un filtro de 3 x 3. El procedimiento de aplicación de filtros se hizo de la siguiente manera. Los valores de altitud de cada pixel del MDT y sus ocho vecinos más cercanos son multiplicados por sus valores correspondientes en el filtro. Los nueve valores resultantes son sumados algebraicamente y el resultado se multiplica por un factor de reducción (ganancia ó "gain"). Posteriormente se le suma una constante de desplazamiento para evitar valores negativos ("offset"). El valor resultante al ser desplegado en un monitor de computadora (formato "byte") permite tener una visión sombreada del terreno usando hasta 256 tonos de gris (Palacio et al., 1991).

El filtro c matriz utilizada para la simulación de la fuente de luz proveniente del norte fue la siguiente:

-3	-3	-3
0	0	0
3	3	3

#### d) Cartas de pendientes y orientación

Se realizó el mapa filtrado del DTM en el sentido de las X (para la obtención de las cartas de pendiente y orientación). Y el mapa filtrado del DTM en el sentido de las Y (para la obtención de las cartas de pendiente y orientación).

Para la realización de la carta de pendientes se hizo la interpolación del mapa "raster" de curvas de nivel digitalizadas, con ello se obtuvo el modelo digital del terreno (MDT), es decir se interpolaron linealmente todos los píxeles del área de estudio, tomando las altitudes de referencia (isolíneas). Posteriormente se le aplicó a dicho mapa un tratamiento con los filtros de convolución lineal DFDX y DFDY (ILWIS, 1991) con los cuales se calcularon las diferencias altitudinales para píxeles consecutivos, en el sentido de las X y Y.

Los filtros direccionales utilizados fueron los siguientes:

DFDX	DFDY
0 0 0 0 0	0 0 -1 0 0
0 0 0 0 0	0 0 8 0 0
1 -8 0 8 -1	0 0 0 0 0
0 0 0 0 0	0 0 -8 0 0
0 0 0 0 0	0 0 1 0 0

Los valores de estas matrices (filtros) son multiplicados por los valores correspondientes de los píxeles del mapa "raster" altitudinal (MDT). Estos 25 valores resultantes se suman algebraicamente, luego se multiplican por un factor de compensación ("gain"), que para estos filtros fue de 0.08.

Finalmente los valores se multiplican por un desplazamiento arbitrario (offset, usado comunmente para evitar valores negativos al aplicar un filtro direccional) que para este caso fue de 0.

Después, utilizando el módulo de cálculo de mapas (Map Calculus) y usando los dos mapas resultado del filtraje (DFDX y DFDY) se aplicó la función:

$$\text{PENDGRAD} = \text{ANGULO TANGENTE} ( (\theta_1^2 + \theta_2^2) / \theta_3 ) * 57.3$$

Siendo PENDGRAD: Inclinación de Pendiente en grados para cada pixel.

$\theta_1$  = Valor de la diferencia altitudinal en X, obtenido del mapa DFDX (filtrado direccionalmente en el sentido de las X).

$\theta_2$  = Valor de la diferencia altitudinal en Y, obtenido del mapa DFDY (filtrado direccionalmente en el sentido de las Y).

$\theta_3$  = Tamaño del pixel en metros, (para este caso fue de 1.5 m).

57.3 = Constante de multiplicación para convertir de radianes a grados sexagesimales.

El paso siguiente fue agrupar el mapa de pendientes por pixel de acuerdo a una tabla de clases.

#### e) Configuración de la red de drenaje

- Se identificaron y trazaron los cauces en base a las curvas de nivel del mapa topográfico para la obtención de la red de drenaje.
- Se delimitaron de los parteaguas de las subcuencas de primer y segundo orden.
- Se realizaron y digitalizaron los polígonos de los parteaguas.
- Se realizó un cruzamiento del mapa de la cuenca con los polígonos de las subcuencas y se obtuvo el área para cada subcuenca.
- Se realizó un cruzamiento de la red de drenaje con los polígonos de las subcuencas, para obtener la densidad de cauce.

#### B) Análisis de los datos

Los datos de área para cada clase de altitud, pendiente orientación y densidad de drenaje se obtuvieron por pixeles (unidad de área de 2.25 m<sup>2</sup>) de la cuenca para el análisis de asimetría en diferentes escalas: cuenca, escalonamiento, orientación y unidad de ladera.

Con las frecuencias de pixeles por clases de pendiente se elaboraron los siguientes análisis.

- a) Tabla de contingencia de X<sup>2</sup> de dos entradas, con los factores orientación y altitud (Everitt, 1986). La porción izquierda del cauce de la cuenca fue definida como S y la porción a la derecha del cauce como orientación N.
- b) Tabla de contingencia de X<sup>2</sup> de dos entradas, con los factores escalonamiento y pendiente. El factor escalonamiento fue definido por la existencia de microfallas, que la cruzan transversalmente, se identificaron tres escalonamientos: alto, medio y bajo.
- c) Tabla de contingencia multidimensional de X<sup>2</sup> con los factores orientación, escalonamiento y pendiente.
- e) Tabla de contingencia de X<sup>2</sup> de dos entradas, con los factores unidad de ladera y pendiente.



La clasificación de la curvatura del relieve se definió en base a la morfología del terreno, se delimitaron 14 unidades de ladera. La caracterización de los perfiles reflejaron que las facetas (Cresta, Ladera y Pie de Ladera) presentaron formas cóncavas, convexas y lineales.

Para cada tabla de contingencia se obtuvieron los residuales ajustados con la siguiente fórmula (Everitt, 1986)

$$d_{ij} = e_{ij} / v_{ij}$$

$d_{ij}$ : residuales ajustados.

$e_{ij}$ : residuales estandarizados.

$v_{ij}$ : varianza de los residuales estandarizados.

## RESULTADOS

### A) Nivel cuenca

El área total de la cuenca fue de 158794.80 m<sup>2</sup> con un perímetro de 7256 m.

La diferencia altitudinal de la cuenca fue de 130 m. Las cotas de altitud que mayor área ocuparon dentro de la cuenca fueron del rango de 140 m a 160 m, con el 36% y 22% del área total respectivamente. En cambio, la cota de altitud de menor área fue la de 40 m con sólo el 0.1% del área total (tabla 1, figura 1).

Tabla 1. Área por clase de altitud y porcentaje de área por clase de pendiente en la cuenca 1, Chamela Jalisco.

Clase (msnm.)	Área (m <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
40	1491.75	0.93
60	8856.00	5.57
80	12773.25	8.03
100	17867.25	11.24
120	23116.50	14.54
140	57426.75	36.13
160	35328.00	22.22
180	2099.25	1.32
Total	158946.75	100.00

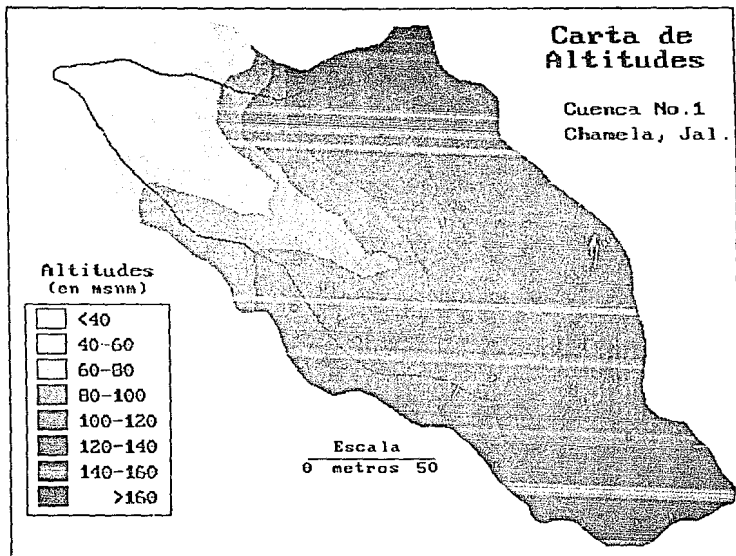


Figura 1. Mapa de las clases de altitud en una cuenca tropical estacional Chamela, Jalisco, México.

A nivel cuenca las clases de pendientes con mayor área fueron las clases de 8° y 16° ocupando el 18% y el 33% de área total, respectivamente (tabla 2, figura 2).

**Tabla 2. Área por clase de inclinación de pendiente y porcentaje de área para cada clase de pendiente en la cuenca 1, Chamela Jalisco.**

Clase (grados)	Área (m <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
0	648.00	0.40
2	9313.75	5.86
4	10707.75	6.74
8	28419.00	17.89
16	53084.25	33.43
20	16703.25	10.52
30	23332.50	14.69
40	10336.50	6.51
50	5328.00	3.35
>60	2072.25	1.30
<b>Total</b>	<b>158794.00</b>	<b>100.00</b>

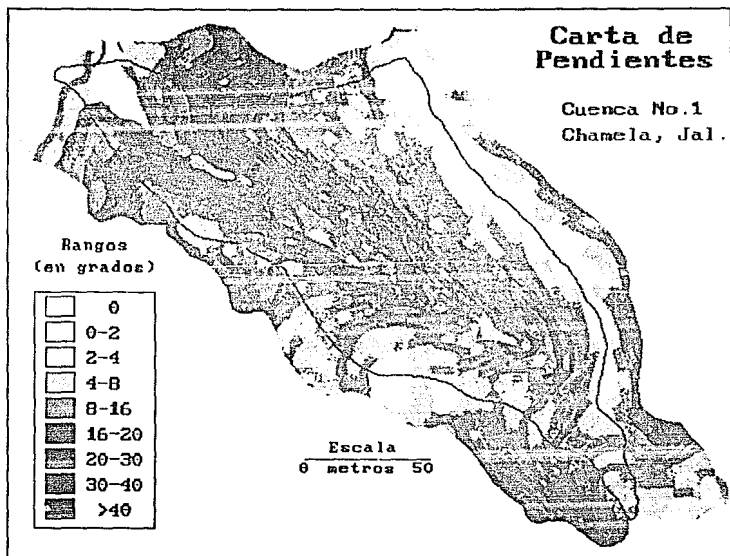


Figura 2. Mapa de distribución de las clases de pendiente en una cuenca tropical estacional Chamela, Jilisco, México.

## B) Orientación

Se obtuvo el área para cada orientación (N, NE, E, SE, S, SW, W, y NW). La orientación que mayor área ocupó fue la porción SW con el 31% y la porción E ocupó el área menor con sólo el 0.10 % del área total (tabla 3, figura 3).

Tabla 3. Área por clase de orientación de las laderas y porcentaje de área que ocupó cada clase de orientación de la cuenca 1, Chabela, Jalisco.

Orientación	Área (m <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
N	31442	20.00
NE	8890	6.00
E	214	0.10
SE	520	0.30
S	4557	3.00
SW	49378	31.00
W	39321	25.00
NW	24606	15.00
Total	158908	100.00

Como se mencionó anteriormente, la porción ubicada a la derecha del cauce, se consideró como porción N y la porción a la izquierda del cauce, se consideró orientada al S. Se encontró que la porción orientada al sur (S) ocupó el 62% del área total y la porción orientada al norte (N) el 39% restante.

En la clasificación de la inclinación de la pendiente en la cuenca con el factor orientación, se encontró que las áreas de las clases de pendiente fueron siempre mayores en la porción S comparada con la porción N, excepto para la clase de 8°, los porcentajes en cada una de las clases de pendientes para las dos orientaciones fueron similares (tabla 4).

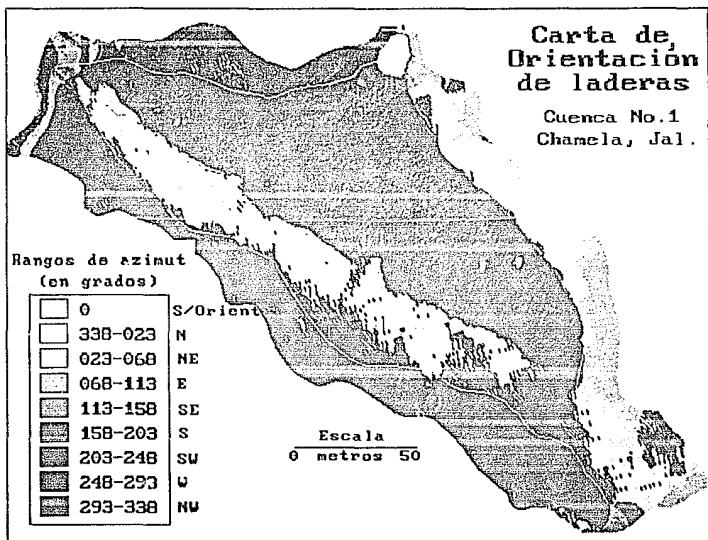


Figura 3. Mapa de orientación de laderas en una cuenca tropical estacional Chamela, Jalisco, México.

**Tabla 4. Area por clase de inclinación de la pendiente por orientación sur (S) y norte (N) y el porcentaje de área para cada orientación por clase de pendiente.**

Clase (grados)	Area (S) (m <sup>2</sup> )	(%) Area	Area (N) (m <sup>2</sup> )	(%) Area
0	616.50	0.62	31.50	0.05
2	7364.25	7.47	949.50	1.57
4	7616.25	7.73	3091.50	5.11
8	12573.00	12.76	15846.75	26.21
16	34112.25	34.63	18972.00	31.38
20	11346.75	11.52	5357.00	8.86
30	13844.25	14.05	9488.25	15.69
40	5539.50	5.62	4797.00	7.95
50	3638.00	3.69	1689.75	2.79
>60	1838.00	1.86	324.00	0.38
<b>Total</b>	<b>98489.25</b>	<b>100.00</b>	<b>60457.50</b>	<b>100.00</b>

Se encontró una relación significativa ( $p = 0.005$ ) entre los factores orientación y clases de pendiente. Se encontró una distribución asimétrica de las clases de pendiente, en la ladera S dominaron las clases de pendiente 0°, 2° y 4° y la ladera N presentó un déficit de dichos valores (figura 4).

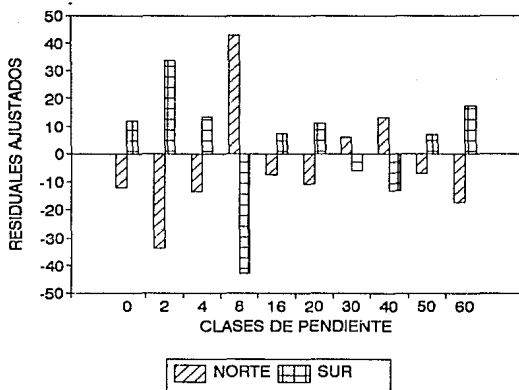


Figura 4. Valores de los residuales ajustados, de la distribución de las clases de pendiente dentro de la cuenca con el factor orientación (norte y sur).



### C) Escalonamiento

Del área total de la cuenca, la parte media ocupó mayor superficie (59.%), seguida por la parte baja (27.7%) y la parte alta (13.2%).

En la distribución de las clases de pendiente con respecto al escalonamiento, se encontró que del área total de la clase de 4°, el 53 % se concentró en la parte media. Del área total de la clase de 40°, el 53% y 42% se concentró en la parte baja y media respectivamente (tabla 5).

Tabla 5. Porcentaje de área con respecto al total de cada clase de pendiente en tres segmentos formados por el escalonamiento (bajo, medio y alto) de la cuenca 1, Chamela, Jalisco.

Clase (grados)	Escalón Bajo (%)	Escalón Medio (%)	Escalón Alto (%)	Total (m <sup>2</sup> )
< 4	33.40	55.14	8.46	19648.25
< 8	13.45	60.43	25.59	30669.75
< 16	18.44	64.32	16.90	53083.25
< 30	35.02	58.10	6.35	40156.75
> 40	53.35	44.24	1.17	17732.25

Se encontró una relación significativa ( $p = 0.005$ ) entre los factores escalonamiento y clase de pendiente. Se encontró que en la parte baja dominaron las clases mayores a 40°, en la parte media y alta las clases de 16° y 8° respectivamente (figura 5).

En la tabla de contingencia multidimensional con los factores escalonamiento, orientación y pendiente se obtuvo una  $X^2$  significativa ( $p < 0.005$ ). En la parte baja de la cuenca se encontró que dominaron pendientes mayores a 40°, asociadas a la orientación norte, por el contrario en la porción sur dominaron pendientes de 16°. En el escalón medio en la ladera N existió un déficit las clases de pendiente con respecto a la ladera S, en donde dominaron las clases de pendiente de 8° y 16° (figura 6).

### D) Unidad de ladera

La cuenca fue subdividida en 14 unidades topográficas diferentes entre sí (figura 7). Las unidades de ladera con mayor área fueron las unidades de ladera 1 y 2 con el 17.0% y el 16.4% del área total respectivamente y las unidades con menor área fueron las unidades 8 y 13 con sólo el 2.2% y 2.5% del área total respectivamente (tabla 6, figura 7). Cada unidad presentó características topográficas propias (figura 8). Se analizaron dos fuentes de variabilidad: entre unidades topográficas y al interior

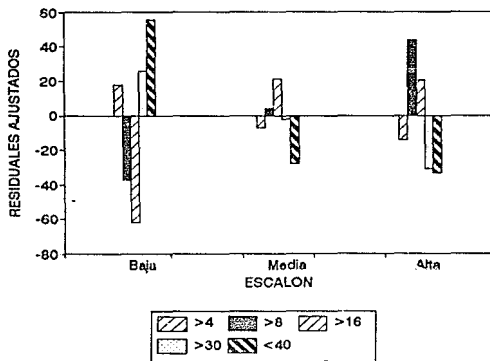


Figura 5. Valores de los residuales ajustados, de la distribución de las clases de pendiente dentro de la cuenca con el factor escalonamiento (bajo, medio y alto).

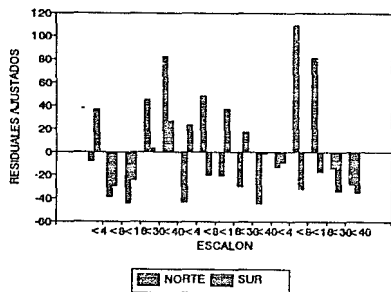


Figura 6. Valores de los residuales ajustados de la distribución de las clases de pendiente en una cuenca, con los factores orientación y escalonamiento.

**Modelo Digital del  
Terreno Sombreado  
y laderas**

Cuenca No.1  
Chamela, Jal.

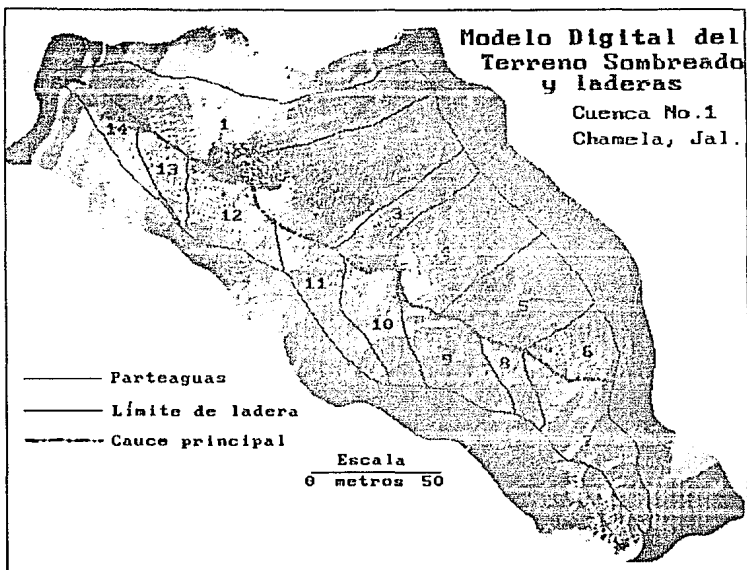


Figura 7. Mapa del modelo digital del terreno sombreado de la cuenca 1. Los números corresponden a las unidades de ladera (14).

**Tabla 6. Area, perimetro y porcentaje de área para cada unidad de ladera, en la cuenca 1, Chamela, Jalisco.**

Unidad de Ladera	Area (m <sup>2</sup> )	Perimetro (m)	(%)
1	27061.14	1004.06	17.04
2	26117.05	742.46	16.44
3	7434.24	478.43	4.68
4	17026.33	552.65	10.83
5	14148.37	488.13	8.90
6	6271.62	332.54	3.94
7	12737.67	622.99	8.02
8	3561.18	300.38	2.24
9	9638.39	491.75	6.06
10	8093.02	444.88	5.09
11	8939.62	528.04	5.62
12	8714.13	426.36	5.48
13	4050.66	315.29	2.55
14	4821.34	528.64	3.03
<b>Total</b>	<b>159814.86</b>	<b>7256.60</b>	<b>100.00</b>

de cada unidad.

La variabilidad entre las unidades topográficas se analizó con base a su curvatura, gradiente de pendiente, longitud de ladera y rompimientos de pendiente. Se encontraron 5 grupos principales:

- 1) Laderas con curvatura concavo-convexa (unidades 1, 4): con longitud de ladera larga (164 m y 89 m.), con varios rompimientos de pendiente (7 y 4 respectivamente) y con marcada inclinación (40°) (Este grupo pertenece a la letra E en la tabla 7).
- 2) Laderas con curvatura convexa (unidades 2 y 3): son unidades con longitud de ladera larga (124 m y 94 m), con varios rompimientos de pendiente (8 y 5 respectivamente), en estas unidades se encontraron los valores de mayor pendiente por pixel (77° y 57°) (Este grupo pertenece a la letra A en la tabla 7).
- 3) Laderas con curvatura convexa (unidades 9, 10 y 11): con longitud de ladera corta (76 m y 100 m), pocos rompimientos de pendiente (ambas con 4) y regularmente inclinadas (20°) (Este grupo pertenece a la letra C en la Tabla 7).

- 4) Laderas con curvatura lineal-convexa (Unidades 12, 13 y 14): con longitudes de ladera corta (43 m, 52 m y 28 m respectivamente), pocos rompimientos de pendiente (5, 3, y 3) y marcada inclinación (40°) (Este grupo pertenece a la letra D en la Tabla 7).
- 5) Laderas con curvatura lineal (unidades 5, 6, 7 y 8 ): con longitud de ladera relativamente corta (68 m, 41 m. y 60 m ), pocos rompimientos de pendiente (5, 2 y 3) y con gradiente de inclinación bajo (8° y 16°) (Este grupo pertenece a la letra B en la tabla 7).

Tabla 7. Media, máximo, mínimo y moda de la inclinación de la pendiente en cada unidad de ladera en la cuenca 1, Chamela, Jalisco. (La letra corresponde al grupo de curvatura que forma, Cvo = Cóncavo, Cxo = convexo).

Ladera	Media	Máx.	Mín.	Moda	R Pen	Curvatura	M-Mo	Gpo
1	17°	67°	0°	2°	7	Cxo-Cvo	15	E
2	18°	77°	0°	8°	8	Cxo	10	A
3	15°	57°	0°	2°	5	Cxo	13	A
4	14°	58°	1°	2°	4	Cvo-Cxo	12	E
5	10°	41°	0°	11°	5	Lineal	1	B
6	12°	47°	0°	11°	2	Lineal	1	B
7	10°	40°	1°	7°	3	Lineal	3	B
8	9°	28°	2°	8°	2	Lin-Cxo	1	B
9	10°	59°	1°	5°	4	Cxo	5	C
10	15°	59°	1°	15°	4	Cxo	0	C
11	15°	53°	1°	6°	4	Cxo	9	C
12	23°	59°	0°	24°	5	Lin-Cxo	1	D
13	27°	57°	0°	28°	3	Lin-Cxo	1	D
14	17°	49°	0°	4°	3	Lin-Cxo	13	D

La variación al interior de cada unidad de ladera esta dada por las facetas que lo integran (cresta, ladera y pie). La cresta es la faceta que presentó mayor homogeneidad en cuanto a curvatura (convexas y lineales), con bajo gradiente de inclinación (de 4° a 8°), asociadas a la porción sur (unidades 1, 2, 3, 4, 5 y 6) y las asociadas a la porción norte (unidades 8, 9, 10, 11 y 12). La faceta ladera fue la más representativa en área (70 %). La faceta ladera presentó distintas formas de curvatura: lineal (unidades 5, 6 y 7), con baja inclinación de pendiente (2°, 16° y

8° respectivamente); cóncavo-convexo (unidades 1 y 4) con marcada inclinación de pendiente, (30° y 40°) y convexas (unidades 9 y 10), con regular inclinación de pendiente (16° y 20° respectivamente). El pie de ladera fue el menos representativo en superficie y fue variable en curvatura: lineal (unidades 10, 12, 13 y 14), cóncavo (unidades 1, 5, 6, 7, y 9 y con diferentes gradientes de pendiente (tabla 8 y figura 8).

**Tabla 8. Caracterización morfológica de las unidades de ladera en la cuenca 1, Chamela, Jalisco. (El número entre paréntesis corresponde a la pendiente dominante).**

Unidad de Ladera	Longitud de Ladera (m)	Cresta	Ladera	Pie
1	164.4	Lineal (4°)	Cxo-Cxo (30°)	Cvo (2°)
2	124.2	Lin-Cxo (4°)	Cxo-Lin (30°)	
3	94.0	Lineal (2°)	Cxo (16°)	
4	89.0	Lineal (4°)	Cxo-Cxo (16°)	
5	68.0	Lineal (4°)	Lineal (8°)	Cvo (8°)
6	41.0	Lin-Cxo (4°)	Lineal (2°)	Cvo (20°)
7	60.0	Cxo (4°)	Lineal (16°)	Cvo (16°)
8	57.0	Cxo (4°)	Lin-Cxo (8°)	
9	62.0	Cxo (4°)	Cxo (16°)	Cvo (16°)
10	76.0	Cxo (4°)	Cxo (20°)	Lin (30°)
11	100.5	Cxo (8°)	Cxo (16°)	
12	43.0	Lineal (8°)	Lin-Cxo (40°)	Lin (40°)
13	52.0	Lineal (8°)	Lin-Cxo (40°)	Lin (40°)
14	26.4	Cxo (8°)	Lin-Cxo (30°)	Lin (8°)

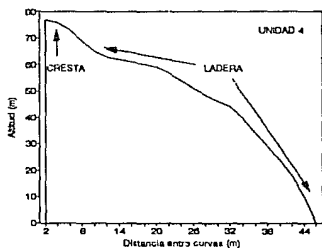
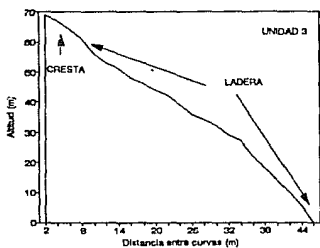
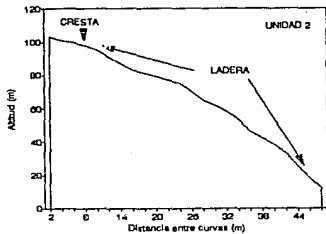
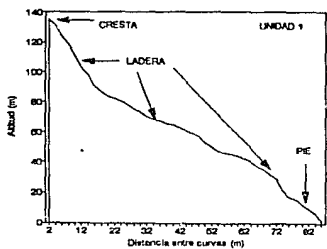


Figura 8. Perfiles topográficos de las unidades de ladera, en los cuales se representa la faceta y su curvatura.

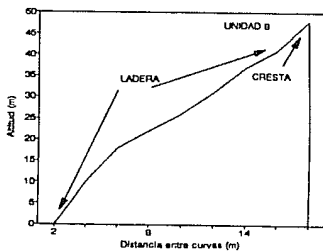
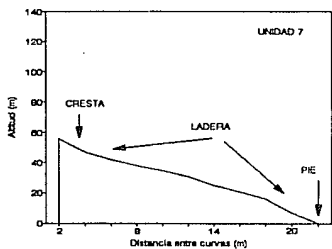
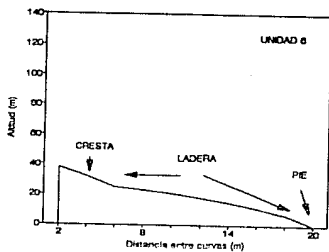
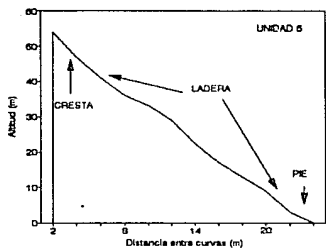


Figura 8. Perfiles topográficos de las unidades de ladera, en los cuales se representa la faceta y su curvatura.



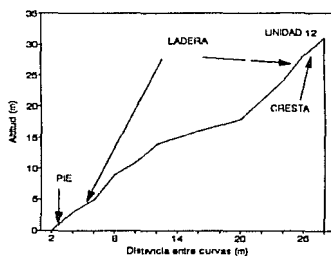
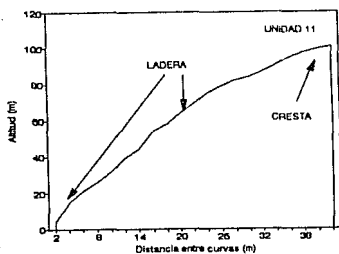
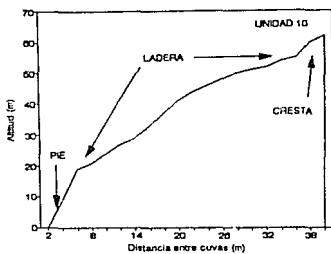
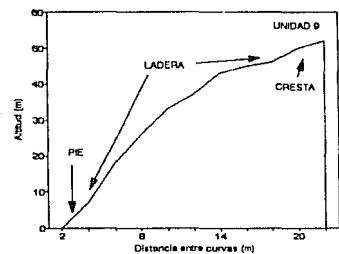


Figura 8. Perfiles topográficos de las unidades de ladera, en los cuales se representa la faceta y su curvatura.

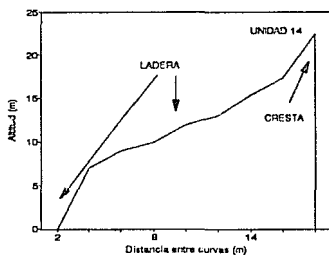
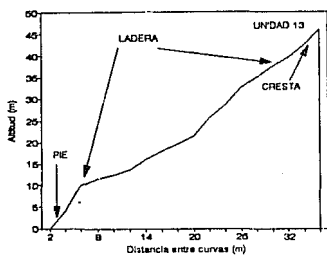


Figura 8. Perfiles topográficos de las unidades de ladera, en los cuales se representa la faceta y su curvatura.

Se obtuvo el área de cada clase de pendiente al interior de cada unidad de ladera. Las laderas homogéneas como la ladera 8, estuvo dominada por solo dos clases de pendiente 16° (63 % de su área) y 20° (29 % de su área) y las laderas heterogéneas, como la unidad 1 presentó porcentajes de área para todas las clases de pendiente (Tabla 9).

Tabla 9. Porcentaje del área que ocupó cada clase de pendiente por unidad de ladera en la cuenca 1, Chamola, Jalisco.

UL	0	2	4	8	16	20	30	40	50	60
1	2.29	7.0	3.0	9.1	9.6	4.3	6.3	2.9	0.7	54.8
2	4.23	11.8	5.7	12.9	14.8	6.2	10.5	5.9	1.9	25.7
3	0.07	6.1	2.5	5.6	4.3	0.7	0.6	28.9	41.0	9.8
4	0.09	7.1	2.7	7.8	6.5	3.4	2.4	1.0	25.1	43.4
5	0.01	6.3	8.6	17.1	55.5	8.2	3.6	0.2	0.0	0.0
6	0.03	12.8	4.9	12.0	47.1	10.3	10.1	1.9	0.0	0.0
7	0.00	0.6	3.5	38.2	47.1	5.9	3.9	0.4	0.0	0.0
8	0.00	0.3	0.2	0.2	63.1	28.9	6.9	0.0	0.0	0.0
9	0.00	0.6	3.0	31.8	39.6	5.9	5.1	1.3	0.6	0.0
10	9.74	2.8	9.8	7.1	2.4	2.7	0.7	47.4	16.9	0.0
11	0.00	8.1	5.6	20.5	13.8	3.2	2.9	15.0	23.3	7.2
12	0.07	1.0	6.1	8.9	13.5	9.1	28.7	20.8	10.3	1.5
13	0.05	1.1	0.1	1.8	11.6	9.0	34.2	31.5	9.8	0.5
14	0.92	18.4	18.4	24.6	23.5	15.3	6.5	0.0	0.0	0.0

En el análisis de tabla de contingencia con los factores unidad de ladera y pendiente, se encontró que las clases de pendiente se distribuyeron diferencialmente al interior de cada unidad de ladera. Se definieron laderas homogéneas (unidades de ladera 11 y 12) y laderas heterogéneas (unidades de ladera 1, 2, 3 y 4) (figura 9).

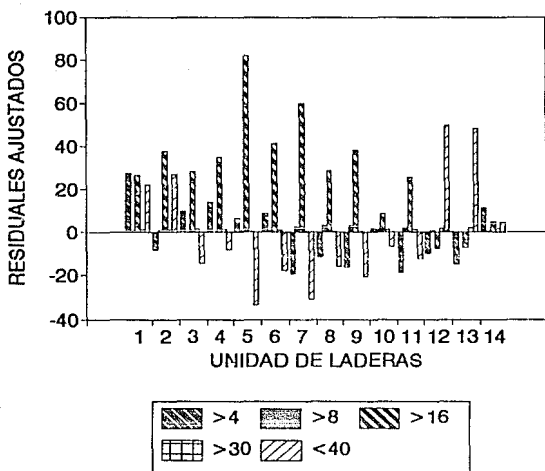


Figura 9. Valores de los residuales ajustados de la distribución de las clases de pendiente al interior de la unidad de ladera en la cuenca 1.

## E) Red de drenaje

El cauce principal fue de tercer orden. Se identificaron 18 subcuencas (9 subcuencas de primer orden, 8 de segundo orden y 1 de tercer orden), de las cuales 8 estuvieron orientadas al N (5 de primer orden y 3 de segundo orden) y 9 orientadas al S (4 de primer orden y 5 de segundo orden) (Figura 10).

A nivel cuenca el 19 % del área estuvo ocupado por subcuencas de primer orden, el 46 % del área total por subcuencas de segundo orden y el 33 % restante por interfluvios de tercer orden. A nivel orientación la proporción del área para subcuencas de primer orden fueron equivalente para ambas orientaciones (N y S). Por el contrario para subcuencas de segundo orden el N sólo ocupó el 8.4 % y el S 38 % del área total. (tabla 10).

El área promedio para subcuencas de primer y segundo orden en la porción orientada al S fue mayor que la porción orientada al N. El valor medio de la longitud de cauce fue mayor para S que N. Como consecuencia los cauces de primer y segundo orden y la densidad de cauces fue mayor en la ladera N que en la S.

Tabla 10. Area de subcuencas de primer, segundo y tercer orden. Longitud y densidad de cauce de las subcuencas por orientación y orden del cauce principal de la cuenca 1, Chamela, Jalisco (D.S. desviación estándar y C.V. coeficiente de variación).

Primer Orden	Area (m <sup>2</sup> )	Longitud de Cauce (m)	Densidad de drenaje (m/m <sup>2</sup> )
<b>NORTE</b>			
6	5230.593	88.50	0.017
7	2584.657	73.50	0.028
15	3025.919	51.00	0.017
16	3835.897	51.00	0.013
18	1045.980	67.00	0.065
Media	3144.50	66.30	0.028
D.S.	1546.00	15.92	0.021
C.V.	49.00	24.00	76.500
<b>SUR</b>			
4	3626.924	61.50	0.017
11	4781.191	90.00	0.019
13	5277.635	127.50	0.024
19	2119.591	66.50	0.031
Media	3959.20	86.25	0.022
D.S.	1405.00	30.21	0.006
C.V.	35.50	35.00	27.40

Segundo Orden NORTE			
5	8819.229	127.50	0.014
9	1694.710	57.00	0.031
17	2832.062	94.50	0.033
Media	4448.50	93.00	0.026
D.S.	3827.30	35.27	0.010
C.V.	86.00	37.90	40.10
SUR			
3	19663.170	157.50	0.008
8	11165.720	241.50	0.022
10	4813.476	138.00	0.029
12	13487.982	258.00	0.038
14	11695.670	217.50	0.019
Media	12161.40	202.50	0.023
D.S.	5320.60	52.46	0.011
C.V.	43.70	25.90	48.30
Tercer Orden			
Sur			
2	53094.830	595.50	0.011

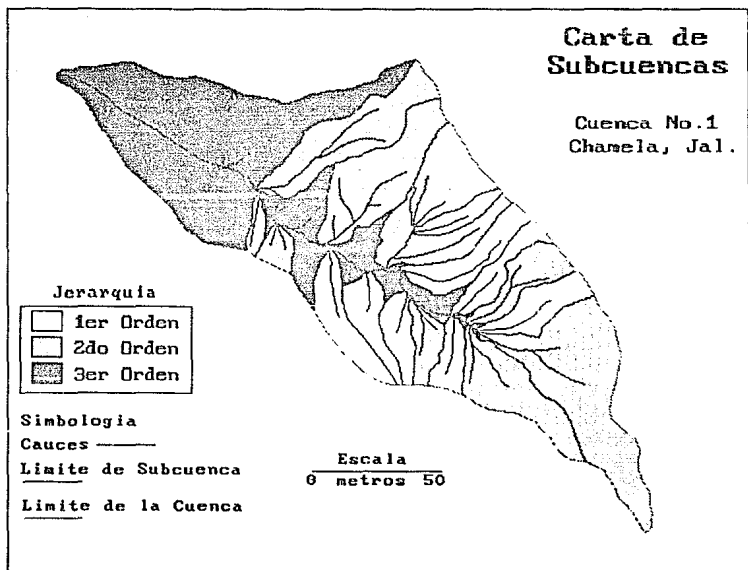


Figura 10. Mapa de la configuración de la red drenaje de la cuenca 1.



## DISCUSION

Al interior de la cuenca se identificaron 14 unidades topográficas, distintas en curvatura y gradiente de pendiente. Lo anterior ofrece una idea de la heterogeneidad espacial de una cuenca hidrológica.

La distribución de las clases de pendiente con el factor orientación fue explicado por la longitud de la ladera. La porción orientada al sur posee una mayor longitud de ladera y en consecuencia presentó mayor número de rompimientos de pendiente y fueron unidades heterogéneas al interior de ellas. Por el contrario, las unidades orientadas al N presentaron una longitud de ladera corta y en consecuencia presentaron menor número de rompimientos de pendiente y fueron laderas homogéneas.

La distribución de las clases de pendiente con el factor escalonamiento fue explicado por las microfallas que existen en la cuenca. En consecuencia el cauce estuvo escalonado, es decir, al interior de la cuenca existieron diferentes niveles de base, es decir que cada unidad de ladera tiene diferente potencial de evacuación de agua, la cual está en función de la longitud de la pendiente. En el escalón bajo se encontraron las laderas con mayor inclinación (1, 2, 3, 12 y 13) por lo que la diferencia del nivel de base es mayor. Por el contrario, en el escalón alto se encontraron las laderas (unidades 6, 7, y 8) con baja inclinación de pendiente (8° y 16°) como consecuencia de un nivel de base corto.

El tipo de curvatura ofrece un índice de heterogeneidad, las unidades de ladera con curvatura mixta y gran longitud de ladera (1 y 4,) presentaron un mayor número de discontinuidades topográficas contrastantes al interior de ellas. Por el contrario, las unidades con curvatura lineal y longitud de ladera corta presentaron al interior de ellas una menor variación topográfica, siendo las unidades homogéneas de la cuenca.

Al interior de cada unidad de ladera la distribución de área de cada clase de pendiente y los rompimientos de pendiente, reflejaron un índice de heterogeneidad. En la tabla 9 se observó que las laderas homogéneas (unidades de ladera 5, 6, 7, y 8) concentraron el área de las clases de poca inclinación de pendiente (4°, 8° y 16°, 80 % de su área) con pocos rompimientos de pendiente. También fueron homogéneas las unidades de ladera 12 y 13 concentraron área de las clases de pendiente mayores a 30° (60 % de su área), con mayor número de rompimientos de pendiente. Por el contrario, las unidades 1, 2, 3 y 4 son laderas que concentraron el área de todas las clases de pendiente, por lo tanto representaron laderas heterogéneas.

Es importante generar descripciones topográficas confiables y a escalas adecuadas que permitan inferir los flujos de agua y simular sus respuestas al interior de una cuenca. La división del "paisaje" ó de la cuenca hidrológica en este caso, permite la observación de procesos hidrológicos a diferentes escalas, el entendimiento simultáneo e integrado del funcionamiento en una unidad de paisaje.

La morfología de laderas influyó la configuración espacial y

temporal de la red de drenaje, por lo que existieron aportes distintos de agua de cada unidad de ladera debido a la configuración morfológica de cada una. En laderas con fuerte inclinación, como es el caso de las unidades 1, 12 y 13, la ausencia de cauces definidos indican la ausencia relativa de acción canalizada del agua, representando zonas que contribuyeron rápidamente al cauce principal en forma de flujos laminares. Las unidades de ladera 9, 10 y 11 con un cauce definido aportaron agua durante mayor tiempo, debido a que la curvatura permite retener agua en el suelo y mantuvo durante mayor tiempo en una tormenta el aporte de agua al cauce principal, particularmente por flujos subsuperficiales. Esto pone de manifiesto que existe un aporte diferencial de agua al interior de una cuenca.

El drenaje y la escorrentía son parámetros importantes para establecer el balance hídrico. El número de cauces de primer orden son similares para norte y sur, pero difieren en la densidad de drenaje. La configuración topográfica de la ladera sur es heterogénea, lo cual dió como resultado un mayor número de cauces de segundo orden en relación a la ladera norte. Por lo anterior, podemos afirmar que existieron aportes diferenciales de agua al interior de la cuenca. La división de la cuenca en subunidades permitiría no sólo entender el comportamiento espacial de los diferentes flujos y cantidades de agua, sino que nos permitiría tener una idea del comportamiento simultáneo en toda la cuenca.

Es importante generar observaciones a diferentes escalas, Beven (1990), menciona que en cada escala de observación se tienen propiedades topográficas y dinámica de los procesos particulares de cada escala. La descripción morfológica de las unidades de ladera tienen importancia desde el punto de vista hidrológico y geomorfológico, ya que ambos tienen efectos combinados. Con los fundamentos geométricos del relieve se pueden definir los tipos de flujo y la localización de estos (O'Loughlin, 1990). Las zonas cóncavas son partes del paisaje que promueven flujo convergente y están asociadas preferentemente a los cauces. Las partes convexas y lineales promueven los flujos divergentes y son las zonas más secas del paisaje y las de mayor riesgo erosivo (Daniels et al., 1987). Otra inferencia de la morfología de la ladera, es en la relación paisaje-erosión, dado que los procesos erosivos deben ser entendidos desde el punto de vista morfológico del relieve y no sólo con elementos aislados del relieve (i.e. gradiente de pendiente). La curvatura del perfil promueve procesos erosivos diferentes (Moore et al., 1987). La relación erosión-relieve es compleja y no puede ser explicada a partir de relaciones lineales con elementos topográficos aislados. Los procesos erosivos en un punto están influenciados por las características de los suelos adyacentes y la morfología del relieve en un sistema de ladera. García-Oliva (1992) evaluando el proceso de erosión con el método de Cs-137, encontró que el proceso erosión-depositación está en función de la posición que ocupa un punto dentro de la unidad de ladera, en zonas de erosión (zonas de ladera), se perdieron 20.8 t ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> y 16.7 t ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> de suelo. Por el contrario en los pies de ladera con inclinación suave se localizaron las zonas de

deposición ( $-18.7 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  y  $-7.2 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ ). El gradiente y la morfología fueron parámetros importantes para la correcta evaluación de los procesos erosivos.

El proceso más importante a escala cuenca es la relación lluvia-escurrimiento. En la zona de estudio, López (1992) no encontró diferencias significativas entre las cinco cuencas para los diferentes parámetros de escurrimiento (lámina anual escurrida, porcentaje de lluvia anual escurrida, coeficientes de escurrimiento e índice de infiltración). Uno de los problemas de estos métodos es que consideran homogeneidad espacial (i.e. un sustrato permeable, condiciones homogéneas de los suelos y que existe aporte de agua uniforme en cada metro cuadrado). Sin embargo, como ya se mencionó en esta cuenca es evidente que existe un aporte diferencial hacia su interior debido a la configuración de su relieve.

El que exista una cuenca heterogénea en cuanto a área, morfología y gradiente de pendiente, influye en la variabilidad y la distribución espacial de procesos, tales como: a) Distribución de las características físicas de los suelos, b) Variación espacial del contenido de humedad en el suelo, ya que influye en los flujos verticales y horizontales de agua, c) Distribución diferencial de los procesos hidrológicos: flujos superficiales o subsuperficiales y d) Influencia en la configuración de la red de drenaje.

Esta cuenca mostró una gran heterogeneidad en arreglo espacial de las características morfológicas del relieve, esta heterogeneidad se presentó a dos escalas: a) entre unidades de ladera (14, cada una con diferente tipo de curvatura) y b) al interior del perfil, representada por la pendiente dominante de cada faceta (cresta, ladera y pie) y el tipo de curvatura asociada.

Los estudios a nivel cuenca deben ser importantes en los estudios ecológicos, particularmente en los estudios de balances de nutrientes, hidrológico y de producción primaria, teniendo como unidad experimental la cuenca hidrológica.

Es necesario remarcar que las descripciones del arreglo espacial de las características del relieve, en la cual reflejen su influencia en la redistribución de los procesos, los cuales a su vez influyen en los patrones espaciales y temporales de los flujos de materiales y nutrientes.

#### REFERENCIAS

- Albrtet, T.M. 1988. Knowledge-Based Geographic Information Systems (KBGIS): New Analytic and Data Mangement Tools. *Mathematical Geology*. 20: 1021-1035.
- Aronoff, S. 1989. *Geographic Information Systems: A management approach*. WDL Publications, Canada.
- Beven, K. and E. F. Wood. 1983 Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*. 65: 139-158
- Burrough, P. A. 1986. *Principles of Geographic Information Systems*. Clarendon Press, Oxford.
- Daniels, R.B., J.W. Gillian., D.K. Cassel and L. A. Nelson. 1987. Quantifying the effects of past soil erosion on present soil productivity. *Journal Soil and Water Conservation*. 42: 183-187.
- Ferman. R. T. and M. Godron. 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley and Sons. 587 pp.
- García-Oliva, F. 1992, *Erosión y pérdida de nutrientes del suelo en una cronosecuencia de uso agropecuario en un ecosistema tropical estacional mexicano*. Tesis de Doctorado en Ecología, Centro de Ecología-UNAM.
- Guth, P.L., E. K. Ressler, T.S. Bacastow. 1987. Microcomputer program for manipulating large digital terrain models. *Computers & Geosciences*. 13: 209-213.
- Hodgson, M.E. 1989. "Searching methods for rapid grid interpolation" *Professional Geographer*. 41: 51-61.
- Horn, B.K.P. 1982. "Hill shading and the reflectance map" *Cao-Processing*. 2: 65-146.
- Hutchinson, M.F. 1989. "A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits". *Journal of Hydrology*. 106: 211-217
- ILWIS 1990. *Integrated Land and Watershed management Information System. User's manual*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). Enschede, The Netherlands.
- López, G. A. 1992. *Escorrentia en pequeñas cuencas hidrológicas con Selva Baja caducifolia en Chamela, Jalisco*. Tesis de Licenciatura ENEP-IZTACALA, UNAM.

- Lam, N.S. 1983. Spatial interpolation methods: a review. *The American Cartographer*. 2: 129-149.
- Mc Donnel, M.J. 1982. Automatic relief shading, *N.Z. Phys. Eng-Lab.Rep.* 764: 545-548.
- Moore I.D., E. M. O'Loughlin. and G.J. Burch. 1988. A Contour-Based Topographic Model for Hydrological and Ecological Applications. *Earth Surface Processes and Landforms*. 13: 305-320.
- O'Loughlin, E.M. 1990 Modelling soil water status in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*. 50: 23-28.
- Palacio P.J.L, López, B. J. y Ortiz, M. A. 1991. Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno. *Investigaciones Geográficas Boletín del Inst.de Geog.de la UNAM*. 23: 89-101.
- Pelton, C. 1987. A computer program for hill shading digital topographic data sets. *Computers & Geosciences*. 13: 545-548.
- Playstock, R.A. y G. Kalley. 1987. *Teoría y problemas de gráficas por computadora*. McGraw-Hill, México.
- Romo, J.M. 1989. Gray scale maps with a personal computer. *Computers & Geosciences*. 15: 1249-1263.
- Savazzi, E. 1990. C programs por displaying shaded three-dimensional objects on a PC". *Computers & Geosciences*. 16: 195-209.
- Sharpnack, D.A. and G. Akin. 1969. "An algorithm for computing slope and aspect from elevations. *Photogram. Eng. & Remote Sensing*. 35: 247-260
- Smith et al. 1986. *KBGIS-II: A Knowledge-Based Geographic Information System*. Department of Computer Science, University of California, Santa Barbara, 36 pp.
- Valenzuela, C. 1988. ILWIS overview. *ITC Journal*, 1988. 1: 3-14.
- Ware, C. 1989. Fast hill shading with cast shadows. *Computers & Geosciences*. 15: 1327-1334.
- Wood, E.F., M. Sivapalan; K. Beven and L Band. 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling. *Journal of Hydrology*. 102 29-47.

**CAPITULO 2**  
**DISTRIBUCION DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS SUELOS AL**  
**INTERIOR DE UNA CUENCA, EN RELACION A LA CARACTERIZACION DEL**  
**RELIEVE.**

## INTRODUCCION

Las propiedades físicas de los suelos, pueden influir en los niveles de productividad y el equilibrio de los sistemas. Las características de las propiedades físicas de los suelos y su influencia en los procesos de movimiento de agua y nutrientes en el suelo deben ser considerados en la implementación de planes de uso del suelo (Lal, 1987). Sin embargo, a estas propiedades no se les ha dado la atención que merecen en los estudios ecológicos. Sin embargo, los riesgos de degradación, desertificación, erosión acelerada y la reducción de la productividad son los aspectos más reconocidos (Lal, 1987).

El relieve (el gradiente y la longitud de la pendiente) es uno de los elementos que afectan la naturaleza y la distribución de los suelos. El relieve no sólo afecta la variabilidad horizontal y vertical de los suelos, sino también a los flujos de agua y nutrientes que ocurren dentro de una ladera (Lal, 1987). La morfología refleja diferentes procesos edáficos (Gregorich y Anderson, 1985). En algunos trabajos se han examinado las relaciones entre la curvatura del relieve y las propiedades físicas de los suelos. En crestas ó las partes altas de una ladera son generalmente convexas, dominan los suelos someros, tiene secciones de carácter predominantemente erosivo, presentan correlaciones significativas entre gradiente de pendiente y las propiedades del suelo. En cambio las partes bajas de una ladera son cóncavas y están asociadas a procesos deposicionales, caracterizadas por una gran variabilidad de las características físicas de los suelos y tienen muy poca correlación estadística entre los parámetros del relieve y las propiedades de los suelos. Es común que las características de los suelos dentro de un sistema de ladera varíen de un sitio a otro. La magnitud, patrones y causas de esa variabilidad dependen del relieve, los tipos de suelos y las propiedades que van a ser evaluadas (Lal, 1987). La variabilidad de los suelos puede ser analizada desde dos puntos de vista: a) la variabilidad por naturaleza y b) la variabilidad de acuerdo a la escala de observación.

La Variabilidad por naturaleza se refiere a la variabilidad del suelo y a sus propiedades que son explicables en base al material parental. Con este criterio, la variabilidad por naturaleza es clasificada en dos categorías (Lal, 1987).

I) Variabilidad determinística o sistemática, la cual se refiere a la heterogeneidad espacial y temporal en relación a las variables dependientes del paisaje (como son los factores que forman el suelo, el material parental, la pendiente, la posición dentro del paisaje y la acción biológica) (Burrough, 1983).

II) Variabilidad estocástica ó al azar, es compleja e irregular, es independiente de la posición dentro del paisaje, esta asociada a la litología, los procesos de erosión, intemperismo y a los errores de muestreo (Burrough, 1983).

La Variabilidad en función a la escala de observación se refiere a que el nivel de variación sistemática depende de la

escala de observación, la variabilidad aumenta con el incremento de la escala de observación (Lal. 1987). Los principales factores que provocan la microvariabilidad son los factores biogénéticos.

El objetivo de este trabajo es analizar la distribución y variabilidad de las propiedades físicas de los suelos como resultado de la heterogeneidad del relieve.

#### METODO

##### A) Muestreo de campo

El muestreo se realizó en cada una de las unidades de ladera (Como se recordara en el capítulo 1 se definieron 14 unidades de ladera con base a sus características morfológicas). En cada transecto se tomaron las muestras de suelo sistemáticamente cada 10 m de distancia a partir del cauce principal. Se tomaron en dos profundidades de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm. Las muestras se obtuvieron con un nucleador de 7.5 cm de diámetro. En el mismo punto se midió la profundidad del suelo con una barrena. Las muestras fueron secadas en el horno a 100° C.

##### B) Análisis de laboratorio

Capacidad de retención, se pesaron 100 gramos de suelo seco no tamizado y se colocaron en tubos de PVC de 2.5 cm de diámetro y 20 cms de largo. Se agregó agua hasta alcanzar la capacidad de campo de la muestra y se obtuvo su capacidad de retención se obtuvo de la diferencia de la muestra entre en su capacidad de campo y el peso inicial.

Para los demás análisis, las muestras fueron tamizadas en un tamiz de 2 mm de abertura. La densidad aparente se obtuvo con el método gravimétrico en el laboratorio. La Densidad Real se obtuvo con el método del picnómetro a peso constante. La Porosidad se determinó a partir del cociente: Densidad Aparente/Densidad Real. La Textura se determinó con el método de Bouyoucos. El pH se determinó con el método del electrodo de vidrio y potenciómetro. El porcentaje de materia orgánica se determinó con el método de Walkey-Black (Nelson y Sommers, 1982).

##### C) Análisis de datos

- i) Con el objeto de encontrar una ordenación espacial con los factores unidad de ladera y profundidad de suelo, con los datos de las dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm), se realizó un análisis de componentes principales de una matriz de datos de 7 variables (arenas, arcillas, limos, porosidad, capacidad de retención, pH y densidad aparente) con 111 casos, doble centrado y estandarizado (Kendall, 1983), corrido en el programa ORDEN (Ezcurra, 1990).
- ii) Con el objeto de encontrar una ordenación de las unidades de ladera, con los datos de la profundidad del suelo de 10 cm se realizó un análisis de componentes principales de una matriz



- de datos con 9 variables (arenas, arcillas, limos, profundidad, porosidad, densidad aparente, capacidad de retención, pH y materia orgánica) y 65 casos, doble centrado y estandarizado (Kendall, 1983), corrido en el programa ORDEN (Ezcurra, 1990).
- iii) Con el objeto de encontrar diferencias entre unidades de ladera, con la serie de datos de la profundidad de 20 cm se realizó un análisis de componentes principales con una matriz de datos 7 variables (arenas, arcillas, limos, porosidad, capacidad de retención, pH y densidad aparente) y 46 casos, doble centrado y estandarizado (Kendall, 1983), corrido en el programa ORDEN (Ezcurra, 1990).
  - iv) Con la serie de datos de ambas profundidades (0-10 cm y 10-20 cm) se realizó una matriz de correlación de Pearson con el objeto de determinar las relaciones que existen entre las variables (Kendall, 1983).
  - v) Con la serie de datos de la profundidad de 10 cm se realizó una matriz de correlación de Pearson, con el objeto de determinar las relaciones que existen entre las variables (Kendall, 1983).
  - vi) Con la serie de datos de la profundidad de 20 cm se realizó una matriz de correlación de Pearson (Kendall, 1983).
  - vii) Con la serie de datos del componente 1 del análisis de componentes principales, de la serie con las dos profundidades se realizó un análisis de varianza desbalanceado de un factor, con 12 tratamientos (en el cual los tratamientos fueron las unidades de ladera, Capítulo I), para observar si la ordenación por ladera es estadísticamente significativa (Sokal y Rolf, 1980).
  - viii) Con la serie de datos del componente 1 del análisis de componentes principales (de la profundidad de 10 cm), se realizó un análisis de varianza desbalanceado de un factor, con 12 tratamientos (los cuales fueron las unidades de ladera ya mencionadas) (Sokal y Rolf, 1980).
  - ix) Con la serie de datos del componente 1 del análisis de componentes principales de la profundidad de 20 cm, se realizó un análisis de varianza desbalanceado de un factor con 12 tratamientos (siendo estos, las unidades de ladera ya mencionadas) (Sokal y Rolf, 1980).
  - x) Se realizaron análisis de varianza (ANOVAS) desbalanceados de una vía con 12 tratamientos (unidades de ladera) (Sokal y Rolf, 1983), con el objeto de encontrar diferencias estadísticas entre unidades de ladera, para cada una de las siguientes variables: pH, Materia orgánica, densidad aparente, porosidad, arenas, arcillas, limos, profundidad y capacidad de retención, (los datos de arenas, arcillas y limos fueron transformados a valores de arcoseno).
  - xi) Las comparaciones múltiples se llevaron a cabo con la prueba GT-2 (Sokal y Rolf, 1983).
  - xii) Se realizaron regresiones simples entre las variables: pH, Materia orgánica, densidad aparente, porosidad, arenas, arcillas, limos, profundidad y capacidad de retención,

(los datos de arenas, arcillas y limos fueron transformados a valores de arco seno) con el objeto de encontrar las relaciones entre variables.

- xiii) Los datos de cada variable, se ordenaron en dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm), se realizaron pruebas de t de student (Zar, 1984), para cada variable, con el objeto de encontrar diferencias entre las dos profundidades.

#### D) Sistema de Información Geográfica (ILWIS).

Los puntos de muestreo que se realizaron en campo, se ubicaron en el mapa topográfico (escala 1:10 000), y se digitalizaron. Con los datos de la propiedades físicas de los suelos se realizaron los mapas preliminares con el programa SURFER. Este programa interpola los valores suponiendo un espacio homogéneo. Los mapas resultantes se obtuvieron al redefinirse las unidades con base a la morfología de ladera. Se redigitalizaron los resultados y se obtuvieron los mapas de distribución de área por rango, y el área para cada valor de distribución.

### RESULTADOS

#### A) Características generales

En general, los suelos fueron someros ya que su profundidad estuvo entre 10 y 45 cm. La clase de profundidad que ocupó mayor área en la cuenca fue de 10 cm a 15 cm (con el 20.7% del área total). Por el contrario la clase que ocupó la menor área fue el rango de 30 a 45 cm (con el 5.9%). Los suelos fueron arenosos. Los porcentajes de arenas fluctuaron entre 50 y 80% y el rango que mayor área ocupó fue el de 70 a 80% (con el 41.8 % del área total), el rango de menor área fue el de menos de 45% de arenas (con el 5.7% del área total). Por lo anterior, el contenido de arcillas fue bajo y osciló entre 10 y 25%. El rango de 15 a 29% de arcillas ocupó la mayor área (con el 55.4% del área total) y el rango que ocupó menor área fue el de mayor a 25% de arcillas (con el 1.0%). También los porcentajes de limos fueron bajos, el porcentaje de limos osciló entre 5 y 20%. El rango de 5 a 10% de limos fue el que mayor área ocupó (con el 36% del área total). El porcentaje de capacidad de retención de agua en el suelo fue baja y osciló entre 5 y 40%. El rango que mayor área ocupó fue de 20 a 30% de capacidad de retención de agua (con el 34% del área total) y el rango que menor área ocupó fue el de 41 a 45% (con el 4.9% del área). El contenido de materia orgánica fue bajo y osciló entre 2 y 6%, dominó el rango de 2.5 a 3% (con el 32% del área total) y el rango que menor área ocupó fue el de 4 a 5% (con el 4.7%). La densidad aparente de estos suelos fue baja, el valor de densidad aparente dentro de la cuenca osciló entre  $0.9 \text{ gr cm}^{-3}$  y  $1.1 \text{ gr cm}^{-3}$ . El rango que mayor área ocupó fue el de  $0.95-1.105 \text{ gr cm}^{-3}$  (con el 50.7% del área total) y el rango que menor área ocupó fue de  $< 0.95 \text{ gr cm}^{-3}$  (con el 2.8%). La porosidad fue alta, la porosidad osciló entre 45 y 70% (tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de área que ocupó cada rango para cada variable (profundidad, contenido de arenas, contenido de arcilla, contenido de limos, capacidad de retención de agua, porcentaje de materia orgánica y densidad aparente).

Profundidad del suelo		Capacidad de retención de agua		Materia Orgánica	
Clases	(%)	Clases	(%)	Clases	(%)
0	15.53	0	15.97	0	16.97
10-15	20.73	0-10	7.30	2.0-2.5	12.81
16-20	17.76	10-20	37.71	2.6-3.0	32.49
21-25	12.18	20-30	20.30	3.1-3.5	23.82
26-30	16.96	30-40	10.23	3.6-4.0	2.74
31-35	1.33	>40	8.65	4.0-5.0	4.77
36-40	0.00			>5.0	7.16
41-45	4.91				
>45	10.56				
Arenas		Arcillas		Limos	
Clase	(%)	Clase	(%)	Clase	(%)
0	16.97	0	15.97	0	18.36
< 60	5.72	10-15	9.21	1-5	7.71
61-70	22.60	15-20	55.46	6-10	36.06
71-80	41.84	21-25	16.78	11-15	25.49
> 80	12.85	> 25	2.56	16-20	11.30
				> 25	> 25

Densidad Aparente	
Clase	(%)
Sin Suelo	17.45
<0.95	2.82
0.95-1.05	50.78
1.06-1.15	18.56
> 1.16	10.36

## B) Distribución espacial de las propiedades físicas de los suelos

La distribución de las propiedades físicas de los suelos dentro de la cuenca no fue homogénea debido a las características del relieve. La profundidad se distribuyó en un gradiente decreciente de la parte alta de la cuenca a su base. La zona de mayor profundidad se encontró ubicada en la porción alta de la cuenca (figura 1) (unidades 6, 7, 8 y 9). Por el contrario la zona con valores de menor profundidad se localizó en la porción media de la cuenca (unidades 10, 11 y 12). La distribución espacial de los porcentajes de arenas presentó un gradiente con el descenso de altitud, con un incremento en el porcentaje de arenas. La zona con mayor porcentaje de arenas se localizó en la parte baja y media de la cuenca (unidades 1, 2, 9, 10, 11, 12 y 13) (Figura 2). Por el contrario, la zona con menor porcentaje de arenas se localizó en la parte alta de la cuenca (unidades 6, 7, 8, y 9). La distribución espacial del contenido de arcillas siguió el patrón inverso de las arenas ya que el mayor porcentaje de arcillas se presentó en las unidades de ladera 6, 7 y 8 (figura 3). La distribución espacial de los limos fue muy aleatoria, se encontró una distribución heterogénea. La zona con mayores porcentajes de limos se localizó en la parte alta de la cuenca (unidades 5, 6, 7, 8 y 9; figura 4). La distribución de la capacidad de retención de agua. Es heterogénea formando parches. La parte de la cuenca con mayor capacidad de retención de agua se localizó en la porción alta de la cuenca (unidades 6, 7 y 8; figura 5).

La distribución espacial de la materia orgánica fue heterogénea (mayor número de parches). La zona que presentó el mayor porcentaje de materia orgánica se localizó en la porción baja de la cuenca (unidades 1 y 14; figura 6). La distribución espacial de la densidad aparente fue relativamente homogénea. La zona con los valores más altos de densidad aparente se localizó en la parte baja de la cuenca (unidades 12 y 13; figura 7).

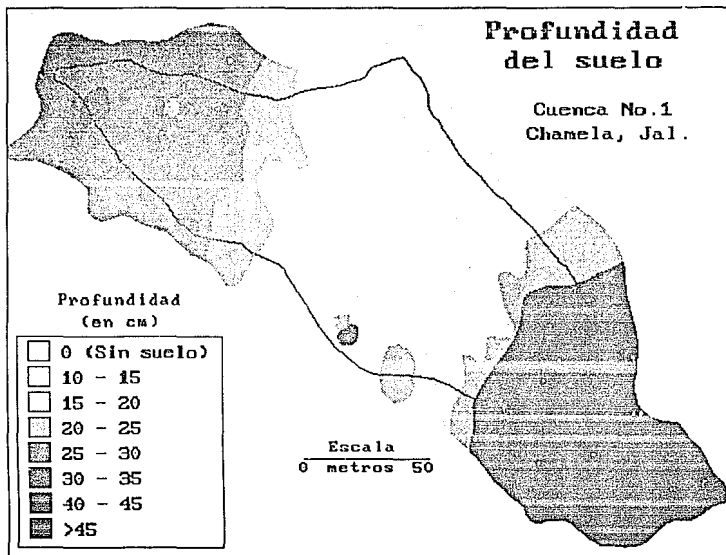


Figura 1. Mapa de distribución de las clases de profundidad del suelo en la cuenca 1, Chamela, Jalisco México.

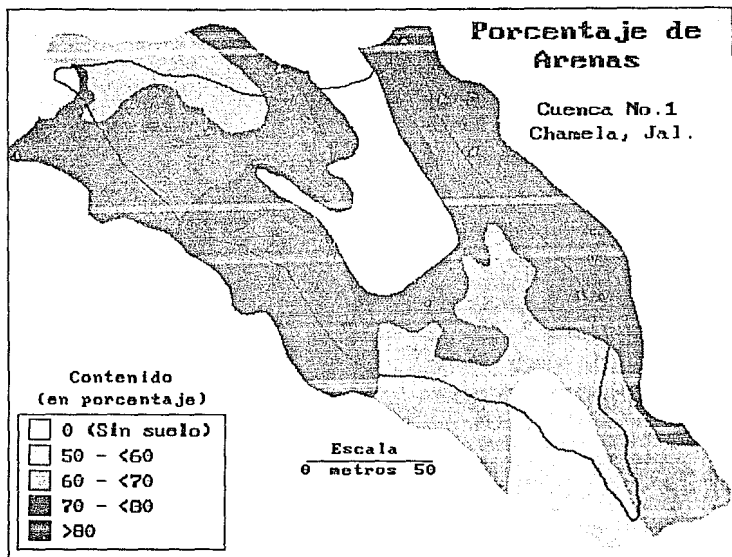


Figura 2. Mapa de distribución de las clases de porcentajes de arenas en la cuenca 1, Chamela, Jalisco, México.

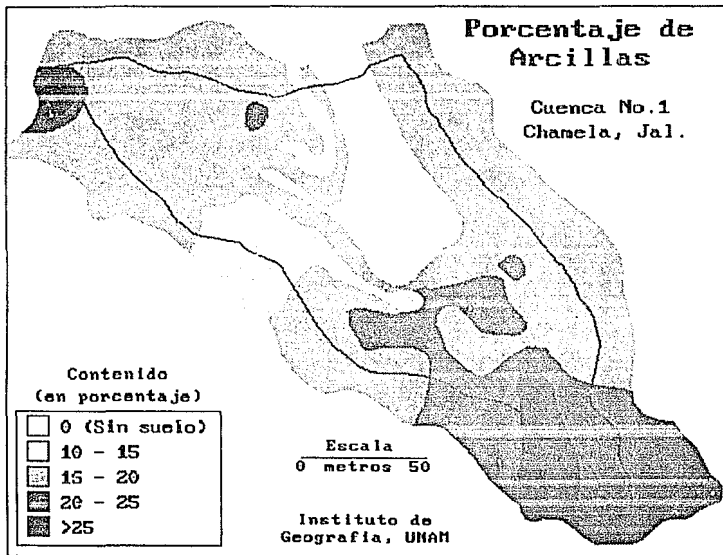


Figura 3. Mapa de distribución de las clases de porcentajes de arcillas en la cuenca 1, Chamela, Jalisco, México.

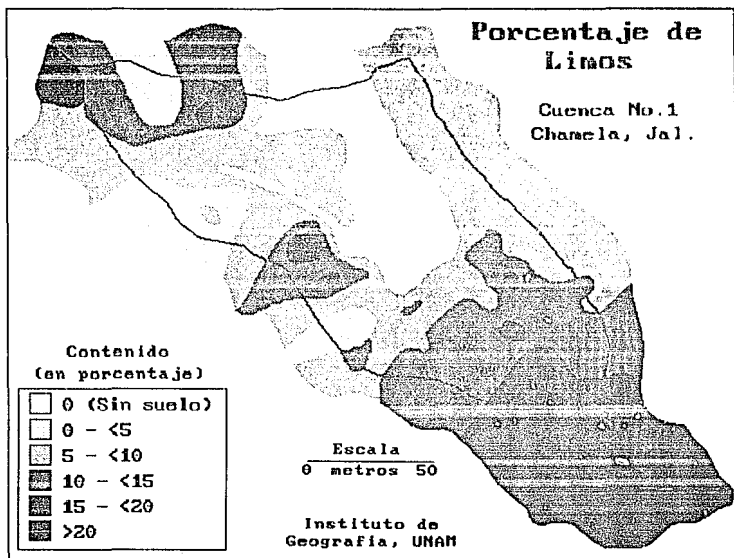


Figura 4. Mapa de distribución de las clases de porcentajes de limos en la cuenca 1, Chamela, Jalisco, México.



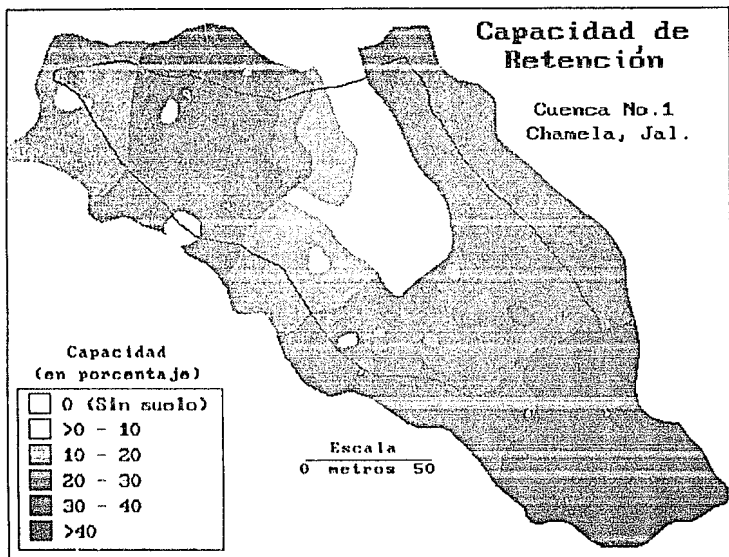


Figura 5. Mapa de distribución de las clases de capacidad de retención de agua en el suelo en la cuenca 1, Chamela, Jalisco, México.

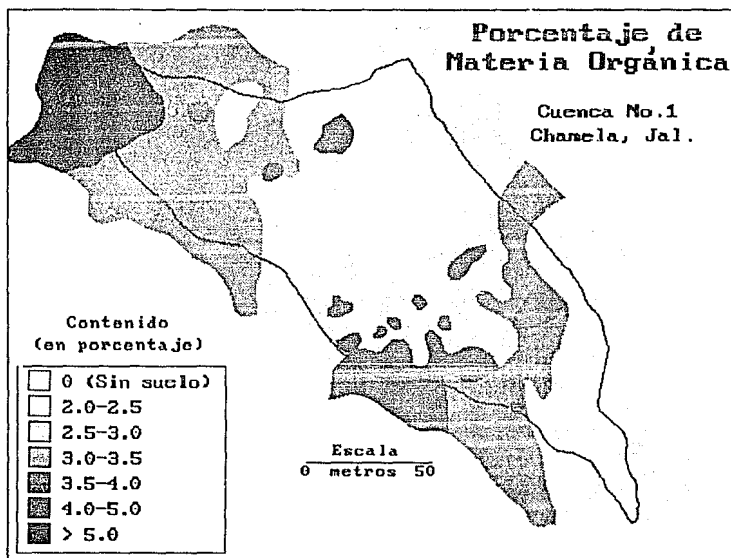


Figura 6. Mapa de distribución de las clases del contenido de materia orgánica (porcentaje) en la cuenca 1, Chamela, Jalisco, México.

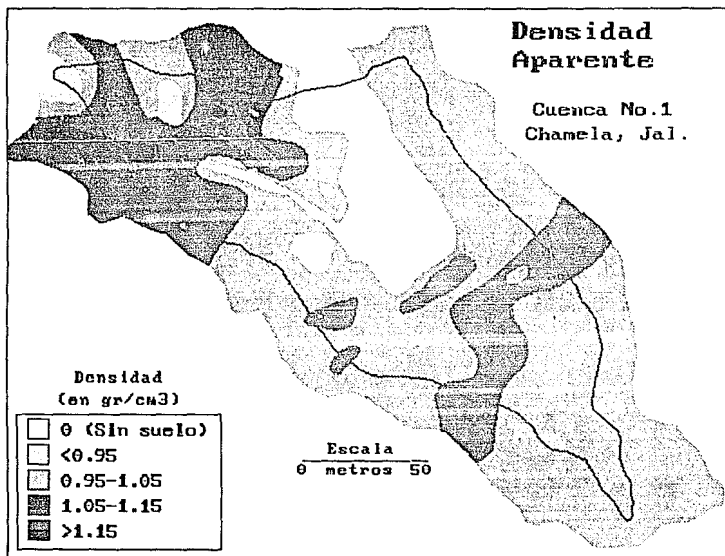


Figura 7. Mapa de distribución de las clases de densidad aparente (gr cm<sup>-3</sup>) en la cuenca 1, Chamela, Jalisco, México.

### C) Variación de las propiedades físicas de los suelos al interior del perfil

En relación a las características físicas de los suelos, las unidades 1, 2, 3 y 4 no presentaron un patrón gradual creciente ó decreciente pendiente abajo. Sin embargo, debido a los rompimientos de pendiente se presentaron altos porcentajes de arenas y en consecuencia disminuyó el contenido de arcillas pendiente abajo. Como se mencionó en el capítulo 1, estas fueron laderas heterogéneas con gran número de rompimientos de pendiente. En cambio en las unidades 12 y 13 (unidades homogéneas) existió un aumento en el porcentaje de arenas pendiente abajo, en consecuencia disminuyó el porcentaje de arcillas y su capacidad de retención de agua ladera abajo. Estas laderas fueron planas y con menor número de rompimientos de pendiente. Por el contrario en las unidades 5, 6 y 7 presentaron patrones graduales del decrecimiento de arenas y aumento de arcillas ladera abajo.

No todas las variables presentaron un patrón creciente o decreciente pendiente abajo. Por ejemplo, la materia orgánica y el pH fueron de distribución dispersa y dependientes de los elementos bióticos, en consecuencia presentaron gran variabilidad en su distribución dentro de la cuenca (mayor número de parches) (figura 8).

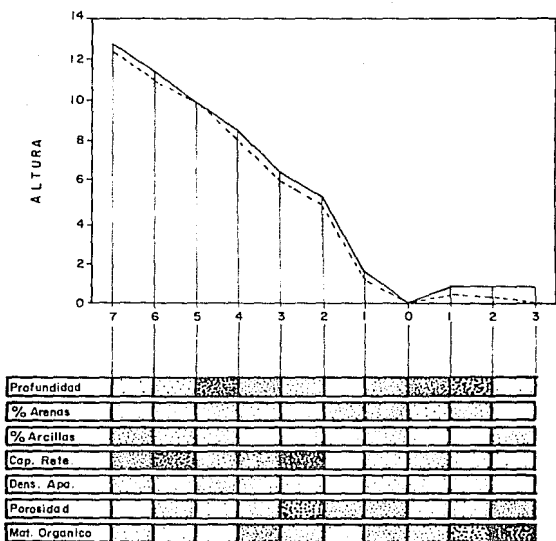


Figura 8. a) Distribución y variabilidad de las características físicas de los suelos al interior de cada unidad de ladera. (los numeros representan la inclinación de la pendiente), unidades de ladera 1 y 14.

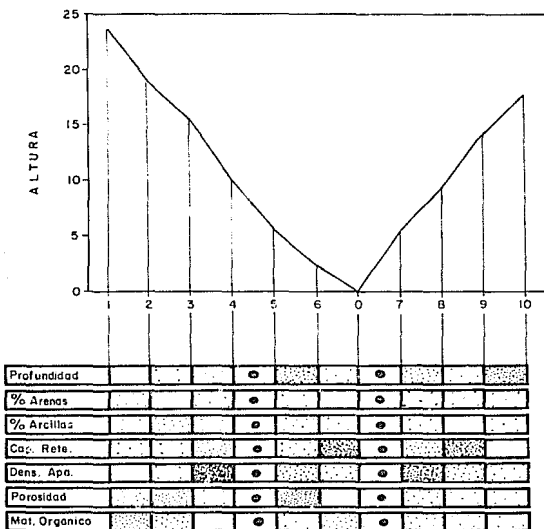


Figura 8. b) Distribución y variabilidad de las características físicas de los suelos al interior de cada unidad de ladera. (los numeros representan la inclinación de la pendiente), unidades de ladera 2 y 13.

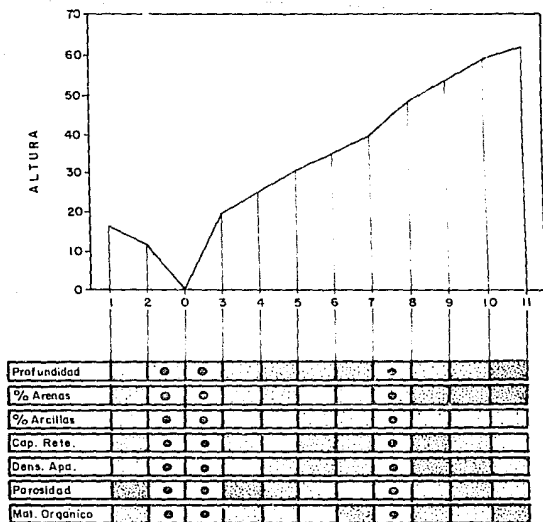


Figura 8. c) Distribución y variabilidad de las características físicas de los suelos al interior de cada unidad de ladera. (los numeros representan la inclinación de la pendiente) unidad de ladera 12.

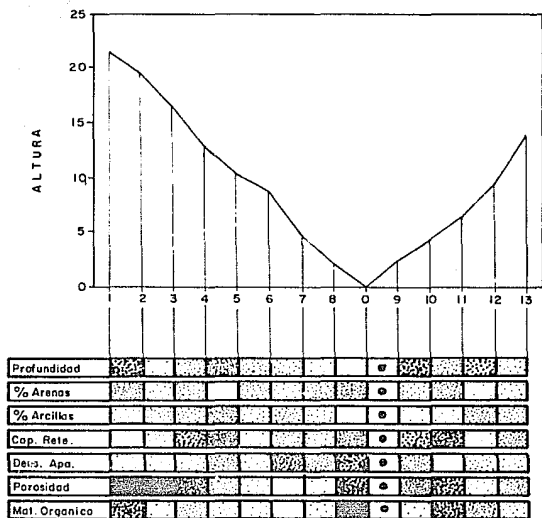


Figura 8. d) Distribución y variabilidad de las características físicas de los suelos al interior de cada unidad de ladera. (los números representan la inclinación de la pendiente), unidades de ladera 4 y 10.



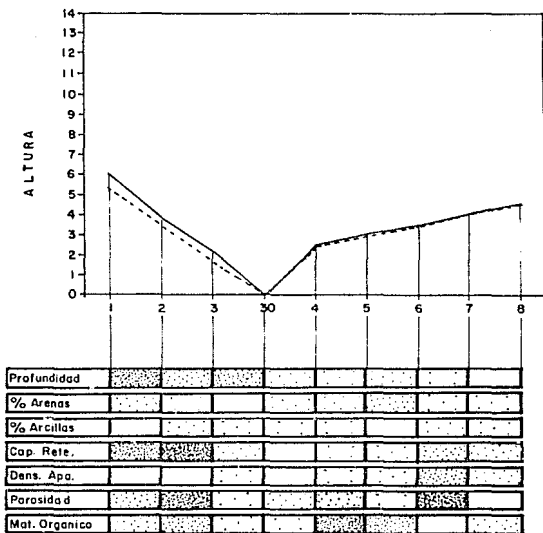


Figura 8. e) Distribución y variabilidad de las características físicas de los suelos al interior de cada unidad de ladera. (los numeros representan la inclinación de la pendiente), unidades de ladera 5 y 9.

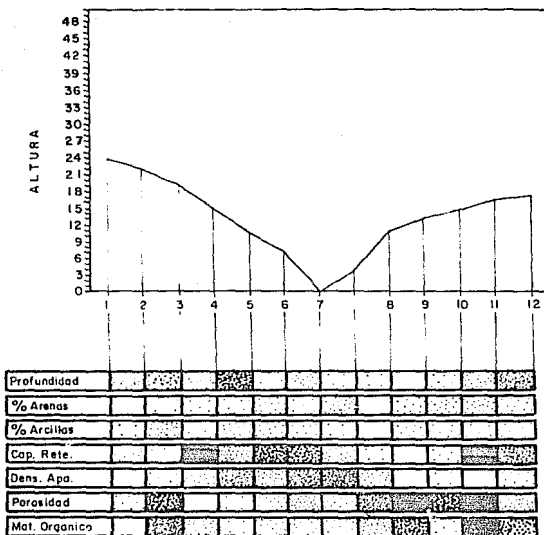


Figura 8. f) Distribución y variabilidad de las características físicas de los suelos al interior de cada unidad de ladera. (los numeros representan la inclinación de la pendiente), unidades de ladera 6 y 8.

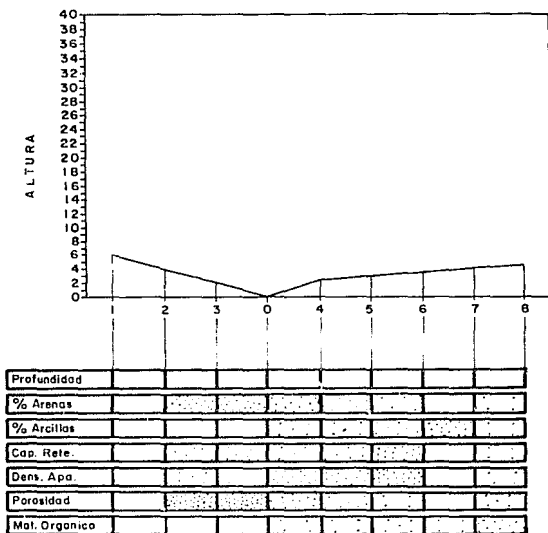


Figura 8 g. Distribución y variabilidad de las características físicas de los suelos al interior de cada unidad de ladera. (los numeros representan la inclinación de la pendiente), unidad de ladera 7.

**D) Variabilidad e interrelaciones de las propiedades físicas de los suelos**

En el análisis de componentes principales de la serie total (ambas profundidades), se encontró que el primer componente, los limos (20.6%) y la porosidad (23.7%) explicaron el mayor porcentaje de la variación, y el segundo componente fue explicado por la capacidad de retención (22.9 %) y la porosidad (20.5 %) (Figura 9 a). El análisis de componentes principales no produjo una ordenación con respecto a forma de ladera y profundidad (figura 9 b). En el ANOVA con el primer componente no se encontró diferencias significativas entre perfiles. Con la prueba de t de student, no se encontró diferencias entre ambas profundidades.

En la matriz de correlaciones múltiples con la serie total, las correlaciones más significativas fueron entre las arenas y las arcillas (0.766), la profundidad y las arenas (0.581), la profundidad y las arcillas (0.56), la profundidad y los limos (0.542) y densidad aparente y arenas (0.552) (Tabla 2).

**Tabla 2. Matriz de correlación de Pearson, con la serie de ambas profundidades.**

	Prof.	C Ret.	D.A.	Arenas	Arc.	Limos	Poros
Prof.	1.000						
C Ret.	0.179	1.000					
D.A.	0.385	0.211	1.000				
Arenas	0.561	0.051	0.552	1.000			
Arc.	0.542	0.049	0.408	0.766	1.000		
Limos	-0.138	-0.438	-0.041	-0.133	-0.134	1.000	
Poros.	0.229	-0.229	0.012	0.076	0.022	-0.056	1.000

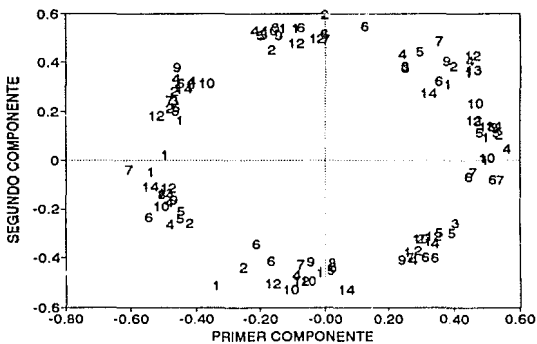
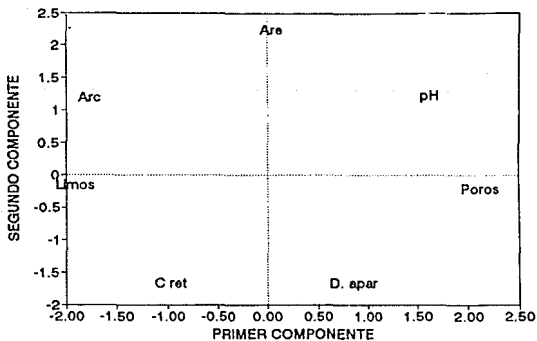


Figura 9. a) Ordenación de las variables a partir del análisis de componentes principales de la serie total. b) Ordenación de los eigenvalores con las unidades de ladera de la serie total (los números corresponden a las unidades de ladera).

En el análisis de componentes principales de la serie de datos de la profundidad de 10 cm, se encontró que en el primer componente, las arcillas (19.1 %) y limos (15.8 %) explicaron el mayor porcentaje de la variación y el segundo componente lo separaron densidad aparente (18.2 %) y arcillas (10.9 %) (Figura 10 a). En el análisis de componentes principales no se encontró una ordenación entre unidades de ladera con la profundidad (figura 10 b). Con el ANOVA del componente 1 no se encontraron diferencias significativas entre unidades de ladera.

En la matriz de correlaciones múltiples de la serie de profundidad de 10 cm, se encontró que las correlaciones significativas fueron entre las arcillas y los limos (0.745), las arenas y las arcillas (0.581), la capacidad de retención de agua y las arenas (0.522), la capacidad de retención de agua y los limos (0.595) y la materia orgánica se correlacionó de manera negativa con todas las variables (Tabla 3).

Tabla 3. Matrz de correlación de Pearson con los datos de la profundidad de 10 cm.

	Prof	C.R	D.A.	Aren	Arc	Lim	Por	pH	M.O
Prof	1.00								
C.R	0.36	1.00							
D.A.	0.13	0.26	1.00						
Aren	0.10	0.50	0.30	1.00					
Arc.	0.41	0.59	0.10	0.58	1.00				
Limo	0.41	0.59	0.07	0.32	0.73	1.00			
Por.	-0.1	-0.1	-0.4	-0.0	-0.1	-0.1	1.00		
pH	0.06	0.22	-0.1	-0.1	0.06	0.25	0.05	1.00	
M.O	-0,2	-0.3	-0.2	-0.0	-0.1	-0.1	0,12	-0.5	1.0

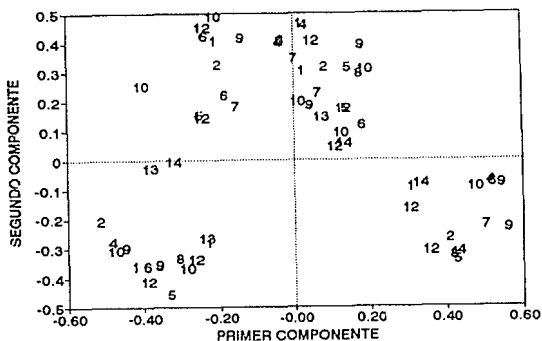
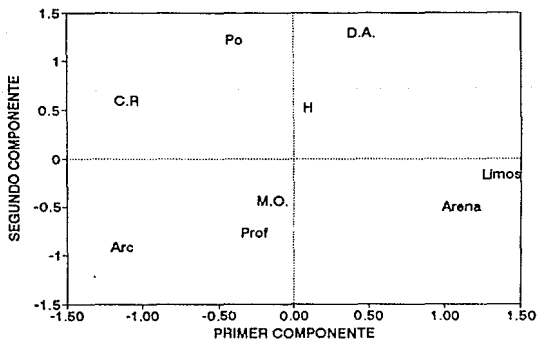


Figura 10. a) Ordenación de las variables a partir del análisis de componentes principales de la serie de la profundidad de 10 cm. b) Ordenación de los eigenvalores con las unidades de ladera de la serie de la profundidad de 10 cm (los números corresponden a las unidades de ladera).

En el análisis de componentes principales de la serie de 20 cm se encontró que en el primer componente las arcillas (20.1 %) y la capacidad de retención de agua (20.9 %) explicaron el mayor porcentaje de la variación y el segundo componente lo separaron las arenas (21.1 %) y los limos (20.6 %) (Figura 11 a). No se encontró una ordenación en función de las unidades de ladera y facetas (figura 11 b). En el ANOVA con el componente 1 no se encontraron diferencias significativas entre unidades de ladera. En la matriz de correlaciones múltiples de la serie de 20 cm, se encontró que las correlaciones significativas fueron entre la capacidad de retención de agua y las arcillas (0.598), la capacidad de retención de agua y los limos (0.522), las arcillas con los limos (0.781), las arenas con las arcillas (0.78) y la porosidad se correlacionó de manera negativa con todas las variables (Tabla 4).

Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson con la serie de la profundidad de 20 cm.

	C.Ret	D.A.	Arena	Arc.	Limos	Poros	pH
C. Ret	1.000						
D.A.	-0.093	1.000					
Arena	0.276	0.254	1.000				
Arc.	0.598	-0.132	0.562	1.000			
Limos	0.522	-0.085	0.512	0.781	1.000		
Poros	-0.196	-0.229	-0.074	-0.188	-0.080	1.000	
pH	0.032	-0.179	0.137	0.184	0.218	-0.359	1.000

En el análisis de varianza para cada parámetro fue altamente significativo ( $p = 0.001$ ), la profundidad ( $r^2=0.77$ ), porcentaje de arenas ( $r^2=0.64$ ), porcentaje de arcillas ( $r^2=0.42$ ) y capacidad de retención de agua ( $r^2=0.52$ ). Por el contrario los análisis de varianza con la densidad aparente, la porosidad, la materia orgánica, el pH y el porcentaje de limos no fueron significativas estadísticamente (Tabla 5).



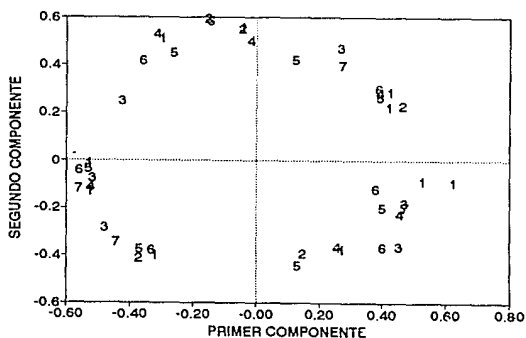
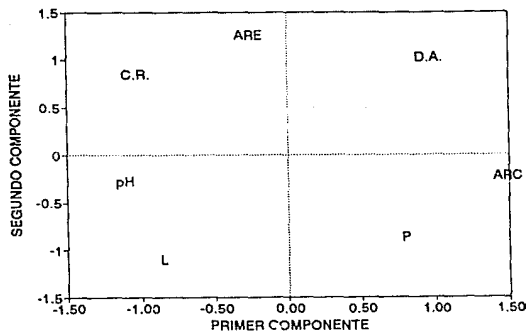


Figura 11. a) Ordenación de las variables apartir del análisis de componentes principales de la serie de la profundidad de 20 cm. b) Ordenación de los eigenvalores con las unidades de ladera de la serie de la profundidad de 20 cm (los números corresponden a las unidades de ladera).

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Tabla 5. Análisis de varianza ( $R^2$  y p) de cada variable.

Variable	$R^2$	p
Profundidad	0.77	0.0001
Arenas	0.64	0.0001
Arcillas	0.42	0.0001
Capacidad Retención	0.52	0.0001
Materia Orgánica	0.26	0.10
Densidad Aparente	0.24	0.25
Pcrosidad	0.21	0.25
pH	0.25	0.50
Limos	0.03	0.50

Con respecto a la profundidad del suelo, sólo la ladera 7 fue significativamente más profunda con respecto a las otras laderas. Sin embargo, se observó una tendencia en la disminución de la profundidad de acuerdo a la altitud de la cuenca (figura 12 a). El porcentaje de arenas presentó el mismo patrón que el encontrado en el mapa. Con la prueba de comparaciones múltiples (prueba de GT2), se encontró que se formaron tres grupos diferentes: la ladera 13 presentó un alto porcentaje de arenas (74%), la ladera 7 presentó el valor promedio más bajo (56%) y un grupo intermedio formado por el resto de las laderas (figura 12 b). En las comparaciones múltiples con el porcentaje de arcillas se encontraron 7 grupos dependiendo de la altitud y orientación: las laderas en la parte alta norte (5) y baja sur (1) son las que presentaron mayor porcentaje de arcillas y la parte baja norte (unidades de ladera 12 y 13; figura 13 a).

La distribución de la capacidad de retención de agua fue similar a lo encontrado en la distribución de la profundidad del suelo, donde la ladera 7 tuvo una mayor profundidad y en consecuencia mayor capacidad de retención de agua en relación a las otras unidades de ladera (figura 13 b).

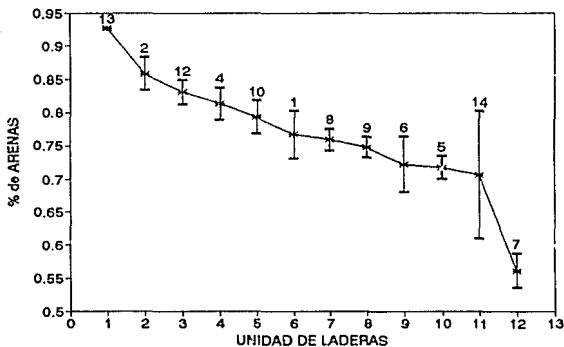
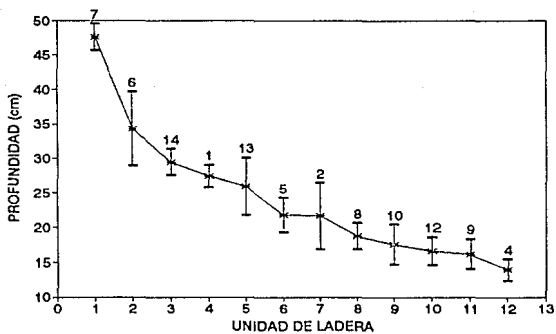
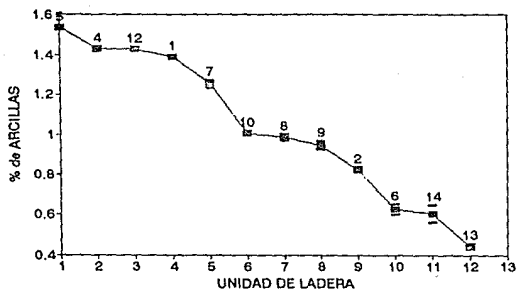


Figura 12. a) Media y error estándar de la profundidad del suelo y b) Porcentaje de arenas, para cada unidad de ladera.



UNIDAD DE LADERA

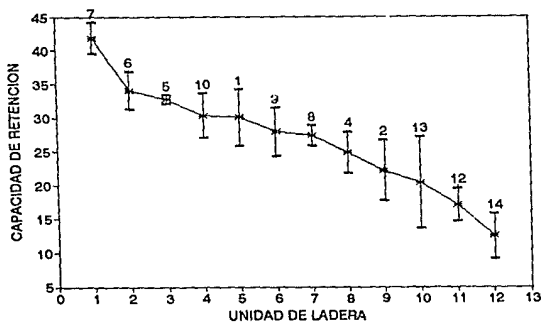


Figura 13. a) Media y error estándar del porcentaje de arcillas y b) capacidad de retención de agua en el suelo, para cada unidad de ladera.

**Tabla 6. Regresiones simples entre las variables (arenas, arcillas, profundidad, densidad aparente, limos, materia orgánica y capacidad de retención).**

Variablen	P	R <sup>2</sup>	m	a
pH-Materia Orgánica	0.680	0.01	- 0.11	4.26
D. Aparente-Porosidad	0.002	0.20	-28.65	83.91
Profundidad-M. Orgánica	0.103	0.04	- 0.01	3.94
Arenas-Porosidad	0.594	0.04	- 0.04	55.98
Profundidad-Arcillas	0.000	0.16	0.15	7.47
D.Aparente-M. Orgánica	0.291	0.07	- 2.94	6.59
Profundidad-C.Retención	0.002	0.13	0.39	12.45
Arcillas-C.Retención	0.000	0.35	1.46	10.66
Profundidad-Arenas	0.409	0.01	0.08	37.08
Arcillas-Porosidad	0.290	0.01	- 0.18	56.24
Profundidad-Porosidad	0.229	0.02	- 0.07	56.02
Arcillas-M.Orgánica	0.148	0.03	- 0.04	4.00
Profundidad-D.Aparente	0.288	0.01	0.00	1.14
Porosidad-C.retención	0.394	0.01	- 0.19	37.38

En las regresiones simples entre las variables se encontró bajos valores de correlación. Las relaciones significativas lo fueron entre densidad aparente y porosidad ( $R^2=0.20$ ), profundidad y porcentaje de arcillas ( $R^2= 0.16$ ), profundidad y la capacidad de retención ( $R^2=0.13$ ), arcillas y capacidad de retención ( $R^2=0.35$ ) (Tabla 6).

#### Profundidad

Con las pruebas de t de Student se encontraron diferencias significativas entre las profundidades del suelo (0-10 y 10-20 cm) para la densidad aparente, siendo mayor en la profundidad de 20 cm ( $p= 0.001$ ) y la porosidad, decreciendo esta con la profundidad ( $p=0.005$ ). Las variables restantes no fueron significativas estadísticamente, sin embargo, se observaron las siguientes tendencias. Con el aumento de la profundidad en el suelo aumenta la capacidad de retención, la densidad aparente y el porcentaje de limos. Por el contrario, se observó una disminución de materia orgánica, arenas, porosidad y pH (tabla 8).

Tabla 8. Valor de la media de las variables en dos profundidades (0-10 y 10-20cm).

Prof.	Arenas	Arcilla	Limos	C. Ret.	Poros.	D.A.
0-10	43.69	37.22	11.01	26.80	54.25	1.03
10-20	42.88	39.00	12.21	27.75	51.77	1.10

#### DISCUSION

##### A) Distribución espacial de las características físicas del suelo

Existen numerosos trabajos que reportan la distribución de la propiedades físicas de los suelos entre diferentes sustratos geológicos, encontrando diferencias *a priori*, los cuales no integraron el arreglo espacial de las características morfológicas del relieve. Por el contrario, existen trabajos que evaluaron la distribución de las propiedades físicas de los suelos que integran el arreglo espacial del relieve y sólo se limitan a la distribución de la propiedades físicas de los suelos a nivel ladera.

La distribución espacial de las propiedades físicas de los suelos fue el resultado de la configuración del relieve. Se observó que existe una regionalización de las características físicas de los suelos dentro de la cuenca, explicadas por la distribución espacial de morfología de laderas, su altura, su longitud, la inclinación de pendiente y su curvatura. Las unidades 1, 2, 3 y 4, porción baja de la cuenca y orientada al sur, fueron las unidades con mayor variabilidad en la distribución de sus propiedades físicas, explicado por su mayor número de rompimientos de pendiente.

Las unidades 10, 12 y 13 con morfología convexa y lineal-convexa con marcada inclinación, presentaron tendencias de poca variación pendiente abajo. Las diferencias de la distribución de partículas dentro de la ladera se explica en términos del movimiento de agua y su concentración en un sistema de ladera (Pennock y De Jong, 1987). Si en todos los puntos dentro de una ladera, se tuviera que evacuar el mismo volumen, el caudal aumentaría en función de la distancia del parteaguas. En una vertiente de forma rectilínea, esto significa que la profundidad del agua que fluye, aumentará de forma progresiva en dirección descendente (Young, 1969).

La curvatura de ladera afectó la distribución de las propiedades físicas de los suelos. En las laderas convexas la velocidad de escurrimiento del agua se incrementa, permite una menor infiltración, aumento en el escurrimiento y la cantidad de pérdida de suelo. En laderas cóncavas, la velocidad del escurrimiento decrece con la disminución de la inclinación de la pendiente, disminuye la capacidad de transporte de agua y de la cantidad de suelo (Young, 1969). La combinación de la longitud, inclinación de la pendiente y la curvatura de la ladera influye en

el escurrimiento y la erosión de suelos, los cuales a su vez determinan la magnitud de los procesos la redistribución de partículas dentro de la ladera. Las relaciones longitud e inclinación de pendiente han sido más estudiadas y se ha observado que un aumento en ambos elementos promueve menos infiltración y mayor erosión (Young, 1969).

Las diferencias en la distribución de las características físicas de los suelos que se observaron entre unidades de ladera se explican con el parámetro de los diefrentes niveles de base de cada unidad de ladera y diferencia en la configuración de la red de drenaje, lo que trae como consecuencia que cada unidad de ladera diferente capacidad potencial de evacuación de caudales de agua y suelo.

#### B) Variabilidad de las características físicas del suelo al interior del perfil

Los cambios punto a punto dentro de una ladera de las propiedades físicas del suelo frecuentemente parecen estar distribuidos gradualmente, sin embargo, la variación de las propiedades físicas del suelo en un sistema de ladera es abrupta. Esto es debido a que las características morfológicas al interior de una unidad de ladera no se distribuyeron regularmente, modifican la distribución de dichas propiedades.

La variabilidad de la distribución de las propiedades físicas de los suelos que existe al interior de cada perfil es explicada por la microtopografía de cada unidad de ladera (Anderson y Furley, 1975). Las propiedades de los suelos al interior de cada ladera se relacionó con la inclinación de pendiente. Necesariamente la heterogeneidad morfológica de una ladera estuvo dada por el número de rompimientos de pendiente, por lo tanto, las unidades de ladera heterogéneas (unidades 1, 2, y 4), presentaron valores altos de profundidad de suelo, porcentaje de arcillas y capacidad de retención que fueron similares a la parte alta de la cuenca (laderas con menor gradiente de inclinación). En cambio, en las laderas con menor número de rompimientos de pendiente (unidades 5, 6, 7, 8, y 9), la distribución de las propiedades físicas de los suelos fue gradual. Los rasgos del relieve controlan procesos como la pedogenésis y la transmisión de agua (Anderson y Furley, 1975). Los cambios abruptos de las propiedades de los suelos son el resultado de un cambio repentino de la velocidad de escurrimiento al interior de una ladera y de los factores que controlan la formación del suelo y las propiedades morfológicas del relieve (Burrough, 1983). Por lo tanto la variación al interior del perfil puede relacionarse con procesos de erosión-depositación. Lo que puede generar una marcada discontinuidad en la secuencia de las características de los suelos sobre la ladera (unidades de ladera 1, 2, 11, 12 y 13). Las interrelaciones entre las diferentes propiedades produce un patrón complejo de variación pendiente abajo, el cual es difícil de interpretar. Por ejemplo, en las unidades más inclinadas existe un aumento en los porcentajes de arenas pendiente abajo. Por el contrario en las unidades donde la

inclinación de la pendiente es menor existe un decremento del contenido de arenas pendiente abajo porque son unidades de ladera estables desde el punto de vista geomorfológico (unidades 5, 6, 7 y 8).

En zonas que presentan rompimientos de pendiente existen procesos de erosión-depositación de manera simultánea. Por lo tanto la distribución es abrupta. Es decir, no existe un gradiente dentro de la ladera. En estos casos dominan procesos geomorfológico y edáfico de manera simultánea.

Por el contrario la parte media y baja de la cuenca (unidades 3, 4, 12 y 13) son las zonas con menor profundidad. Estas unidades presentaron los mayores porcentajes de arenas y menores porcentajes de arcillas (franco-arenosa). García-Oliva (1992), encontró que en laderas de mayor inclinación, dominan las arenas, resultado del proceso de erosión, es decir mayor pérdida de arcillas y lógicamente mayor contenido de arenas. En laderas homogéneas (sin rompimientos de pendiente) e inclinación de pendiente marcada, dominan exclusivamente procesos geomorfológicos (erosión, unidades 12 y 13), por lo tanto tenemos una distribución gradual de las arenas ladera abajo.

Las unidades 6, 7 y 8 sin inclinación de pendiente marcada y sin rompimientos de pendiente, no se observó la existencia de procesos geomorfológicos dominantes. Los procesos dominantes son edáficos, es decir procesos formadores de suelo. Las unidades 6 y 7 están caracterizadas por una mayor profundidad del suelo. La clase textural que domina es arena franca, lo cual significa que tiene un incremento en el contenido de arcillas con respecto a las unidades de la porción baja de la cuenca.

Es decir, existe una dinámica diferencial en la magnitud de los procesos que se dan en una ladera producto de la longitud, inclinación de pendiente, curvatura y la frecuencia de cambio de cada una de estos parámetros. Las propiedades físicas de los suelos y la morfología no son ejemplos ideales de procesos aleatorios (Burrough, 1983), ya que tiene niveles de variación anidados (curvatura, longitud e inclinación de pendiente). Por lo tanto las relaciones entre estos niveles anidados están controlados por la importancia y la escala de los procesos geomorfológicos y los factores formadores del suelo (Burrough, 1983).

## C) Interrelaciones de las variables

### a) Texturas

Las interrelaciones de las variables dentro de la cuenca se presentaron en función de la heterogeneidad espacial del relieve. La curvatura y la inclinación de la pendiente controlan la profundidad del suelo dentro de la cuenca.

La profundidad de estos suelos fueron similares a los reportados para otras zonas tropicales y fueron similares en cuanto a la textura, suelos arenosos (60% de arenas) (Lal, 1987). En relación a la profundidad, cabe mencionar que las unidades 1 y 2 son más profundas de lo que uno esperaría por su mayor gradiente de pendiente. Sin embargo, el mayor número de cambios del ángulo de



pendiente permiten una mayor heterogeneidad de la morfología, promoviendo así que ciertos puntos presenten mayor profundidad.

Los suelos de textura gruesa permitió una alta porosidad favoreciendo un adecuado balance de agua-aire, en contraste ofrecen propiedades nutricionales pobres (Lal, 1989). García-Oliva (1992), reportó para esta zona, bajo contenido de nutrientes debido principalmente al bajo contenido de materia orgánica.

La distribución de contenido de arcillas en la profundidad es similar al reportado para otras zonas tropicales en Nigeria, las arcillas aumentaron con la profundidad (Lal, 1989). El aumento de arcillas con la profundidad afecta la capacidad de retención de agua en el suelo verticalmente. La diferencia en los porcentajes de las arenas, las arcillas y los limos que existen entre y al interior de cada unidad de ladera modifican las características de conductibilidad hidráulicas de los suelos.

#### b) Capacidad de retención de agua

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en las regiones tropicales es baja la cual es similar a lo reportado para otras zonas tropicales. Existe una marcada variabilidad espacial de su contenido en el suelo, debido a la variabilidad del porcentaje de arcillas, las cuales promueven cambios en la retención de la humedad y propiedades de transmisión (infiltración y conductibilidad hidráulica).

Sin embargo, las propiedades de densidad aparente, porosidad, pH y materia orgánica, tuvieron una distribución dispersa dentro de la cuenca, debido a que estas son dependientes de los factores bióticos.

#### c) Densidad aparente

Los valores de densidad aparente obtenidos en este trabajo ( $0.80-1.25 \text{ gr cm}^3$ ) son similares a los reportados para otras zonas tropicales en Nigeria (Lal, 1989). Los valores de densidad aparente aumentan con la profundidad por la disminución del contenido de materia orgánica. Lo anterior se afirma con los análisis de regresión, en el cual se encontró que existen relaciones inversas entre la profundidad y contenido de materia orgánica y la densidad aparente y la materia orgánica. La densidad aparente es mayor en las unidades 2 y 13, debido al mayor contenido de arenas. Sin embargo, en la unidad 12 que tiene un alto contenido de arenas, la densidad aparente es menor, debiéndose principalmente al mayor contenido de materia orgánica. Existe mayor densidad aparente con el aumento de profundidad ya que se presenta una disminución de la materia orgánica y aumento de arcillas (García-Oliva, 1992). En la porción alta de la cuenca (unidades 6, 7, 9 y 10) se encuentran los valores de menor densidad aparente. La densidad aparente estuvo más influenciada por el aumento de arcillas, contrario a lo sucedido en la porción baja de la cuenca, donde la densidad aparente estuvo explicada por el contenido de materia orgánica.

#### d) Materia orgánica

Las unidades 2, 4, 12, 13 y 14 presentaron el mayor contenido de materia orgánica ( $101.65 \text{ ton ha}^{-1}$ ), que coincide con los valores señalados por Solís (1992). El incremento de la materia orgánica en los primeros 10 cm en estas laderas con mayor riesgo erosivo es inusual, sin embargo, debe explicarse por el mayor contenido de hojarasca en esta parte de la cuenca (Patiño, 1990). El contenido de la materia orgánica depende de las tasas de descomposición, Patiño (1990) encontró que las tasas de descomposición son menores ( $k=0.42$ ) en la parte baja y porción norte con respecto a la parte alta.

Existe un gradiente altitudinal en la distribución de la materia orgánica, el cual se relaciona con la producción de hojarasca Patiño (1990) encontró que en la parte baja existe mayor cantidad de mantillo de ( $3932 \text{ kg ha}^{-1}$  que en la parte alta  $4522 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Se observó una distribución del contenido de materia orgánica en función de la orientación, las unidades 10, 12, 13 y 14 orientados al norte, presentaron mayor contenido de materia orgánica, estos valores coinciden con los reportados por Solís (1992) encontró que en la porción norte existió mayor contenido de materia orgánica ( $80.61 \text{ kg ha}^{-1}$ ) que en la porción sur ( $66.52 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Esto se explica debido a que la producción de hojarasca fue mayor en el norte ( $8687 \text{ kg ha}^{-1}$ ) que en la porción sur ( $6597 \text{ kg ha}^{-1}$ ), también se observó que existe una variación en función del escalonamiento de la materia orgánica la parte alta presentó  $233.48 \text{ kg ha}^{-1}$  de materia orgánica en el escalón medio  $246.36 \text{ kg ha}^{-1}$  y en la porción baja ( $261.01 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

Las características físicas de los suelos que presentaron una respuesta en su distribución con la influencia de las características del relieve, fueron la profundidad, el contenido de arcillas, el contenido de arenas y la capacidad de retención de agua en el suelo. La curvatura total de la unidad de ladera y el gradiente de pendiente son los factores del relieve que controlaron la profundidad de suelo, en laderas con poca dinámica geomorfológica (erosión-depositación), permitieron el desarrollo de un perfil arcilloso, como en las unidades de ladera 5, 6 y 7. Como la capacidad de retención de agua en el suelo esta en función de la profundidad y el contenido de arcillas (Brady, 1974), las zonas con mayor profundidad, presentaron mayor contenido de arcillas y mayor capacidad de retención de agua en el suelo. Por el contrario el contenido de materia orgánica y el pH presentaron una distribución heterogénea dentro de la cuenca, ya que estas, están explicadas por la distribución de la vegetación y la actividad microbiana (Lal, 1987). El contenido de materia orgánica modificó las características de la densidad aparente y la porosidad. Un aumento del contenido de materia orgánica promueve un aumento en la porosidad, por el contrario la disminución en el contenido de materia orgánica promueve un aumento de la densidad aparente y porosidad (Lal, 1987).

## D) Implicaciones de la distribución, interrelaciones y variabilidad de las características físicas de los suelos

En primer lugar el tipo de suelo determina algunos aspectos del ciclo de nutrientes, su transformación y la mineralogía. La capacidad de intercambio catiónico, el cual influye los patrones del ciclo de nutrientes minerales (Sollins, 1989).

Las diferencias de la textura afectan los cambios en el contenido de macroporos y la estructura del suelo, los cuales a su vez afectan la capacidad de retención de nutrientes (Sollins, 1989). La dinámica de flujos de nutrientes en los ecosistemas están controlados por los flujos de agua.

La porosidad afecta los flujos de agua y por lo tanto también el flujo de nutrientes. La presencia de macroporos y microporos produce dos efectos; a) en los macroporos, a través de los cuales el agua viaja rápidamente y tiene corto tiempo de residencia, producen un déficit de nutrientes y mayor lixiviación de ellos y b) los microporos a través de los cuales el agua viaja lentamente y su tiempo de residencia es mayor (Notercliff y Thornes 1990). Stone et al 1985 encontraron que las diferencias en la capacidad de retención son causadas por el efecto de la inclinación de la pendiente y su posición dentro del paisaje. Las porciones bajas de la ladera con pendientes suaves tienen mayor disponibilidad de agua que aquellas en posiciones de crestas en la misma ladera.

Las diferencias en las características de los suelos y en el nivel de base de cada unidad de ladera producen diferencias en los mecanismos de escurrimiento y en la red de drenaje. Las unidades de la porción alta de la cuenca tienen una alta capacidad de retención de agua, deben perder más rápidamente agua por escurrimiento, debido a la mayor densidad de cauce el cual provoca tener que recorrer menos tiempo sobre la ladera y llegar al cauce rápidamente. Por el contrario en las unidades de la porción baja de la cuenca la capacidad de retención es menor pero no tienen cauce, la diferencia del nivel de base es mayor y como en esta parte el flujo es subsuperficial tarda más tiempo en llegar al cauce.

La variabilidad y distribución de las propiedades físicas de los suelos influye la distribución de los recursos como agua y nutrientes, provocando así una distribución heterogénea de los recursos. El "aparchonamiento" de nutrientes disponibles bajo el terreno es análogo a la disponibilidad de recursos de los claros del dosel sobre el terreno.

La ciencia del suelo puede ser importante en los trabajos de ecosistemas particularmente en los mecanismos de intercambio y transferencia de nutrientes (Sollins, 1989).

La caracterización de las propiedades físicas de los suelos tiene importancia desde el punto de vista del uso del suelo, la dominancia de arenas y el bajo contenido de materia orgánica dan una estructura pobre a los suelos, lo que promueve una alta erodabilidad. La alteración de la vegetación natural tiene como consecuencia mayores riesgos de erosión y a su vez un marcado declinamiento en la profundidad de suelo y de la capacidad de

retención de agua (Lal, 1987).

#### REFERENCIAS

- Anderson, R. E. and P. A. Furley. 1975. an assessment of the relationship between the surface properties of Chalk soils and slope form using principal components analysis. *Journal of Soil Science*. 26: 130-143.
- Bouyoucos, G.J. 1963. Directions for making mechanical analysis of soils by hydrometer method. *Soil Science*. 32: 25-30
- Burrough, P.A. 1983. Multiscala sources of spatial variations in soil. I The application of fractal concepts to nested levels of soil variations. *Journal of Soil Science*. 34:577-597.
- Burrough, P.A. 1983. Multiscale source of spatial variation in soil. II a Non-Brownian fractal model and its application in soil survey. *Journal of Soil Science*. 34: 599-620.
- Daniels, R.B, J. W. Gilliam, D. K. Cassel and L. A. Nelson. 1987. Quantifying the effects of past soil erosion on present soil productivity. *Soil and Water Conservation*. 43: 183-187.
- Daniels, R.B, J. W. Gilliam, D. K. Cassel and L. A. Nelson. 1985. Soil erosion class and lanscape position in the North Carolina Piedmont. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 991-995.
- Gregorich, E. G. and D. W. Anderson. 1985. Effects on cultivation and erosion on soils of four toposequences in the canadian prairies. *Geoderma*. 36: 343-354.
- Jackson, R. B., J. H. Manwaring and M. M. Cadwell. 1990. Rapid physiological adjustment of roots to localized soil enrichment. *Nature*. 334: 58-60.
- Lal, R. 1987. *Tropical Ecology and Physical Edaphology*. John Wiley & Sons. pp 732.
- Milne, B. T. 1992. Spatial aggregation and neutral models in fractal landscapes. *American Naturalist*. 139: 22- 57.
- Nelson, D.W. and L. Sommers. 1982. "Total carbon and organic matter", In: *Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties*. A. L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds). Agronomy 9, part 2, American Society of Agronomy inc. and Soil Science society of America,

- Madison. pp: 539-579.
- Pennock, D:J: and E. De Jong. 1987. The influence of slope curvature on soil erosion and deposition in Hummock terrain. *Soil Science*. 144: 209-217
- Stone. J. R., J. W. Gilliam, D. K. Cassel, R. B. Daniels, L. A. Nelson and H. J. Kleis. 1985. Effect of soil erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:987-991
- Sokal, R. and F. Rohlf. 1981. *Biometry*. W. H. Freeman and Company. USA. pp. 859.
- Turner, M. G. 1989. Landscape ecology. The effect of pattern on process. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 20: 171-197.
- Trudgill, S. T. 1983. Soil Geography: Spatial techniques and geomorphic relationships. In: *Progress in Physical Geography*. pp. 343-360.
- Young, R.A. and C.A. Mutchler. 1969. Effect of slope shape on erosion and runoff. *American Society of Agricultural Engineers*. 12: 233-239.

**CAPITULO 3**

**INFLUENCIA DEL RELIEVE EN LA INCIDENCIA DE RAYOS SOLARES, HUMEDAD  
Y VEGETACION EN UNA CUENCA TROPICAL ESTACIONAL.**

## INTRODUCCION

Entre los factores climáticos que afectan la estructura y dinámica de los ecosistemas naturales están: la distribución de la humedad en el suelo en el tiempo y en el espacio y la radiación solar (Barradas, 1992). Del primero depende la sobrevivencia de las especies que lo forman y los mecanismos de toma de agua y los patrones de crecimiento de las especies que lo forman. En el caso particular de las selvas bajas caducifolias, los periodos de sequía, su duración y la frecuencia ejercen una fuerte influencia en el funcionamiento general del ecosistema (Barradas y Fanjul, 1985). El conocimiento del régimen de radiación es importante para concebir el régimen total de energía, el balance de radiación del bosque y la disponibilidad de radiación fotosintéticamente activa (radiación PAR). Estos parámetros gobiernan las tasas de transpiración y de fotosíntesis de las plantas (Barradas, 1991).

La principal entrada de energía a los ecosistemas es por medio de la radiación solar. La calidad de la radiación depende del ángulo formado entre los rayos solares y la superficie de captación. La mayor energía se presenta cuando este ángulo es de 90°. Los principales factores que modifican el ángulo de incidencia son la latitud y el relieve.

La calidad de la energía incidente influye en el balance hídrico de un ecosistema (Dunne and Leopold, 1978) y su productividad primaria (Larcher, 1975). Cuando aumenta la incidencia de rayos solares y la radiación, la demanda evaporativa y las tasas fotosintéticas son también mayores. Sin embargo, en ambientes con limitantes hídricas existe un compromiso entre la fotosíntesis y el uso eficiente de agua (Field *et al.*, 1983).

Los elementos del relieve, la orientación y la inclinación de la pendiente de las laderas modifican el ángulo de incidencia de los rayos solares al interior de una cuenca y a su vez modifican la distribución de la radiación.

Las características del relieve, están entre los factores físicos principales que influyen en la distribución de parches de fertilidad, debido a que determinan las características físicas de los suelos (Turner, 1989), los regímenes de humedad y el sustrato geológico. (Basnet, 1991).

Lo anterior sugiere, la existencia de mosaicos de vegetación, resultado de la formación de parches de recursos. La distribución y establecimiento de la vegetación está ligada a las características del relieve. Ya que influye la distribución de las características edafológicas, las cuales controlan en gran medida la disponibilidad de agua y la capacidad de almacenamiento de nutrientes en el complejo arcilla-humus, disponibles para el crecimiento de las plantas y estas a su vez en la distribución de especies individuales.

El objetivo de este trabajo es analizar como influye la distribución del agua en el suelo y la incidencia de rayos solares en el establecimiento de la vegetación.

## METODO

### A) Modelo de incidencia de rayos solares

Como estimador de la intensidad de la radiación se utilizó el seno del ángulo formado entre los rayos solares a las 12:00 hrs y la superficie terrestre. Cuando el seno de este ángulo es de 1, los rayos están perpendicular a la superficie del terreno. A partir del movimiento aparente del sol se estimó la marcha anual del seno de este ángulo (se utilizaron los equinoccios y solsticios, por que son las fechas que presentan mayores contrastes a lo largo del año). La marcha se elaboró para dos factores principales: la pendiente (0°, 2°, 4°, 8°, 16°, 20°, 30° y mayores a 40°), que corresponden a las clases de pendientes que existen dentro de la cuenca y la dos orientaciones dominantes (norte y sur) (figura 1).

Para la latitud de 19°, el solsticio se presenta el 7 junio. El movimiento aparente del sol es de 0.25489° por día.

La incidencia solar se obtuvo con la siguiente función:

$$Y = 90^\circ - (X * 0.25489) \text{ donde:}$$

Y = ángulo de incidencia solar.

X = número de días a partir del 7 de junio.

La incidencia de rayos solares para la diferente orientación y gradiente de pendiente se estimó con la siguiente expresión:

$$\text{seno } a = (Y \pm \text{Inclinación de la Pendiente})$$

El signo depende de la orientación de acuerdo al movimiento aparente del sol de la siguiente manera:

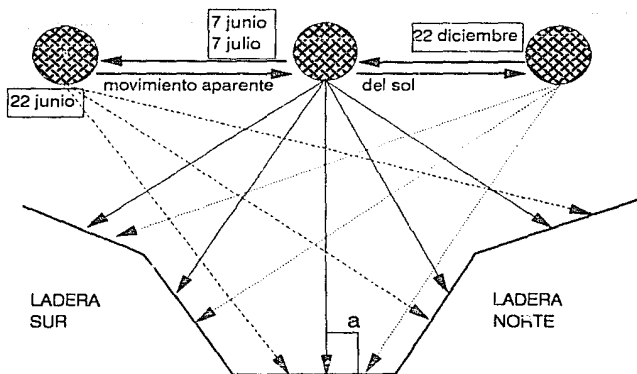
	22 Marzo	22 Junio	7 Julio	22 Sep.	22 Dic.	22 Marzo
N	-	+	-	-	-	+
S	+	-	+	+	+	-

### B) Sistema de Información Geográfica (SIG) (capítulo 1).

Se elaboraron 5 mapas de incidencia de rayos solares de 5 fechas diferentes en el año, apartir de:

- El mapa de pendientes (ver capítulo 1, figura 2).
- El mapa de orientación (ver capítulo 1, figura 3).
- Los datos de incidencia de rayos solares para cada clase de pendiente y orientación.
- Se elaboró una matriz con los datos anteriores y se realizaron cruzamientos de los valores de la matriz, para obtener los mapas de distribución de incidencia de los rayos solares en una cuenca para cinco fechas diferentes.





ANGULO DE INCIDENCIA DE RAYOS SOLARES  
CHAMELA, JALISCO (19° 29' N)

Figura 1. Modelo de incidencia de rayos solares, para la latitud de 19° 29' (Chamela, Jalisco, México).

### C) Humedad

Para la determinación del contenido de humedad se instalaron 48 cubos de Boyoucos hacia el interior de la cuenca, divididos de la siguiente manera: 16 por cuadro (Alto, medio y bajo), en cada cuadro 8 por ladera (N y S) y 4 por profundidad (0-10 cm y 10-20 cm). Los datos utilizados corresponden a los años de 1989 y 1990. Los cubos de yeso se calibraron considerando la textura de los suelos en cada uno de los sitios. Para ello se tomaron muestras de suelo por ladera y profundidad en cada uno de los cuadros, para obtener su capacidad de campo y punto de marchitez permanente respectivamente. Se realizaron 12 calibraciones (Hillel, 1980).

### D) Muestreo de campo

Se realizaron tres transectos transversales al cauce en la cuenca. Los transectos se realizaron en la parte alta, media y baja de la cuenca, divididos en dos orientaciones (norte y sur). Los transectos fueron divididos en cuadros de 100 m<sup>2</sup> y en ellos se tomaron la frecuencia y el diámetro a la altura de pecho (DAP) de todos los árboles y arbustos dentro de los cuadros.

## RESULTADOS.

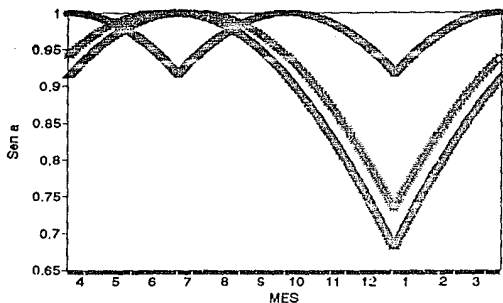
### A) Radiación

Se encontró que la marcha anual de la incidencia de rayos solares, para 0° de latitud (Ecuador) tiene dos descensos en el 22 de junio y 22 de diciembre (solsticios), puntos de la eclíptica en la cuál el sol alcanza su declinación máxima y mínima correspondiente a los trópicos. Los máximos valores de incidencia solar estuvieron en los equinoccios (22 de marzo y 22 de diciembre), fechas en la que el sol está sobre el ecuador. Para Chamela (latitud de 19°), considerando la incidencia a 0° de inclinación, se encontró que los valores máximos de incidencia de rayos solares, se presentan en el solsticio de verano (Trópico de Cancer) y tuvo un marcado decrecimiento a partir del 22 de septiembre al 22 de marzo (figura 2 a) (tabla 1).

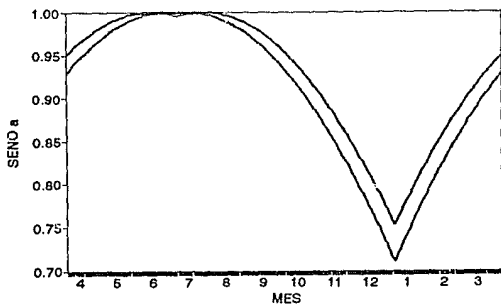
**Tabla 1. Area de cada rango de radiación para 5 fechas en una cuenca estacional.**

Rango	22 Marzo	22 Junio	20 Julio	22 Sep	22 Octubre
0-10	0	0	0	0	0
11-20	0	0	0	0	12019.5
21-30	8711.9	0	0	8711.9	15360.7
31-40	0	0	0	0	39129.7
41-50	12919.5	17736.7	17736.0	12919.5	14373.0
51-60	28307.2	11313.7	12019.5	28307.2	16245.0
61-70	35734.5	22074.7	17961.7	35734.5	41418.0
71-80	32692.5	70681.5	80610.7	32692.5	11313.0
81-90	41481.0	37140.7	30618.0	4148.0	9024.7

Se encontró que no solamente la latitud, sino además la orientación y el gradiente de pendiente modifican la distribución de incidencia de rayos solares en la cuenca. Con el aumento de la inclinación de la pendiente el factor de orientación tuvo mayor importancia en la incidencia de rayos solares. Para pendientes bajas (0°, 2° y 4°) la marcha anual de la incidencia de rayos solares presentó un efecto de orientación mínimo (figuras 2b, 3a y 3b). En cambio para las clases de pendiente de 8°, 16°, 20, 30 y >40°, en los meses de mayo a junio, existió un descenso de la incidencia de rayos solares en ambas laderas, siendo mayor la incidencia en la ladera S que en la ladera N. En los meses de junio a agosto la incidencia de rayos solares fue mayor en la ladera N que en la ladera S. Esta tendencia se vió disminuída con el aumento del gradiente de pendiente. Por el contrario, en los meses de agosto a marzo los valores de mayor incidencia solar fueron mayores en la ladera S que en la ladera N y fue más acentuada con el aumento de inclinación de la pendiente (figuras 4a, 4b , 5a y 5b).



Ecuador
  Trop. Cancer
  Chamela



2 NORTE
  2 SUR

Figura 2. a) Comparación de la marcha anual de la incidencia de rayos solares entre el Ecuador y Chamela, Jalisco, México. b) Marcha anual de la incidencia de rayos solares con los factores gradiente de pendiente ( $2^\circ$ ) y orientación en Chamela, Jalisco, México.

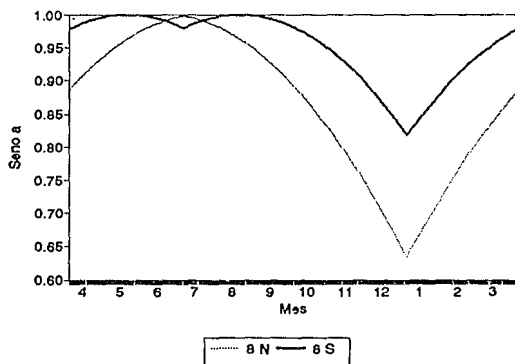
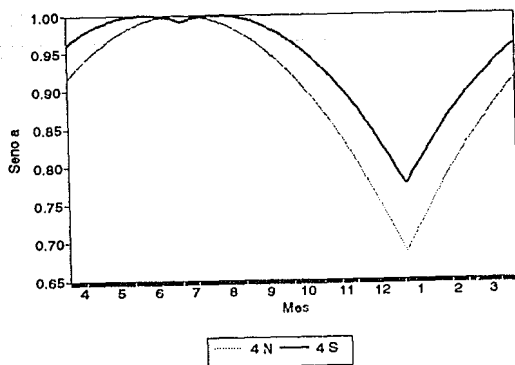
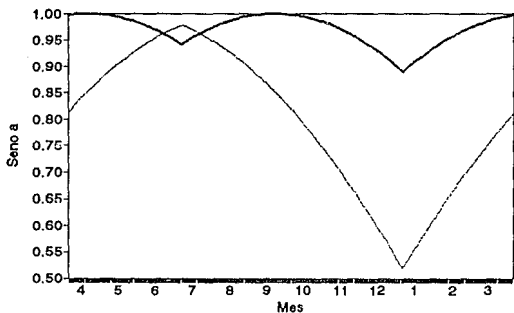
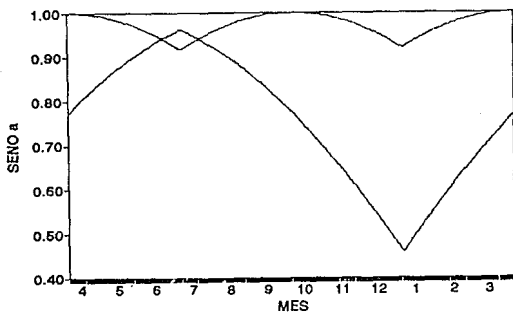


Figura 3. Marcha anual de la incidencia de rayos solares con los factores gradiente de pendiente y orientación ( $4^\circ$  y  $8^\circ$  de inclinación de la pendiente, a) y b) respectivamente), Chamela, Jalisco, México.

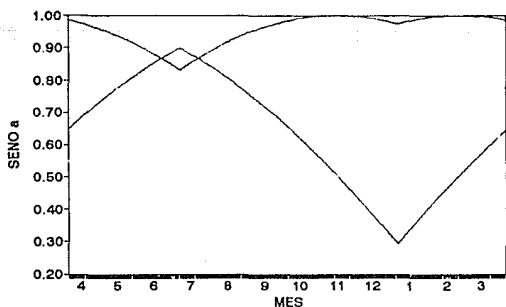


----- 16 N    ——— 16 S

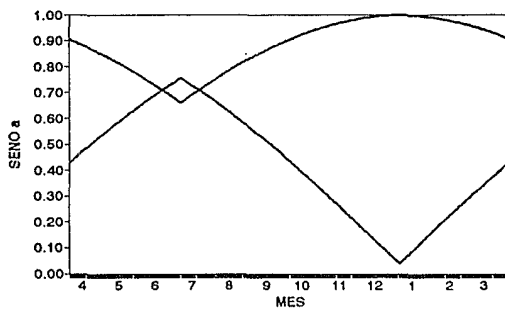


——— 20 NORTE    ----- 20 SUR

Figura 4. Marcha anual de la incidencia de rayos solares con los factores gradiente de pendiente y orientación (16° y 20° de inclinación de la pendiente, a) y b) respectivamente), Chamela, Jalisco, México.



— 30 NORTE — 30 SUR



— 45 NORTE — 45 SUR

Figura 5. Marcha anual de la incidencia de rayos solares con los factores gradiente de pendiente y orientación (30° y 45° de inclinación de la pendiente, a) y b) respectivamente), Chamela, Jalisco, México.

La distribución espacial de la radiación solar se presentó de la siguiente manera. En los equinoccios (22 de marzo y 22 de Sep) la marcha fue similar para ambas fechas, la ladera orientada al S tuvo mayor ángulo de incidencia con el 51.1% del área de la cuenca en valores mayores a 70° de incidencia de rayos solares. La porción N ocupó el 48.9% restante del área en valores menores a 70° de incidencia solar (figuras 6 y 7) (tabla 2). En los solsticios (22 de Junio) la marcha fue similar para ambas laderas, concentrándose valores mayores a 80° de incidencia de rayos solares (figura 8 y tabla 2). Para el 22 de diciembre, la porción N, ocupó el 48.1% del área total en valores menores a 50° de incidencia solar; por el contrario la ladera orientada al S ocupa el 51% del área total con valores mayores a 60° de incidencia solar (tabla 2) (figura 9).

Tabla 2. Area para cada clase de valores de incidencia de rayos solares para cuatro fechas en el año, para diferentes clases de pendiente (0°, 2°, 4°, 8°, 16°, 20°, 30° y 40°) y dos orientaciones dominantes (norte y sur).

Fecha	22 Marzo	22 Marzo	22 Junio	22 Junio	22 Sept	22 Sept	22 Dic	22 Dic
Rango	N	S	N	S	N	S	N	S
10	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	7.5	0
30	0	0	0	0	0	0	9.0	0
40	5.0	0	0	0	5.0	0	24.0	0
50	7.0	0	5.0	5.0	7.0	0	6.0	2.0
60	17.0	0	0	7.0	17.0	0	0	10.0
70	16.0	5.0	7.5	6.3	16.8	5.0	0	26.0
80	0.3	20.1	17.8	26.6	0.3	20.1	0	7.1
90	0.0	26.0	17.1	6.0	0.0	26.0	0	5.6



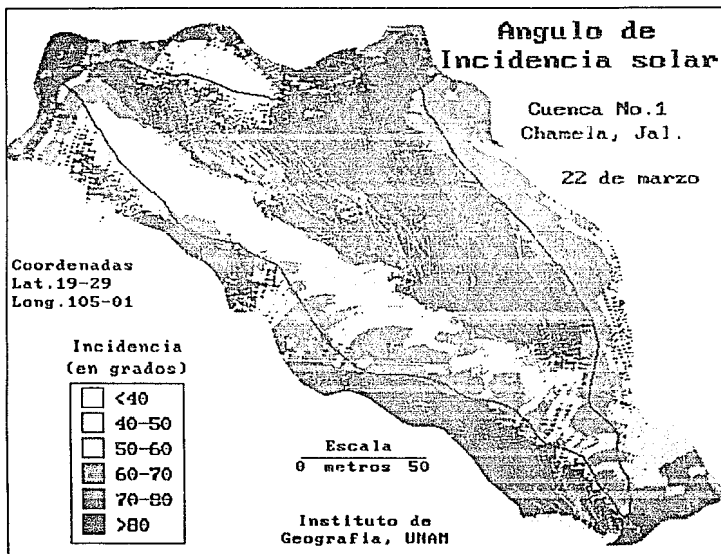


Figura 6. Distribución espacial de la incidencia de los rayos solares para el 22 de marzo, en función de la orientación e inclinación de la pendiente en la cuenca 1, Chamela Jalisco México.

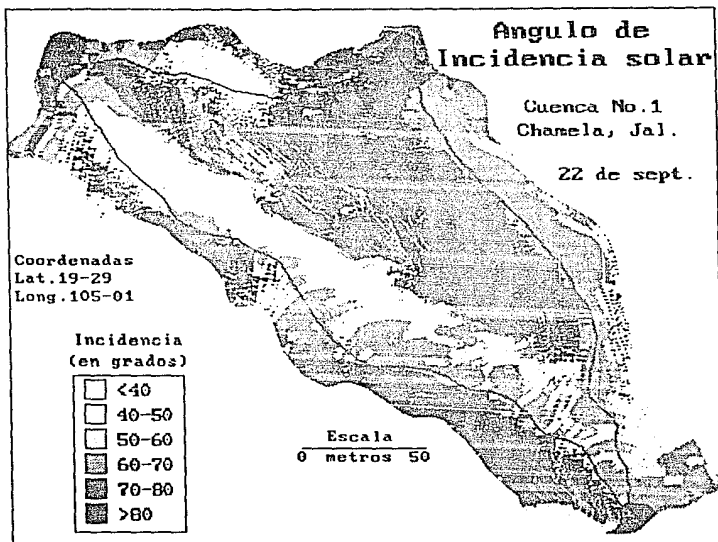


Figura 7. Distribución espacial de la incidencia de los rayos solares para el 22 de septiembre, en función de la orientación e inclinación de la pendiente en la cuenca 1, Chamela Jalisco México.

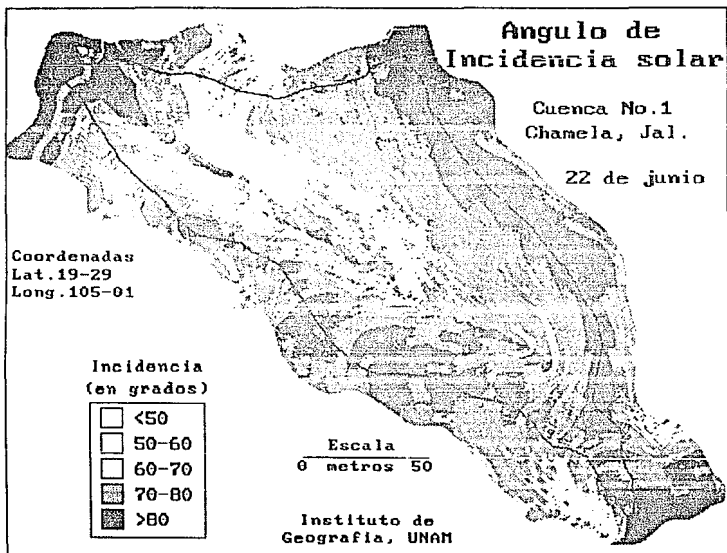


Figura 8. Distribución espacial de la incidencia de los rayos solares para el 22 de junio, en función de la orientación e inclinación de la pendiente en la cuenca 1, Chamela Jalisco México.

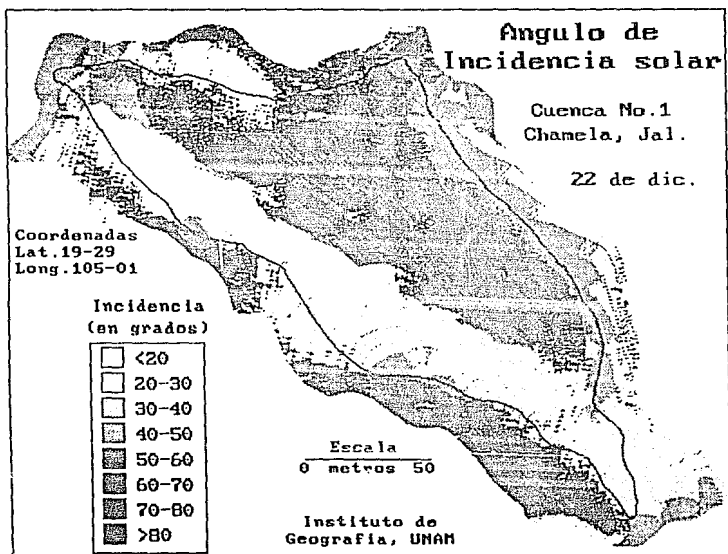


Figura 9. Distribución espacial de la incidencia de los rayos solares para el 22 de diciembre, en función de la orientación e inclinación de la pendiente en la cuenca 1, Chamela Jalisco México.

## B) Humedad

Se encontró que el cuadro bajo y medio presentó ligeramente un mayor porcentaje de humedad (12% y 14% respectivamente) que el cuadro alto (10%), para ambos años (figura 10a y 10b). Se encontró que en la ladera N existió una ligera tendencia de mayor porcentaje de humedad (18%) que en la ladera S (14%), para ambos años (figura 11a y 11b). Así mismo se encontró que una débil tendencia de mayor porcentaje de humedad en la profundidad de 10 a 20 cm (14%), que de 0-20 cm (12%) para el año de 1989 (figura 12a) y el año de 1990 (Figura 12b).

## C) Vegetación

En los transectos bajo y medio la densidad de árboles fue mayor en la ladera sur que en la ladera norte, pero el DAP de los árboles fue mayor para la ladera norte. Los arbustos en los transectos bajo y medio tuvieron una densidad y DAP mayor en la norte que en la sur. En el transecto alto y orientado al norte se encontró menor densidad de árboles, DAP y arbustos que en el cuadro orientada al sur. Se observó una tendencia en la distribución de biomasa por orientación, ya que en la ladera orientada al N hubo mayor biomasa de árboles y arbustos que la orientada al sur, aunque la densidad siempre fue mayor en la ladera sur que en la ladera N. La parte baja presentó mayor biomasa que la parte alta de la cuenca (tabla 3).

La distribución de la densidad y biomasa de árboles al interior de la ladera se presentó de la siguiente manera, en general en las laderas se presentó la mayor densidad y biomasa con respecto a las crestas. En el cuadro bajo se presentó mayor biomasa y densidad con respecto a los cuadros medio y alto respectivamente (tabla 3 y figura 13).

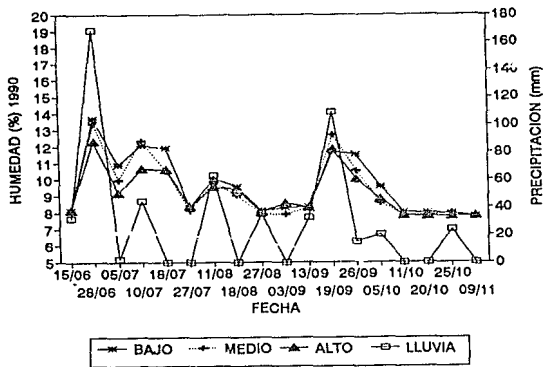
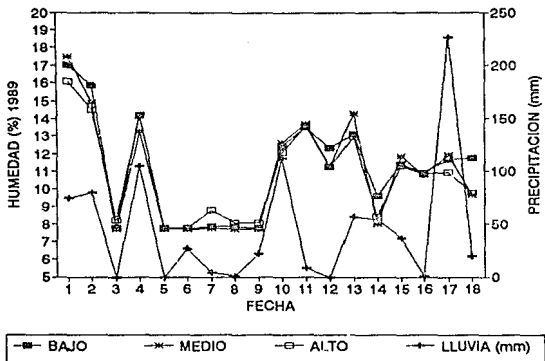


Figura 10. Distribución del porcentaje de humedad en los cuadros (alto, medio y bajo) dentro de la cuenca 1 en relación con la precipitación mensual acumulada, para los años de 1898 y 1990 (a) y b) respectivamente).

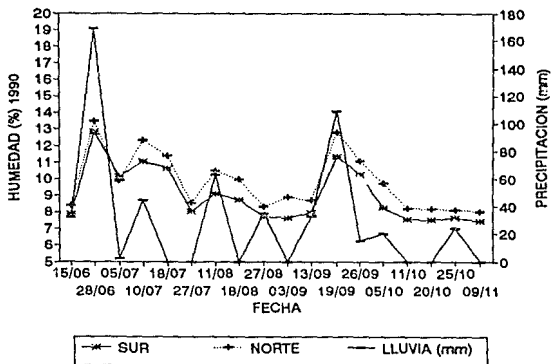
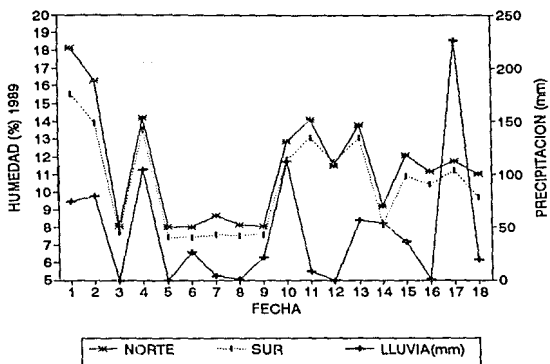


Figura 11. Distribución del porcentaje de humedad en las dos orientaciones dominantes (norte y sur), en la cuenca 1, en relación con la precipitación mensual acumulada, para los años de 1898 y 1990 (a) y b) respectivamente).

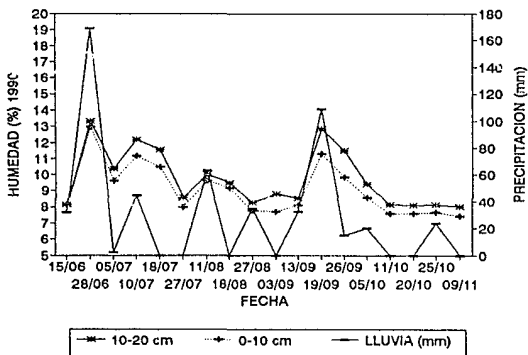
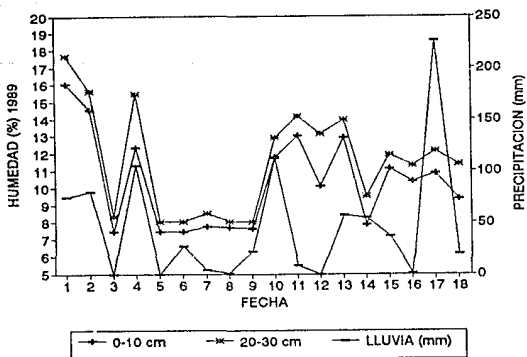


Figura 12. Distribución del porcentaje de humedad con la profundidad (0-10 y 20 a 30cm), dentro de la cuenca 1, en relación con la precipitación mensual acumulada, para los años de 1889 y 1990 (a) y b) respectivamente).



Tabla 3. Media (error estándar), de la densidad (individuos/m<sup>2</sup>) y diámetro a la altura del pecho (DAP) de árboles y arbustos por ladera (Norte y Sur), en la cuenca 1.

	Norte	Norte	Sur	Sur
	Media	e.e.	Media	e.e.
		Transecto	Bajo	
Arboles				
Densidad	0.62	1.76	0.82	0.01
DAP	20.95	1.55	14.56	0.74
Arbustos				
Densidad	0.33	0.002	0.19	0.05
DAP	21.12	1.48	15.03	1.22
		Transecto	Medio	
Arboles				
Densidad	1.05	0.02	1.14	0.05
DAP	10.28	0.34	9.04	0.61
Arbustos				
Densidad	0.16	0.009	0.004	0.005
DAP	15.70	1.33	12.30	1.81
		Transecto	Alto	
Arboles				
Densidad	0.90	0.01	0.70	0.02
DAP	9.76	0.60	12.30	1.05
Arbustos				
Densidad	0.13	0.01	0.02	
DAP	15.47	1.15	22.00	

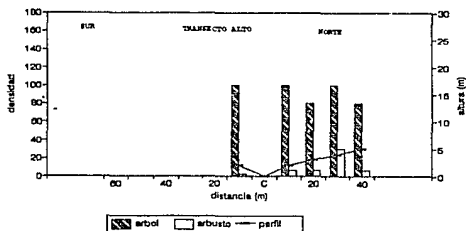
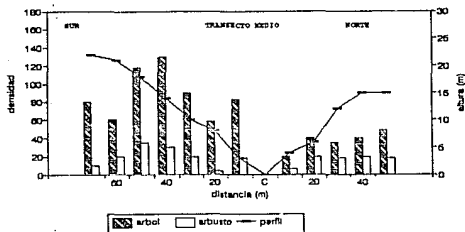
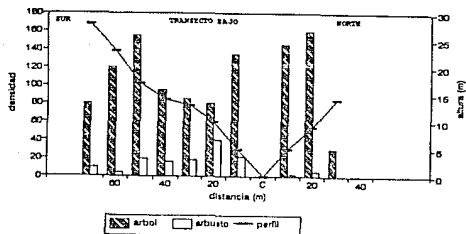


Figura 13. Número de árboles y arbustos de los tres transectos (cuadro alto, medio y bajo) y dos orientaciones (norte y sur), en cuadros de 10 m<sup>2</sup>, en la cuenca 1, Chamela, Jalisco, México.

## DISCUSION

### A) Radiación

Barradas (1991), encontró que en la zona los máximos de radiación se presentan en junio ( $39.46 \text{ MJ m}^{-2}$ ) y la mínima radiación en el mes de diciembre ( $26.05 \text{ MJ m}^{-2}$ ). Los máximos valores de incidencia solar registrados ( $90^\circ$  y  $33^\circ$ ) para junio y diciembre coincidieron con los valores de radiación.

La distribución de la incidencia de rayos solares estuvo influida por la latitud. Los valores más altos de incidencia de rayos solares se presentaron en el solsticio de verano (trópico de cancer), porque en ese período los rayos solares son perpendiculares al terreno en Chamela. La mínima incidencia de rayos solares se presentó en el solsticio de invierno. La marcha de la incidencia solar coincidió con el número de horas sol en la parte alta del dosel reportadas por Barradas (1991), en la cuál junio tuvo mayor número de horas sol (13) y diciembre menor número de horas sol (10.8).

No sólo la latitud sino también la morfología del relieve (inclinación de la pendiente, altitud y orientación), modifican la incidencia de los rayos solares. Cuando existió mayor inclinación de la pendiente, se presentó mayor diferencia entre ambas laderas (norte y sur).

La morfología de la ladera modifica la distribución espacial de la incidencia de rayos solares en las cuatro fechas que se trabajaron, por lo tanto debe existir una diferencia espacial y temporal heterogénea de la demanda evaporativa dentro de la cuenca. Las crestas ( $0^\circ$  y  $4^\circ$  de inclinación de la pendiente) presentaron las zonas de mayor incidencia de rayos solares independientemente de la fecha, por el contrario en las laderas, la distribución temporal y espacial se vió afectada por la inclinación de la pendiente (figuras 12 y 13).

### B) Humedad

Existieron tres factores que determinaron la cantidad de agua en el suelo al interior de esta cuenca la precipitación, el relieve y la incidencia de rayos solares. La marcha de la humedad en el suelo dependió de los eventos de precipitación, de la intensidad de lluvias, el relieve, las características físicas de los suelos, la configuración de la red de drenaje y la demanda evaporativa.

La distribución de la humedad en el suelo dependió de las diferencias en las características de la morfología de ladera y las características físicas de los suelos definió una capacidad de retención de agua espacialmente heterogénea (Capítulo 2). El tiempo de residencia de agua dependió del ángulo de incidencia de los rayos solares, ya que cuando es cercano a  $90^\circ$ , se presentó una mayor demanda de evapotranspiración. Los factores relieve, radiación y humedad actuaron de manera conjunta para modificar el porcentaje de humedad en el suelo. En la porción baja de la cuenca, el porcentaje de humedad es mayor, a pesar de sus características morfológicas (mayor gradiente de pendiente) y edafológicas (elevado

contenido de arenas y menor capacidad de retención). Sin embargo, este mayor contenido de humedad se debió a que presentó menor radiación directa y por lo tanto menor demanda evaporativa. Por el contrario, en la porción alta de la cuenca se observó un menor contenido de humedad, a pesar de sus características de relieve (laderas planas) y edafológicas (mayor profundidad, alto contenido de arcillas y mayor capacidad de retención), ya que esta porción de la cuenca presentó una mayor demanda evaporativa durante todo el año y mayor eficiencia de drenaje (figura 3).

Las diferencias del porcentaje de humedad entre laderas (N y S), también está explicada por la diferente demanda evaporativa que existe por el efecto de la incidencia de los rayos solares heterogénea dentro de la cuenca. En los meses de julio en que empieza la época de crecimiento no existe una distribución espacial heterogénea en la distribución de los rayos solares. Es aquí donde las características físicas de los suelos dentro de la cuenca juegan un papel importante en la disponibilidad y facilidad en la evaporación del agua en el suelo. Las arenas permiten una mayor facilidad de evaporación de agua en el suelo, mientras que las arcillas tienen mayor resistencia a la demanda evaporativa.

La diferencia del contenido de humedad entre años se debe principalmente a la diferencia de precipitación anual, el número de tormentas y la distribución de las tormentas, el año 1989 fue más húmedo que el año de 1990.

### C) Vegetación

El patrón de distribución de la vegetación es afectado por numerosos factores bióticos y abióticos y sus interacciones. El relieve es el principal factor físico que afecta la composición, crecimiento y distribución de la vegetación (Basnet, 1992). Las características del relieve influyen la distribución espacial de las características físicas de los suelos y estos a su vez controlan la disponibilidad de agua y nutrientes dentro de la cuenca (Singh, 1990).

Los factores anteriores: relieve, características físicas de los suelos, humedad y radiación juegan un papel importante en el establecimiento y funcionamiento del ecosistema (Basnet, 1992). Las diferentes combinaciones de éstos factores producen patrones espaciales diferentes del establecimiento de la vegetación. La lluvia y la longitud de los períodos secos son parámetros útiles para comparar sitios en donde la humedad en el suelo es la variable clave para el establecimiento de la vegetación. La diferente disponibilidad de agua se expresa en la vegetación en términos de diversidad, estructura y fenología (Bullock y Solís-Magallanes, 1990). Lott *et al* (1987) encontraron diferencias en la riqueza florística entre los sitios de ladera y sitios de valle. Los valles tuvieron mayor porcentaje de lianas y de árboles con un DAP mayores a 10 cm (31 y 24% respectivamente) que las laderas (11 y 21% respectivamente). El área basal fue de 0.52 m<sup>2</sup>/100 m<sup>2</sup> para el valle y 0.24 m<sup>2</sup>/100 m<sup>2</sup> para las laderas, la mayoría de esta área basal se debió a árboles con DAP mayor a 30 cm. Lott *et al* (1987)

concluyen que estas diferencias fueron explicadas por la diferencia en condiciones hidrológicas de los suelos de los sitios de trabajo, los valles con suelos profundos y potencialmente mayor contenido de agua y las laderas con suelos de menor profundidad y potencialmente menor contenido de agua.

Sin embargo, en laderas con diferente orientación, la diferencia de disponibilidad del agua se presentó una escala más fina (entre laderas). Para este trabajo se encontraron diferencias de DAP de árboles.

En la figura (vegetación) se observó que la menor densidad de árboles se encuentra en la laderas, aun cuando estas son facetas presentaron poca pendiente y alta capacidad de retención de agua en el suelo, las crestas presentaron una mayor incidencia de rayos solares en los meses de julio y septiembre.

La diferente disponibilidad del agua no sólo modifica la estructura de la vegetación, sino también la dinámica del ecosistema, influyendo en el ciclo de nutrientes. Solís (1992), encontró que los nutrientes  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $PO_4$ , N.T. y MO se distribuyen de la siguiente manera. En la porción baja de la cuenca existió mayor concentración de nutrientes que en la parte alta. La concentración de nutrientes en la ladera norte fue mayor que en la ladera sur. La disponibilidad de nutrientes esta en función de las tasas de descomposición y a su vez estas últimas dependen de los contenidos de humedad y de la incidencia solar (temperatura). La porción alta de la cuenca tiene tasas de descomposición menores que la parte baja de la cuenca. Por efecto del contenido de humedad en el suelo, la porción norte presentó mayores tasas de descomposición y de producción de hojarasca, por lo cual presentó mayor concentración de nutrientes. Por lo contrario la parte sur de la cuenca presentó menor producción de hojarasca y menor tasa de descomposición y por lo tanto tiene menor contenido de nutrientes.

Barradas (1991), encontró que existe mayor evaporación en los meses secos y menor evapotranspiración, sin embargo en los meses húmedos la evaporación fue menor y existió una mayor evapotranspiración, debido al incremento foliar de los individuos. Martínez-Yrizar et al, 1990 encontraron que a mayor biomasa existió un aumento de masa foliar, lo que provoca mayor evapotranspiración actual que potencial.

La importancia de la variabilidad espacial y temporal de la incidencia de los rayos solares es que modifica las tasas fotosintéticas, la productividad y la demanda evaporativa y modificar los mecanismos de la vegetación empleados para enfrentar los deficiencias hídricas.

#### REFERENCIAS

- Barradas, L. V. y L. Fanjul. 1985. Equilibrio hídrico y evapotranspiración en un selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biotica*. 10 (2) 199-209

- Barradas, V. L. 1991. Radiation regime in a tropical deciduous forest in western Mexico. *Theoretical and Applied Meteorology*. 44:57-64.
- Bullock, S. H. and A. Solís-Magallanes. 1990. Phenology of canopy trees of a deciduous forest in Mexico. *Biotropica*. 22: 22-35.
- Castellanos, J., M. Maass and J. Kummerow. 1991. Root biomass of a dry deciduous forest in Mexico. *Plant and soil*. 131: 225-228.
- Leopold, L. and T. Dunne. 1978. *Water and environmental planning*. Freeman and Co.
- Field, C., Merino and H. A. Mooney. 1983. *Oecologia*. 60: 384-389.
- Larcher, W. 1975. *Physiological plant ecology*. Springer-Verlag.
- Lott E., S. H. Bullock and A. Solís-Magallanes. 1987. Floristic diversity and structure of upland and arroyo forests of Coastal Jalisco. *Biotropica*. 19: 226-235.
- Martínez-Yrizar, A. and J. Sarukhán. 1990. Litterfall patterns in atropical deciduous forest in Mexico over a five-year period. *Journal of Tropical Ecology*. 6: 433-441.
- Martínez-Yrizar, A., J. Sarukhán, A. Pérez-Jimenez, E. Rincón, J. M. Maass, A. Solís-Magallanes and L. Cervantes. 1992. Above-ground phytomass of a tropical deciduous forest on the coast of Jalisco, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*. 8: 87-96.
- Turner, M. 1989. Landscape Ecology: The effect of pattern on process. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 20: 171-197.

## CONCLUSIONES

La configuración morfológica del relieve ofrece un arreglo espacial heterogéneo dentro de una cuenca hidrológica. Se identifican dos tipos de heterogeneidad, a) Entre unidades de ladera, definida por las características morfológicas de cada una de ellas (longitud de ladera, tipo de curvatura y gradiente de pendiente) y b) al interior de cada unidad de ladera, definida por las facetas (cresta, ladera y pie de ladera), su curvatura y el número de rompimientos de pendiente al interior de cada una de ellas.

Los estudios descriptivos del relieve dentro de una cuenca hidrológica ofrecen una evidencia que éstas no son cajas negras y pueden incluir la dinámica de los procesos. Así, estas descripciones son importantes en los estudios de balances hídricos y de nutrientes en los trabajos de ecosistemas.

La heterogeneidad del relieve provoca que exista intercambio de agua y nutrientes en paisajes heterogéneos o interacciones entre paisajes. La heterogeneidad espacial influye la distribución espacial de los procesos bióticos y abióticos dentro de un sistema. La complejidad del paisaje no ha mostrado ser constante en un amplio rango de escalas. Esta ausencia de constancia puede mostrar que los procesos operan a diferentes escalas (Turner, 1989).

La distribución espacial de las características físicas de los suelos son importantes desde el punto de vista de la distribución del contenido de agua en el suelo, ya que de ésta depende los mecanismos de escurrimiento, el crecimiento y el establecimiento de los patrones de vegetación. A su vez el contenido de agua en el suelo es análogo al contenido de nutrientes en el suelo y las superficies de intercambio catiónico (Trudgill, 1982). El contenido total de nutrientes está asociado a las condiciones de la vegetación, por el contrario la disponibilidad parece estar asociada a las propiedades físicas de los suelos y al material parental.

La variación florística en los bosques está asociada a las condiciones de los suelos y al material parental. Las características físicas de los suelos y el tipo de suelo determinan la mineralogía y la carga química, las cuales modifican los patrones de distribución del ciclaje y transformación de los nutrientes (Baillie, 1989). Estas características de los suelos son aún más importantes en zonas tropicales donde la disponibilidad de nutrientes es más importante por la descomposición y del agua en el suelo (Baillie, 1989).

Es necesario realizar trabajos integrativos (factores bióticos y abióticos) y dinámicos dentro del ecosistema.



La disponibilidad de agua en el suelo es un fenómeno dinámico, en el cual la fuente es la precipitación, el almacenamiento y distribución está controlado por las características del relieve y las propiedades físicas de los suelos dentro de la cuenca. A su vez su tiempo de residencia en el suelo depende: a) de las condiciones de drenaje, las cuales son la densidad de cauce y el nivel de base dentro de la cuenca. b) la diferente demanda evaporativa, la cual esta en función de la incidencia de rayos solares y c) de los mecanismos de pérdida de agua de la vegetación (evapotranspiración).