

## MODELO GEOMORFOMETRICO APLICADO AL ESTUDIO DE LA EROSION EN CARCAVAS<sup>1</sup>

---

*Gonzalo Hernández R.*<sup>2</sup>

---

### RESUMEN

En la zona de Santiago de Puriscal, Costa Rica, se desarrolló un estudio, de carácter geomorfológico, con el objetivo de obtener un modelo empírico que permitiera identificar las áreas más críticas que podrían ser afectadas por procesos de erosión severa. A partir del análisis exhaustivo de fotografías aéreas, mapas topográficos, monitoreo de erosión y trabajo de campo, se logró establecer una significativa correlación espacial entre la ocurrencia de cárcavas de laderas (valley-side gullies), pendiente del terreno y densidad de drenaje de primer orden (**Dd1**). Con estos resultados se ha propuesto el diseño de un modelo empírico, de fundamentos geomorfolométricos, que facilita la zonificación, a nivel regional, de la susceptibilidad diferencial al desarrollo de formas erosivas severas como las cárcavas, terracetas y remoción en masa.

1. Investigación financiada con fondos CONICIT.
2. Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Programa MADE. Apartado Postal 86-3000 Heredia, Costa Rica. Fax: (506) 261-0028.

La aplicación del modelo geomorfométrico a otras zonas del país como Tilarán, Santa Cruz, Liberia, Hojanca y Buenos Aires, brindó resultados semejantes a los de Puriscal, demostrándose con esto su calidad de modelo extrapolable.

La aplicación del sistema de información geográfica IDRISI, facilitó enormemente el análisis espacial y estadístico de los datos generados y procesados en esta investigación.

## ABSTRACT

In the region of Santiago of Puriscal, Costa Rica, a geomorphological characterization study was developed with the objective of obtaining an empirical model that permits identifying critical areas that could be affected by severe erosional processes. By exhaustive analysis of aerial photographs, topographical maps, erosion monitoring and field work, a significant spatial correlation was determined between the occurrence of valley-side gullies, terrain slope, and the drainage density of first order streams (Dd1). With these results an empirical model was designed of geomorphological fundamentals that facilitates the zonification on a regional level of the differential susceptibilities to developing forms of severe erosion such as the valley-side gullies and mass wasting.

The application of the geomorphological model to other zones of the country such as Tilaran, Santa Cruz, Liberia, Hojanca, and Buenos Aires, brought forth similar results to those from Puriscal, demonstrating the model's qualities for extrapolation.

The application of IDRISI, a Geographical Information System, greatly facilitated the spatial and statistical analysis of the generated and processed data in this investigation.

## I. INTRODUCCION

La agricultura sigue siendo la actividad que suministra la mayor parte de los productos alimenticios y materias primas esenciales para la humanidad, por ello, la conservación del suelo, base de las cadenas vitales, parece esencial, ya que sin él sería imposible conseguir un ritmo «sostenido» de abastecimiento a las poblaciones; la degradación del suelo es el resultado de procesos multivariantes, físicos y antrópicos que contribuyen a la disminución y pérdida de su capacidad productiva, además de inducir a ecosistemas pobres, frágiles y vulnerables a los fenómenos atmosféricos y actividades humanas (LOPEZ, 1992 y LOPEZ, 1994). Se le suele agrupar en dos grandes categorías (FAO, 1989):

- a) erosión y remoción del suelo por agua y viento;

- b) pérdida de fertilidad a causa de alteraciones o cambios físicos, químicos y biológicos.

En Costa Rica, por la condición de poseer un clima tropical con un territorio predominantemente ocupado por tierras en laderas montañosas, el proceso de erosión de suelos es un componente ambiental presente con diferentes niveles de evolución, lo que atenta principalmente contra la sostenibilidad del sector agrícola. Las dos categorías de degradación de suelos mencionadas anteriormente son procesos activos en el territorio costarricense. Entre la variedad de los procesos degradacionales más comunes se encuentra el de la erosión en terracetas y/o por cárcavas; la presencia de éstas en el paisaje es síntoma de una problemática grave de degradación en la que probablemente han tenido influencia en forma individual, o combinada, factores como uso del suelo, clima, litología, topografía, etc.

A pesar de ser uno de los procesos degradacionales que más afectan negativamente la capacidad productiva de las fincas, el estudio de la degradación por cárcavas no ha tenido el alcance o importancia que se le ha dado a otros tipos de erosión, como la de tipo laminar, para cuyo análisis incluso se han desarrollado modelos físicos, analógicos y empíricos con el afán de alcanzar niveles significantes para su predicción (ROO, 1993).

Existe un desfase generalizado en los contenidos teórico-conceptuales de la erosión en cárcavas, empezando por los términos con que se trata de nominar a estas incisiones en el terreno. Algunos de estos términos son: rills, gullies, ravines, cárcavas, canales, barrancos, surcos, torrenteras, zanjones, etc. En su descripción también se contempla elementos poco convencionales sobre sus formas y dimensiones. Se les explica en unos casos como incisiones de formas más o menos alargadas con unos pocos metros de largo y centímetros de profundidad; mientras que en otros casos se les considera como formas de varios cientos de metros de largo por varios metros de profundidad y ancho. De igual manera su génesis, dinámica y predicción de ocurrencia, se han desarrollado mediante diferentes enfoques e investigaciones con resultados igualmente disímiles; mientras que su estudio a través de la aplicación de modelos, está poco desarrollado y por lo general éstos son aplicables a ambientes físico-geográficos diferentes a los de nuestro país.

En la presente investigación se pretende analizar los niveles de relación que pueden existir entre la geomorfología y el desarrollo de cárcavas. Para esto se hace aplicación de técnicas de fotointerpretación, cartometría de elementos fisiográficos como pendientes y densidad de drenaje, además de otras variables como geología, suelos, uso del suelo y aplicación de Sistemas de Información Geográfica; todo esto con la finalidad de proponer un modelo empírico que faculte la identificación de áreas críticas o más susceptibles al proceso de erosión en cárcavas o de degradación en general.

Para tal objetivo se seleccionó la zona de Santiago de Puriscal como área piloto, ya que ésta es reconocida a nivel nacional como una de las zonas que históricamente más ha sufrido de procesos degradacionales (MAG, DGF, IICA, FAO, 1985).

## **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Crear un modelo empírico, fundamentado en el análisis de factores geomorfométricos y aplicación de Sistemas de Información Geográfica, que facilite, para una escala regional, la identificación de la susceptibilidad diferencial al desarrollo de cárcavas.

### **1.1.1 Hipótesis de trabajo**

La ocurrencia de cárcavas está relacionada con la pendiente del terreno y la densidad de drenaje de cauces de primer orden. Al aumentar los valores de estos dos parámetros aumentará la densidad de cárcavas o presencia de terracetas.

## **1.2. MARCO TEORICO Y ESTRATEGIA OPERATIVA**

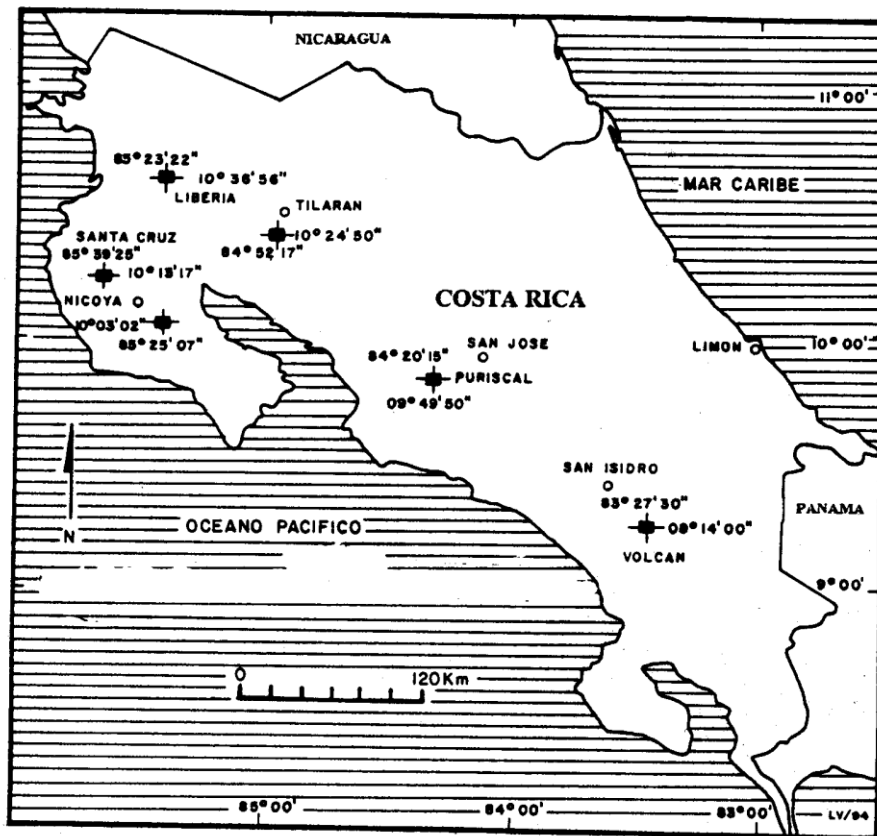
Uno de los principales limitantes con los que se encuentra el investigador en este tipo de estudio es el detalle y la calidad de la información disponible, los mapas y estudios realizados para la geología, los suelos y la información climática son muy generales; esto limita la tarea de establecer posibles relaciones espaciales significativas entre los factores físicos y la mayor o menor ocurrencia de áreas cárcavadas.

Esta problemática, en cuanto a la calidad de la información físico-geográfica, es un componente constante que encontramos en cualquier zona del país; por lo tanto, el tratar de derivar posibles relaciones entre estos factores con respecto a la degradación de suelos, y proponer modelos con base en esto, nos llevaría a hacer muy limitadas las posibilidades de extrapolación y aplicación para zonas con poca o ninguna información físico-geográfica. Además, la generalidad espacial con que son cartografiadas sus alineaciones y límites, apenas aproximativas o incluso especulativas, harían que los resultados de correlación espacial tengan en este aspecto un punto débil que impida sustentar objetivamente algunas propuestas o conclusiones.

Por lo tanto se desarrolla aquí un modelo empírico, el que se fundamenta en el análisis de factores geomorfométricos como pendiente y densidad de drenaje (**Dd**), los cuales son directamente obtenibles a partir de mapas topográficos o fotografía aérea. Por tratarse de elementos cuantificables, hace que su identificación, jerarquización y delimitación espacial sea más objetiva y confiable; en la misma medida hace que la posibilidad de su aplicación sea más factible, especialmente en zonas donde no se dispone más que de mapas topográficos o fotos aéreas.

Se han escogido como lugares de estudio áreas de entre 80 km<sup>2</sup> y 200 km<sup>2</sup> ubicados en Hojancha, Tilarán, Buenos Aires, Santa Cruz, Liberia y Puriscal, para un total de área estudiada de aproximadamente 550 km<sup>2</sup> (mapa N° 1).





**Mapa N° 1: Localización de las áreas estudiadas.**

En cada uno de estos lugares se hizo una fotointerpretación exhaustiva, tratando de identificar todo rasgo geomorfológico que indicara la presencia de cárcavas y otras formas de erosión severa como las terracetos.

Por otro lado, se procedió a la restitución de mapas de uso del suelo, se compilaron los mapas para los factores físicos como pendientes, geología, suelos y la densidad de drenaje (Dd). Todos estos datos fueron incorporados y analizados en una base de datos georreferenciada manejada por medio de un Sistema de Información Geográfica. Para esto se aplica una metodología y algoritmo desarrollados en esta investigación especialmente para hacer este tipo de análisis.

Básicamente, se trata de encontrar cuál es el nivel de relación que puede existir entre el desarrollo de cárcavas y otros factores como los mencionados anteriormente. Por medio del SIG/IDRISI se procede a aplicar una serie de sobrepuestas entre los mapas, lo cual permite cuantificar las correspondientes relaciones espaciales.

Inicialmente se escogió, como área piloto, la zona circundante a la localidad de Santiago de Puriscal (225 km<sup>2</sup>), con el objetivo de desarrollar aquí la metodología propuesta y posteriormente probar su condición de extrapolable y calibrar el modelo con los datos espaciales (físico-geográficos) correspondientes a los otros sitios de estudio.

Dos elementos geomorfológicos son básicos en esta investigación, a saber: el concepto de cárcava y el de densidad de drenaje (**Dd**).

En cuanto al primero ya hemos mencionado que no existe un criterio convencional que permita conceptualizar claramente la idea de cárcava; posiblemente esto se deba a que es un proceso geodinámico tanto temporal como espacialmente. La FAO los define como canales cuyo ancho y profundidad no permiten el uso normal de maquinaria de arado (BOCCO, 1991). Sin embargo, esta definición es más bien enfocada desde la perspectiva agrícola.

Otras descripciones se ajustan más a un enfoque geomorfológico, tal como la hecha por SCHUMM et al. (1984) que definen un gully (cárcava) como un canal relativamente profundo, formado en una etapa reciente, que puede formarse en los laterales de los valles o en sus fondos -entendidos como zonas más o menos llanas rellenas de material aluvial- en los que no existía previamente un canal bien definido. La diferencia entre unos y otros estriba en que los primeros (valley-side gullies) son el resultado de la expansión o rejuvenecimiento del sistema de drenaje, mientras que los segundos (valley-floor gullies) son responsables de la erosión de la llanura. Los primeros se encajan en depósitos coluviales o roca madre, y los segundos cortan depósitos aluviales y, en ocasiones, roca madre. Todos ellos pueden ser continuos o discontinuos.

El diccionario geomorfológico (LUGO, 1989) lo define como: hoya o zanja excavada por las aguas superficiales.

Por las características geomorfológicas del área estudiada, el tipo de cárcavas que más comúnmente se presenta aquí son las del tipo «valley-side gullies». En términos generales estas cárcavas se inician como pequeños canales que concentran en forma lineal la escorrentía superficial, conforme avanza su desarrollo tiende a conectarse con otras cárcavas o un canal de jerarquía superior como una quebrada o río, su perfil longitudinal «sigue el modelado del terreno, generalmente irregular, con rupturas de pendiente» (LUGO, 1989). Predominan los procesos de erosión vertical y remontante. Al alcanzar un perfil longitudinal más asociado con el nivel de base erosión local, la cárcava tiende a ensancharse por erosión lateral y procesos gravitacionales en ladera. Generalmente, en este nivel de desarrollo, las cárcavas son colonizadas por la vegetación, sin embargo, a pesar de que su desarrollo se hace menos dramático, el mismo no se detiene y continúa activo.

La principal diferencia entre la *red de drenaje de primer orden* y las cárcavas o barrancos, consiste en que los cauces de primer orden tienen bien definida su microcuenca o área de captación y están conectados en forma clara con un cauce de orden superior, además poseen un flujo permanente o cuasipermanente de agua; mientras que las cárcavas solamente transportan agua ocasionalmente en momentos de precipitación pluvial, además no necesariamente tienen sus vertientes plenamente formadas y no siempre están conectados con un cauce de orden superior.

Por lo general, en la zona estudiada, las cárcavas se forman varias sobre una misma ladera y escurren en forma cuasiparalela y sin tributarios de ningún tipo. Sus vertientes no están bien definidas, el canal en sí tiene una forma muy estrecha de «V» y cuando están plenamente desarrolladas. Las mismas son ocupadas por vegetación que nace en forma espontánea; por ser zonas de fuerte escorrentía superficial (y subsuperficial a veces) y de formas muy abruptas, las mismas no son ocupadas para cultivos, a no ser por pastos. Su génesis y desarrollo no necesariamente están ligados con el uso del suelo, aunque, por supuesto, éste es un elemento que lo precipita. Por lo general son las condiciones particulares del suelo, la geomorfología y el substrato litológico, junto con la agresividad climática, las que influyen en su dinámica.

En cuanto al índice geomorfométrico densidad de drenaje (**Dd**) y su relación con estudios sobre suelos y litología, tenemos que lo que dicen FLORES et al. (1992): «una regionalización de un área específica con base en una variable morfométrica, tal como la densidad de drenaje (**Dd**), implícitamente considera elementos conspicuos del paisaje, como el relieve y el sistema de drenaje; reflejo a su vez de la geología local y regional, y de los procesos endógenos y exógenos que actúan sobre el paisaje».

La expresión anterior es concordante con el criterio de la presente investigación: la **Dd** es un rasgo geomorfológico que «sintetiza», por medio de «cicatrices» en el terreno, la interacción tanto de factores propios del relieve como la litología o tipos de suelos, como de factores climáticos, principalmente la precipitación pluvial. Por lo tanto, las diferencias espaciales mostradas a través de este indicador reflejan implícitamente diferencias espaciales tanto, en las condiciones litológicas como climáticas. Los estudios realizados por otros autores tales como HORTON (1945), STRAHLER (1957) y ZINKE (1960), respaldan las aseveraciones formuladas anteriormente.

De igual manera que los clásicos climatólogos como Köppen y Thornthwait, en sus clasificaciones climáticas, consideraron la vegetación natural como «instrumentos meteorológicos», cabe aquí señalar que el drenaje de formación más reciente (talwegs de primer orden) es también un instrumento o parámetro (relativo) que permite inferir tanto la agresividad climática (precipitación) como la susceptibilidad pedo-litológica, ya que son las condiciones de escurrimiento superficial, subsuperficial o infiltración y la mayor o menor susceptibilidad del relieve, los que definen los patrones de longitud, densidad y forma de los talwegs que se desarrollan principalmente en laderas.

Se pretende, por lo tanto, en esta investigación, segregar la generalidad del concepto de (Dd) o por lo menos lo referente a su cálculo, ya que, como se ha dicho anteriormente son los talvelgs de formación más reciente los indicadores de las condiciones físico-geográficas prevalecientes durante los últimos tiempos de la historia climática y geológica de una región dada.

Por lo tanto, se introducirá aquí el concepto de densidad de drenaje de primer orden (Dd1), para hacer referencia al cálculo de la Dd de solamente los cauces de primer orden que se pueden identificar a partir de mapas topográficos de escala 1:50.000. CHINNAMANI et al. (1981), GARCIA y ESPINDOLA (1976), GARCIA (1991) han demostrado la importancia del elemento temporal en el incremento de la red de drenaje, relacionando el proceso erosivo con el incremento del número de canales, principalmente los de órdenes inferiores.

El cuantificar la Dd1 y tratar de relacionarla con la formación de cárcavas es un intento de encontrar alguna posible relación entre ambos procesos geomorfológicos, ya que, por su morfodinámica fluvial, son prácticamente parte de un mismo sistema mayor constituido por la red de drenaje de la cuenca correspondiente. Intimamente relacionado con este concepto está la teoría de la «relación de bifurcación entre cauces» propuesta por Horton (1945), según la cual la bifurcación o aumento en el número de cauces es inversamente proporcional al orden jerárquico de los mismos.

El índice de Dd1, se calcula mediante la ecuación:

$$Dd1 = Lc1 / A$$

En donde:

Dd1 = densidad de cauces de primer orden, en m / km<sup>2</sup>

Lc1 = longitud total, en metros, de los cauces de primer orden

A = área en km<sup>2</sup>

## **II. SANTIAGO DE PURISCAL: CONDICIONES FISICO-GEOGRAFICAS**

### **2.1 UBICACION Y USO DEL SUELO**

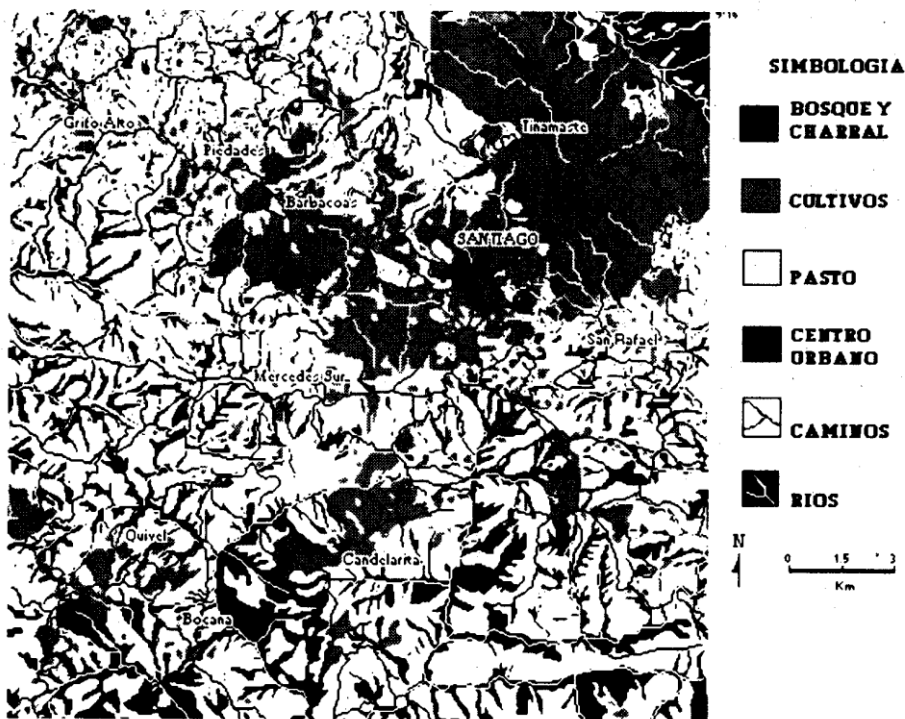
De acuerdo con lo expresado por LORI (1980), la región de Puriscal es un excelente ejemplo de las condiciones típicas bajo las cuales se desarrolló el uso del suelo en Costa Rica; las tierras de Puriscal cubiertas originalmente por bosques han sido, a través del tiempo, deforestadas a favor de la producción agro-pastoril, lo que

ha devenido en una considerable degradación del recurso suelo en esta región. Al principio de este proceso, los nuevos suelos recientemente deforestados tuvieron gran fertilidad y capacidad de producción, lo que le dio a Puriscal la reputación de «granero de Costa Rica» (SANDNER, 1960), principalmente por su producción de frijol y maíz.

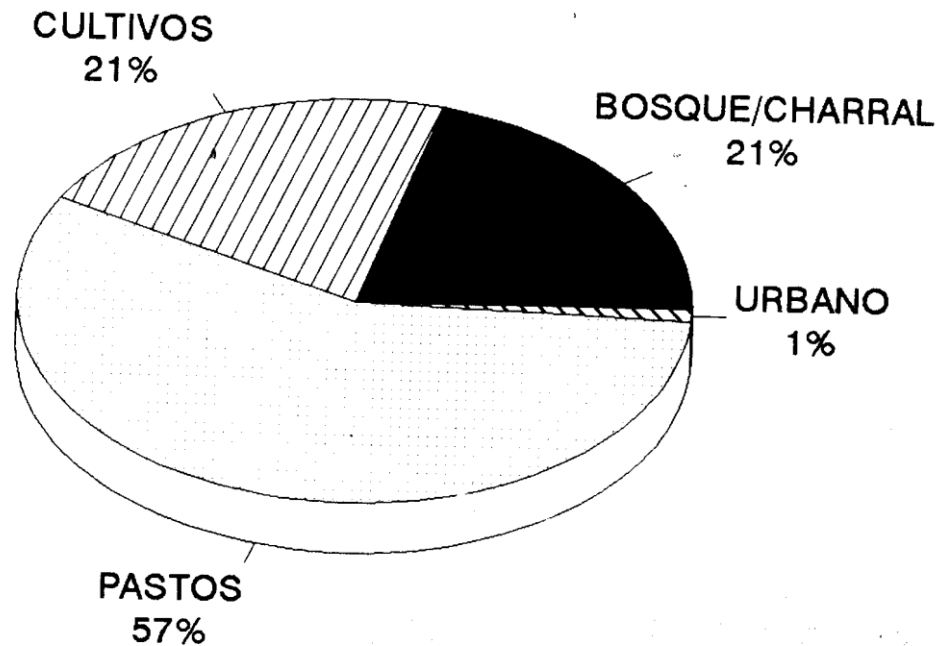
Entre 1930 y 1940 se dejó de producir solamente maíz y frijol, desarrollándose con gran fuerza la producción de tabaco y, con gran énfasis, la producción de café; posteriormente, durante la época del 50, comenzó con gran auge la expansión de las áreas dedicadas a pastos y ganadería.

Llama la atención el paisaje profundamente degradado que a simple vista se aprecian terracetos, cárcavas, deslizamientos y evidentes muestras de una influyente erosión laminar están presentes en amplias zonas. Son estas las razones por las cuales se decidió desarrollar aquí la presente investigación, ya que sus condiciones de área muy intervenida por la acción antrópica y una morfodinámica muy activa, la hacen propicia para desarrollar los objetivos propuestos en esta investigación.

Se ha escogido como área de estudio una zona de aproximadamente 225 km<sup>2</sup>, que gravita alrededor del centro poblado de Santiago de Puriscal; el uso del suelo



Mapa N° 2: Puriscal: Uso del suelo



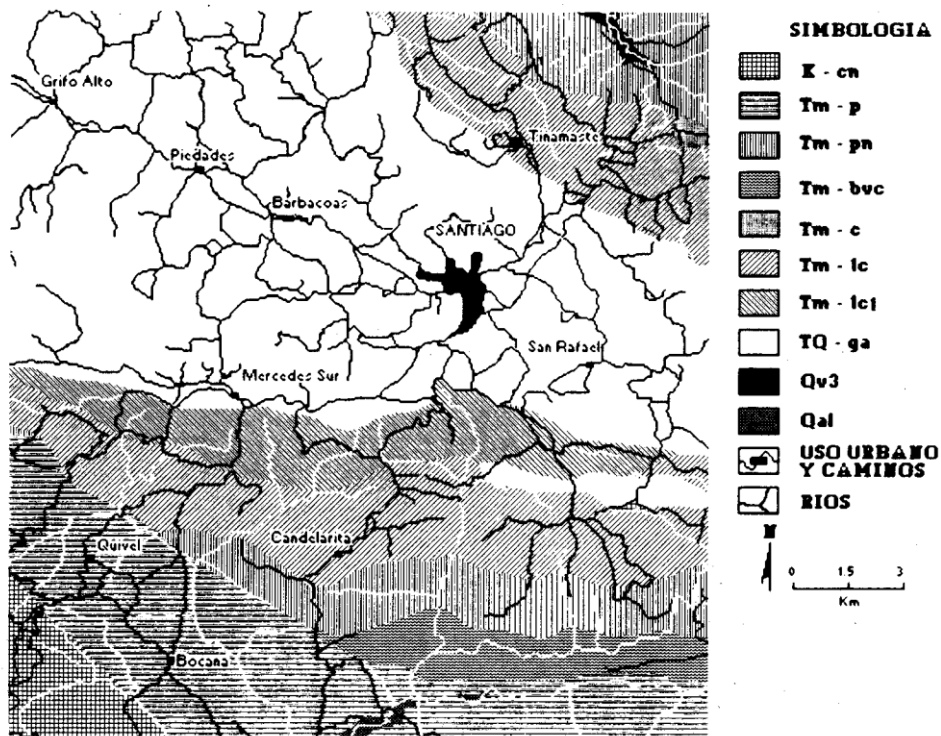
**Figura N° 1: Santiago de Puriscal: Uso del suelo**

predominante (mapa N° 2 y fig. N° 1) corresponde con pastos dedicados a la actividad ganadera, seguido del uso de suelo para cultivos, los cuales corresponden, principalmente, con cultivos permanentes como café, y otros de rotación como el tabaco con maíz y frijol; por último se localizan aquí parches de bosque alineados como bosque de galería en las partes más inaccesibles de los valles. Por lo general, están asociados a estos bosques, otros usos como charrales y arbustos dispersos. Se debe agregar otros usos como el urbano y el de reforestación, los cuales ocupan porcentajes areales muy bajos.

## 2.2 GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA

El factor geológico, como soporte físico sobre el cual se da la génesis de los suelos y se originan las formas del relieve, es uno de los que deben tener mayor influencia en los procesos degradacionales, sin embargo su verdadera significancia no ha sido posible determinarla plenamente. Uno de los principales limitantes para tenerle en cuenta, sobre todo en estudios de tipo regional, es el nivel de generalización con que son representadas las características geológicas y que en muchos casos se carece totalmente de información sobre las mismas (mapa N° 3 y fig. N° 2).

Se presentan en la zona rocas del Cretácico y del Terciario junto con sedimentos del Cuaternario. Por la intensa actividad tectónica en el pasado, y aún en el presente,



Mapa N° 3: Puriscal: Geología

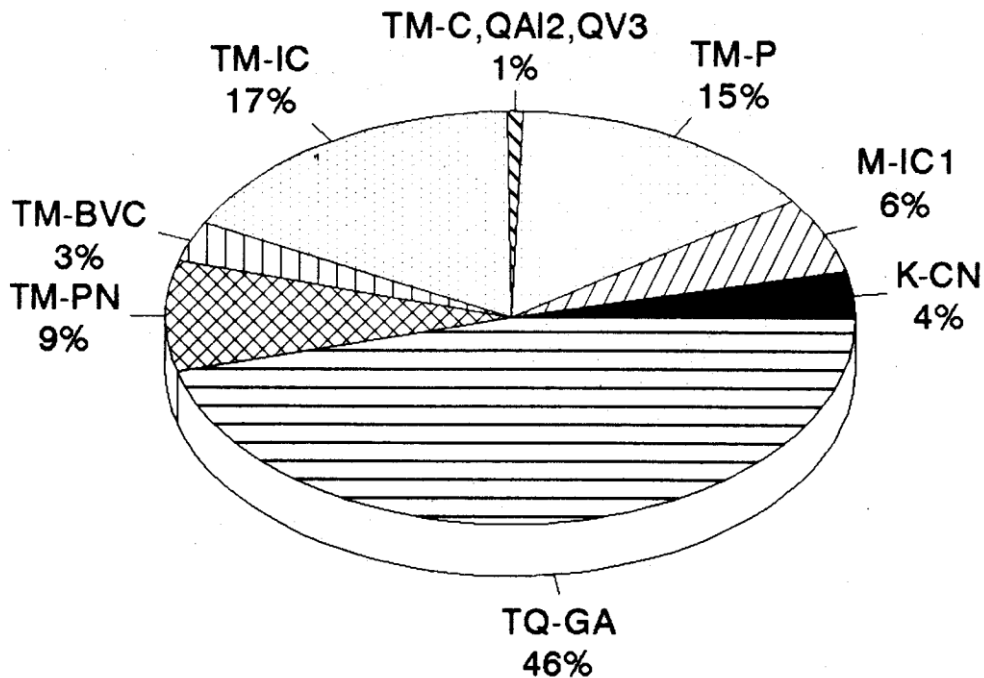


Figura N° 2: Santiago de Puriscal: Geología

hay un sistema muy denso de fallas que en gran medida controla estructuralmente los ríos de la cuenca. Ubicada en la vertiente del Pacífico, la cual es una zona de levantamiento, los procesos de incisión en la cuenca del río Parrita no han llegado al punto de equilibrio; por lo tanto, grandes áreas de la cuenca se caracterizan por pendientes muy altas, y la alimentación de ríos con agua y material en transporte se realiza en forma muy directa (Mora et al. in MAG/FAO, 1985).

## 2.2.1 Geomorfometría

Se expondrán aquí en forma detallada los resultados derivados del análisis de los siguientes parámetros geomorfométricos: densidad de drenaje de cauces de primer orden (Dd1), pendientes (P) y densidad de cárcavas (Dc). Se toman en cuenta solamente éstos debido a que son los de más fácil obtención a partir de la información disponible, principalmente mapas topográficos de escala 1:50.000, fotografías aéreas y trabajo de campo. Se debe tener presente que la escala de trabajo es a nivel regional, prácticamente es imposible obtener el detalle de otros datos como por ejemplo, longitud de las pendientes, forma de las laderas, factor K. Por la poca extensión del área estudiada el factor climático se asume como homogéneo, además existe poca información climatológica específica del área estudiada, la cual permitiría establecer una diferenciación espacial objetiva.

### 2.2.1.1 Densidad de drenaje (Dd)

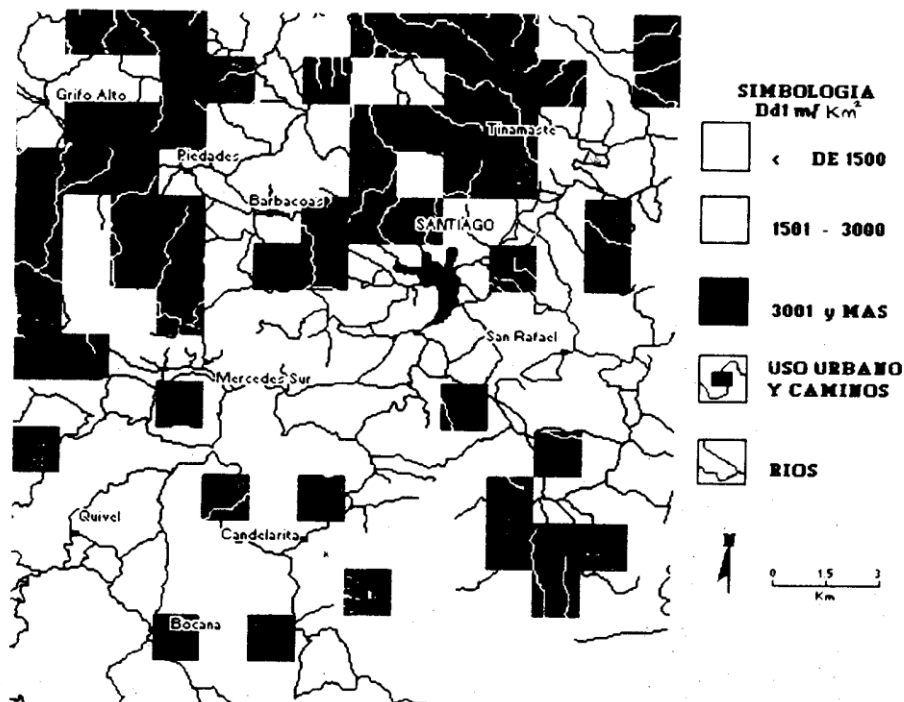
Como se refiere en los contenidos teóricos, este parámetro geomorfométrico es una de las variables geomorfológicas más significativas; en este caso se han cuantificado, para la zona de estudio, los talvelgs de primer orden, restituidos cartográficamente a partir de mapas topográficos de escala 1:50.000. Se han tomado solamente éstos y no los de mayor jerarquía, ya que son los de formación más reciente y por lo tanto representativos de las condiciones climáticas, pedológicas y geomorfológicas más asociadas con la «historia físico-geográfica» actual de la zona estudiada (CHINAMANI, 1981 Y GARCIA, 1991).

Una vez digitalizado el mapa de cauces de primer orden, se le aplicó un algoritmo de cuantificación mediante el SIG/IDRISI, para obtener un primer mapa de densidad de drenaje de cauces de primer orden (Dd1) (mapa N° 4), la (Dd1) se calculó con un nivel de detalle de un kilómetro cuadrado, los resultados se indican en la Tabla N° 1.

**TABLA N° 1**  
**Santiago, Puriscal: Dd1 m / km<sup>2</sup>**

Mínimo	413
Máximo	4.735
Promedio	2.558





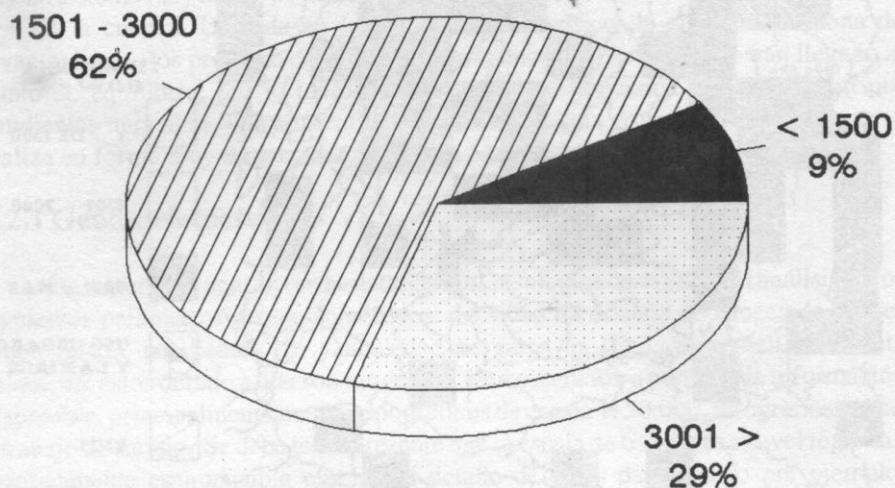
**Mapa N° 4: Densidad de drenaje de orden uno (m/km<sup>2</sup>)**

Para efectos de correlación espacial, los datos se jerarquizaron de tal manera que permitieran una estructuración espacial y cuantitativa más factible de analizar, en la fig. N° 3 se pueden observar los datos correspondientes.

Como se aprecia en el mapa mencionado antes, la distribución espacial de las clases, tiende a que la categoría de montos menores se ubica como pequeñas manchas en los sectores este y sur, los montos intermedios, predominantemente en el centro y al sur, y los montos mayores de Dd1 se concentran en el norte y noreste en las cuencas de los ríos Picagres, Quebrada Grande y San José.

### 2.2.1.2 Pendientes

Para la elaboración del mapa de *pendientes* (P) se procedió a diseñarlo de forma manual, ya que al generarlo, a partir de un mapa digitalizado de curvas de nivel por medio del Sistema de Información Geográfica, no dio los resultados esperados, debido a que el sistema crea polígonos que no se ajustan a las condiciones reales del relieve. Por lo tanto, se diseñó una plantilla para medición de pendientes (HERNANDEZ, 1994) y se aplicaron los rangos modificados de pendientes propuestos por Van Zuidan



**Figura N° 3: Santiago de Puriscal: Densidad de drenaje de primer orden m/km<sup>2</sup>**

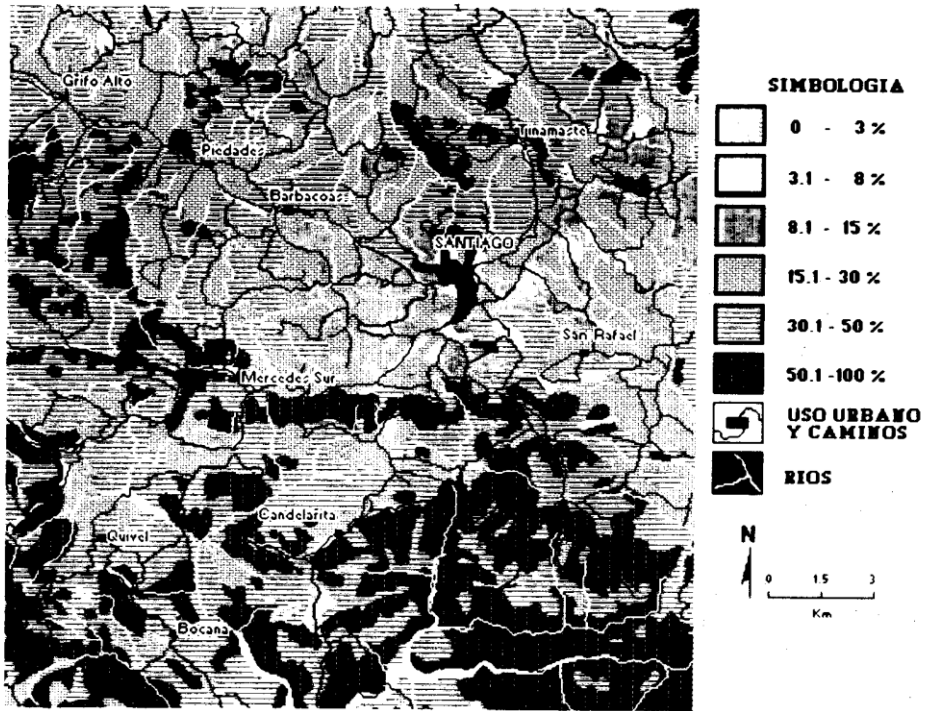
(1979) para los estudios de erosión de suelos. El resultado se refleja en el mapa N° 5, y en la fig. N° 4.

Como se aprecia en el mapa correspondiente, son pocos los sectores en los cuales predominan pendientes de valores bajos, lo cual es lógico tomando en cuenta las características fisiográficas de la zona estudiada, en la cual prevalece la presencia de laderas de profundos y rejuvenecidos valles, factor de gran influencia en la degradación de suelos y en el condicionamiento del uso del mismo. Las pendientes encontradas en esta zona son representativas de un gran porcentaje del área total del territorio costarricense.

### 2.2.1.3 Densidad de cárcavas (Dc)

Por medio de fotografía aérea de escalas entre 1:20.000 y 1:50.000, se procedió a hacer un levantamiento, con la mayor resolución posible, de todas las cárcavas y áreas afectadas por terracetos existentes en la zona. Desde un inicio se constituyó en limitante para la identificación de las mismas zonas ocupadas por cultivos, vegetación alta y bosques, sin embargo el detalle perdido no parece ser significativo.

En el mapa N° 6 se puede apreciar que la distribución espacial de las cárcavas es, a simple vista, aleatoria, sin concentraciones espaciales importantes que permitan asociarlas con ciertos factores, y consecuentemente proponer que su ocurrencia podría deberse a la influencia de esos factores físicos específicos. Por lo tanto, se impone aquí



Mapa N° 5: Puriscal: Pendientes (%)

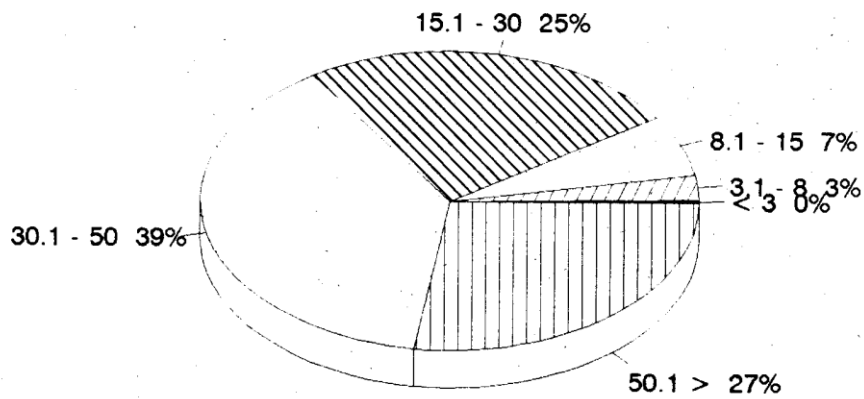
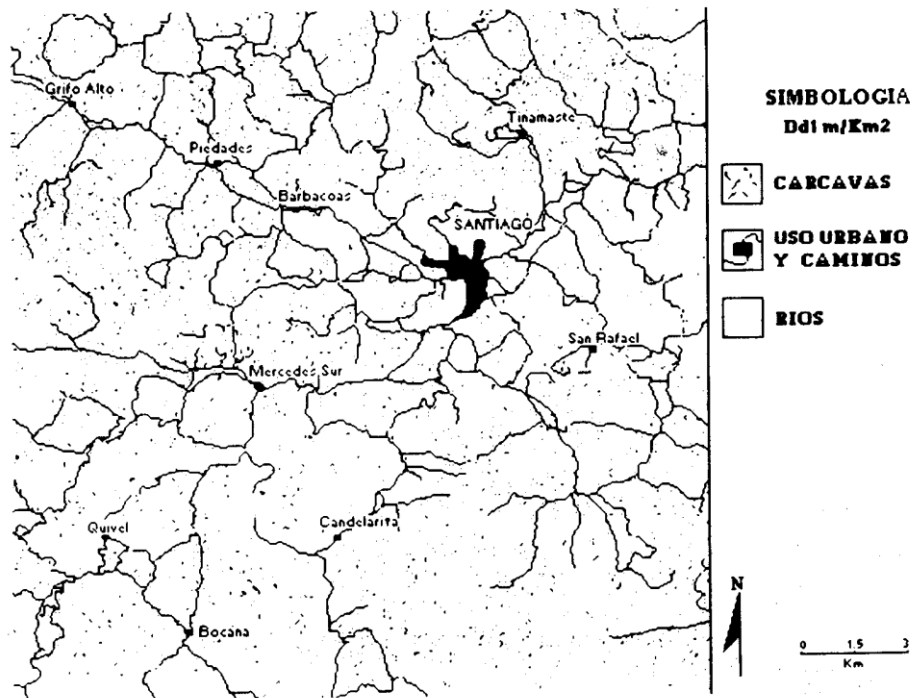


Figura N° 4: Santiago de Puriscal: Pendientes (%)

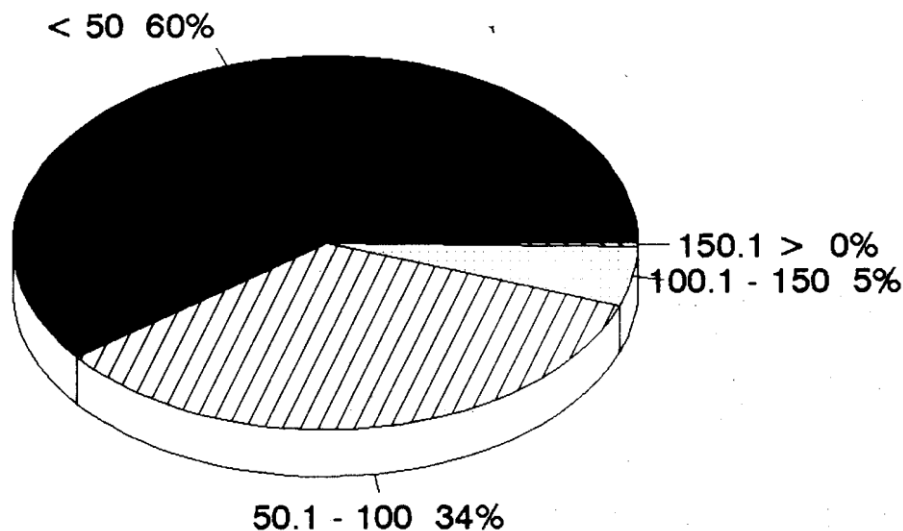


Mapa N° 6: Puriscal: Cárcavas

la necesidad de encontrar un mecanismo que permita alcanzar, en términos espaciales, una estructuración más definida para su correspondiente análisis. Es, entonces, cuando se nota la versatilidad de los SIG en estos casos, ya que él mismo permitió el desarrollo de un algoritmo para la cuantificación espacial de las densidades de cárcavas para un área dada.

Se procedió por lo tanto, a calcular la densidad de cárcavas en metros por hectárea. Esta unidad espacial se considera la de mayor significancia en términos reales, ya que no generaliza tanto la información como si se la calculara para una unidad mayor como por ejemplo  $1 \text{ km}^2$ . Esto se debe a que los alcances o «área de influencia» de una o varias cárcavas en un mismo sitio es más importante en su entorno inmediato como lo puede ser el área definida a nivel de hectárea, asimismo, de la cuantificación se desprende que el total de área afectada por algún grado de carcavamiento es del 30,50 %. Los valores de  $D_c$  oscilan desde áreas no afectadas por cárcavas hasta sectores con máximos de  $192 \text{ m/ha}$  y un promedio de  $22,24 \text{ m/ha}$ .

Con base en este resultado se procedió a establecer una jerarquización empírica, para la cual se consideró que una diferencia aproximada de  $50 \text{ m/ha}$  puede ser bastante representativa para alcanzar una significativa estructuración espacial (Fig. N° 5).



**Figura N° 5: Santiago de Puriscal: Densidad de cárcavas m/ha**

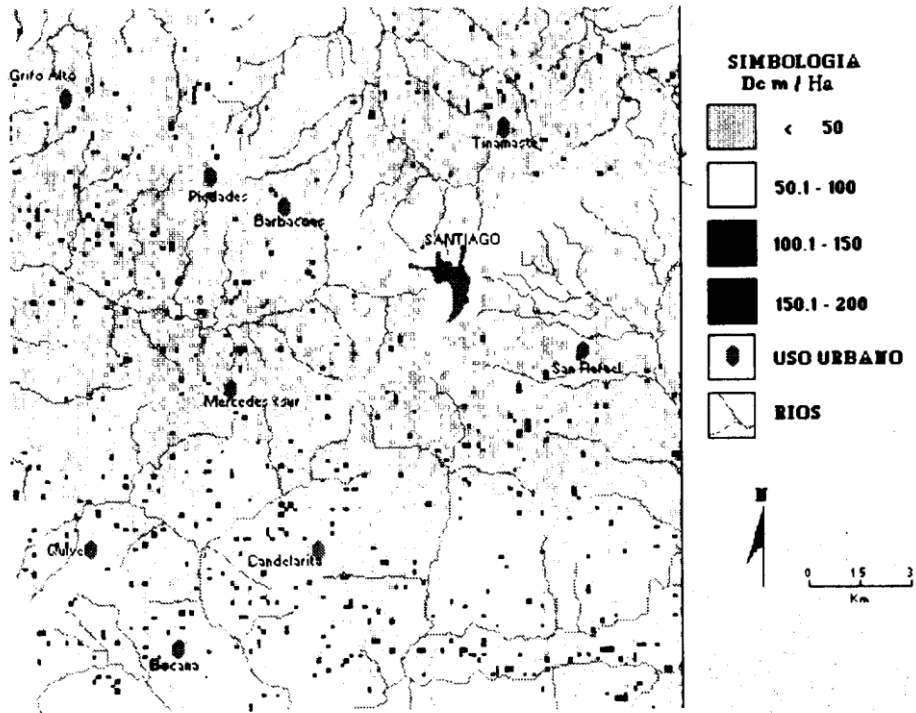
El mapa resultante de tal estructuración es el N° 7. Se aprecia cómo la distribución espacial de las clases continúa aparentando cierto nivel de aleatoriedad, sin concentraciones espaciales significativas.

### 2.3 SUELOS

Los suelos predominantes son del orden de los ultisoles (fig. N° 6, mapa N° 8), los cuales prácticamente ocupan toda la zona estudiada. En la figura y mapa respectivos se muestra la relación a nivel de subórdenes, Alvarado y Núñez (1985) comentan que, para la zona, las características físicas y químicas de los suelos no forman factores limitantes serios para el uso agrícola, es decir, sin tener en cuenta otros factores adicionales como clima o topografía.

Muchos suelos tienen una profundidad efectiva mayor a 10 cm, formada por los horizontes A y B, las texturas van desde arcillosas hasta franco-arcillosas, con tendencia a mayor arcilla a mayor profundidad.

Para esta zona en particular, a los ultisoles se les describe como suelos de relieve fuerte ondulado, profundos, textura fina, con colores pardo oscuro a pardo rojo en algunos casos y en otros, rojizo a rojo amarillento, de bien drenados a moderadamente drenados, poco permeables y de fertilidad que va de baja a moderada (MAG-SEPSA, 1991).



Mapa N° 7: Puriscal: Densidad de cárcavas (m/ha)

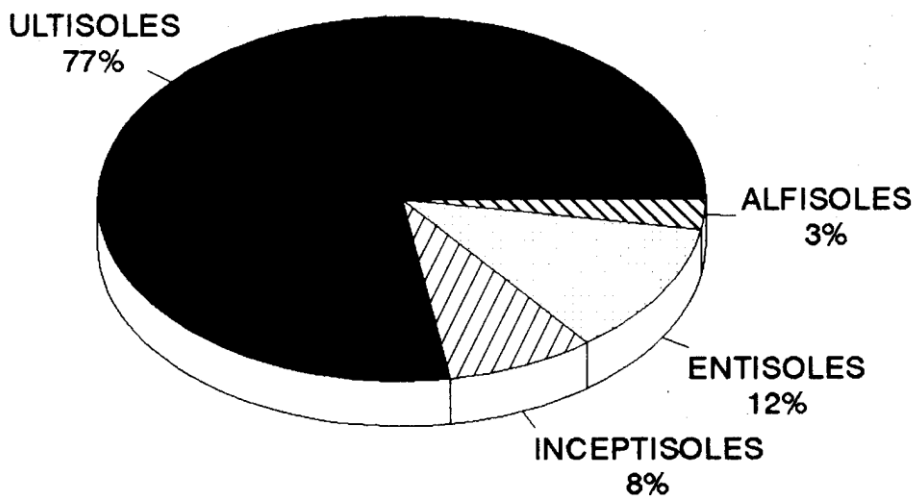
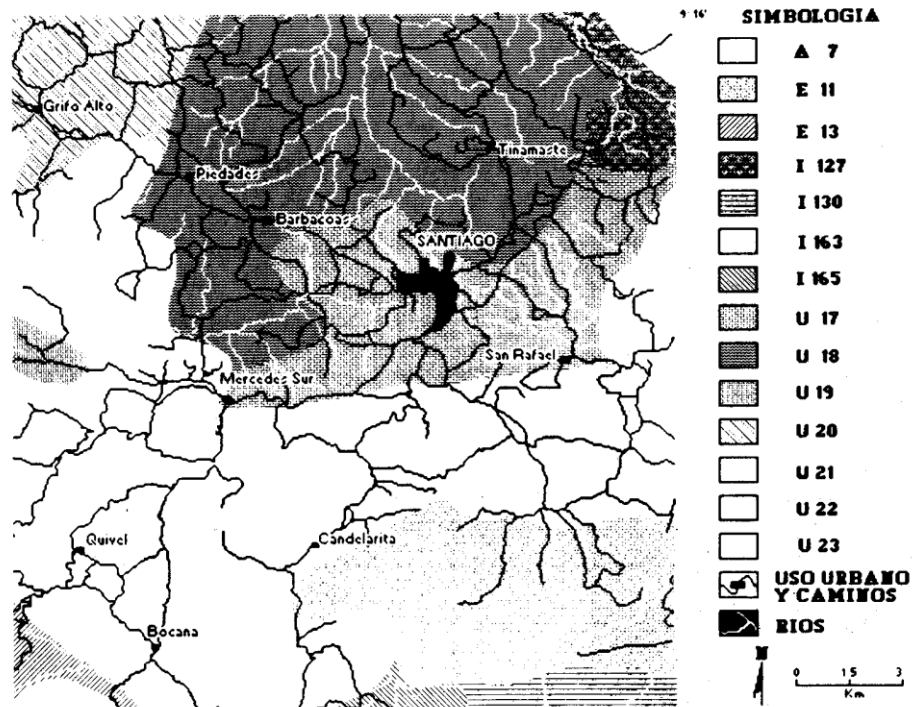


Figura N° 6: Santiago de Puriscal: Ordenes de suelos



Mapa N° 8: Puriscal: Suelos

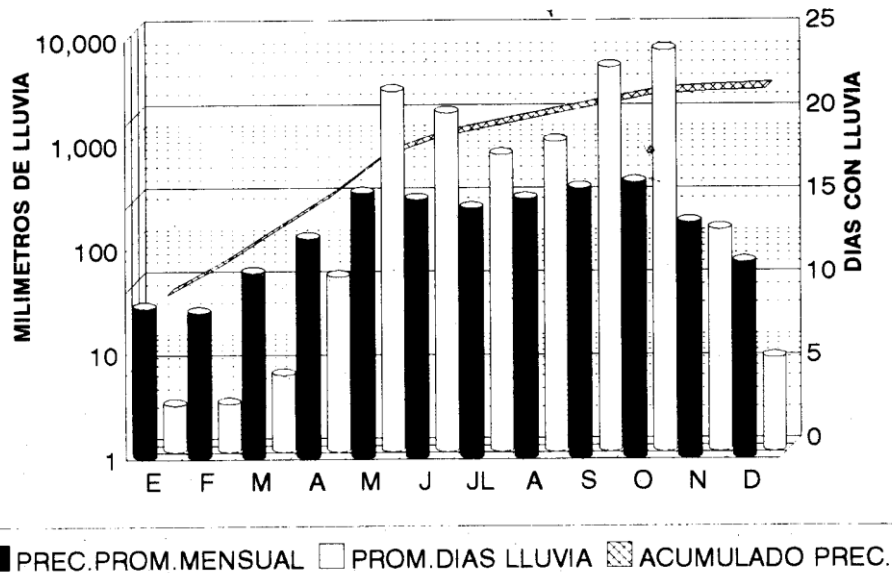
Por otro lado, existe también la presencia del orden de los inceptisoles. Se les describe como: suelos de relieve ondulado, profundos, de textura moderadamente fina a finas, pardo muy oscuro a pardo amarillento oscuro, de drenaje bueno y moderada permeabilidad, bajos en fertilidad.

En cuanto a los entisoles, son suelos de terrenos escarpados a fuertemente escarpados, son superficiales a poco profundos, de textura fina, rojizos a pardo fuerte, drenaje algo excesivo y moderadamente permeables y de fertilidad baja.

Los alfisoles encontrados en la zona se les describe como de relieve ligeramente escarpado, profundos, texturas arcillosas, colores rojizos, de drenaje bueno, poco permeables y de fertilidad baja (MAG-SEPSA, 1991).

## 2.4 CONDICIONES CLIMATICAS

El clima de la zona se clasifica como tropical húmedo, con una marcada estación seca que dura de diciembre a abril (fig. N° 7). El promedio anual de lluvias alcanza los 2.541 mm. De igual manera, el promedio de días con lluvia es de 165, con un monto



**Figura N° 7: Santiago de Puriscal: Climograma**

aproximado de 15 mm por día, concentrados en un 85% en el período de mayo a noviembre. A la vez, el valor de la erosividad anual promedio (factor R de la EUPS) fue calculado por VAHRSON (1991) en 255 unidades, valor que según el mismo autor se puede considerar moderado para las condiciones climáticas de Costa Rica.

PALACIOS, G. y ALFARO, M. (1991) tipifican las condiciones climáticas de la zona diciendo que la principal época de lluvias va de mayo a octubre. Entre los meses de diciembre a marzo se da una época seca bien definida y que los meses de abril y noviembre son los de transición entre la época lluviosa y la época seca. El monto máximo de las precipitaciones ocurre en el mes de octubre, con un valor superior a los 400 mm, mientras que de enero a marzo la precipitación es inferior a los 50 mm.

En cuanto a las lluvias máximas, los autores antes mencionados indican que la zona de Puriscal presenta valores que, al ser comparados con otras zonas de Costa Rica, resultan apenas moderados. Los meses de octubre y setiembre son los que presentan los valores máximos, tanto para registros diarios (24 horas), con cantidades alrededor a los 130 mm, como para temporales (48 y 72 horas), donde los valores alcanzan 225 y 300 mm, respectivamente.

Los anteriores autores concluyen que la intensidad de la lluvia no es la principal causa del fuerte proceso degradacional del suelo que sufre la zona de Puriscal y sus



alrededores, puesto que los valores de las lluvias, tanto de corta como de larga duración no alcanzan valores que pudieran considerarse como extremos, por lo que el potencial erosivo de la lluvia puede considerarse como moderado.

### III. RESULTADOS MODELO GEOMORFOMETRICO

#### 3.1 CARCAVAS VRS. DENSIDAD DE DRENAJE (Dd1)

Como el objetivo de esta investigación, consistió principalmente, en identificar qué tipo de relación espacial puede existir entre las características geomorfológicas y la mayor o menor ocurrencia de cárcavas, se procedió, en primera instancia, a hacer un «overlay» entre el mapa de Dd1 (Mapa N° 4) y el mapa de cárcavas (N° 6).

El resultado dio una muy importante relación positiva entre ambos factores, ya que como se aprecia en la tabla N° 2, en las zonas con valores de menor densidad de drenaje se refleja de igual manera valores bajos de densidad de cárcavas, y el aumento de la densidad de éstas es progresivo en la misma medida que aumenta la densidad de drenaje. Aunque no se trata en ningún momento de establecer una ecuación de regresión que caracterice la correlación entre ambos factores, ya que obviamente no se abarca una serie de variables que también influyen en el desarrollo de las cárcavas; estos datos se incluyen aquí como la única alternativa de cuantificación de las posibles correlaciones entre las variables tratadas. El SIG/IDRISI utilizado brinda la facilidad de generar un análisis espacial a partir de la sobrepuesta de dos mapas dados, un gráfico y una ecuación de regresión (fig. N° 8). El coeficiente calculado  $r = .77$  es, desde la perspectiva analítica de la geomorfología, un aceptable indicador de correlación.

Se puede indicar, entonces, que el parámetro morfométrico Dd1 facilita la identificación de la susceptibilidad relativa al desarrollo de cárcavas. Tómese en cuenta que la jerarquización de la Dd1 se fundamenta empíricamente, y que a pesar de esto se ha reflejado una importante relación positiva entre los rangos de Dd1 y Dc.

**TABLA N° 2**  
**Santiago, Puriscal: Densidad de cárcavas**  
**según densidad de drenaje de primer orden**

Dd1 m/km <sup>2</sup>	Dc m/km <sup>2</sup>
1.500	1.787
1.501-3.000	2.176
3.001 y más	2.225

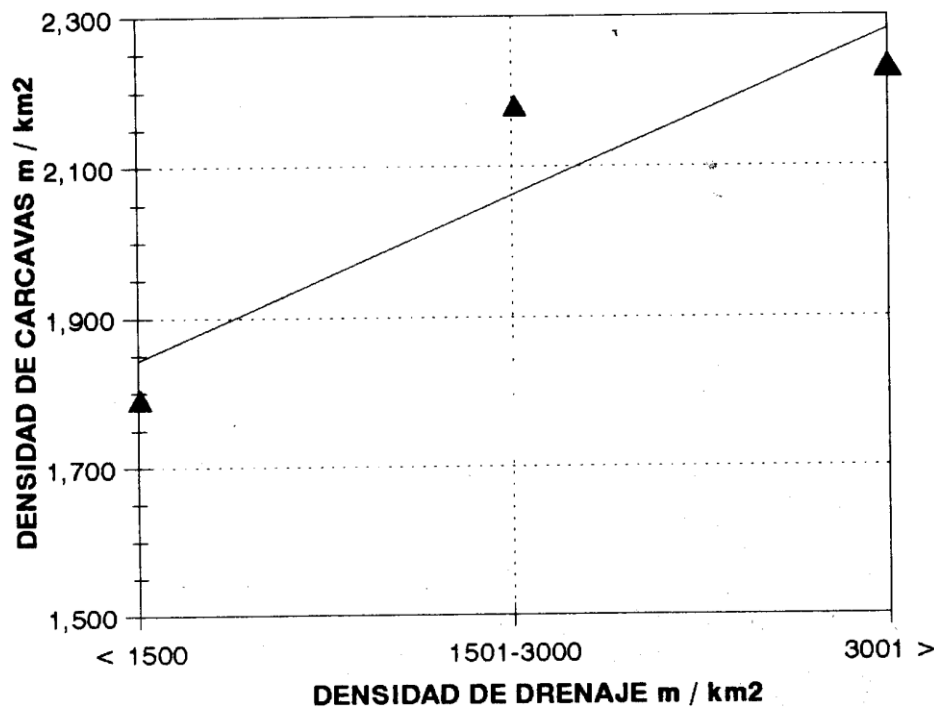


Figura N° 8: Correlación espacial, densidad de drenaje orden 1 vrs. densidad de cárcavas

### 3.2 CARCAVAS VRS. PENDIENTES

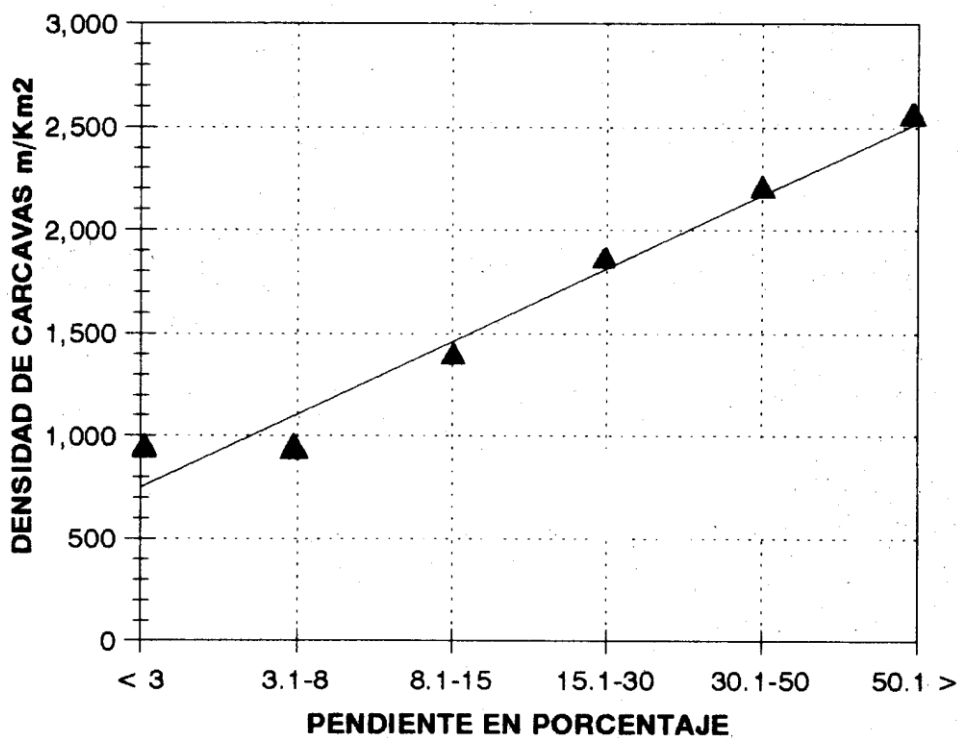
De igual manera que se analizó la correlación entre los mapas de cárcavas y la Dd1, se procedió con respecto a las pendientes y las cárcavas. Para esto se calculó cuáles podrían ser las correspondientes densidades de cárcavas según cada clase dependiente, lo que da como resultando los datos indicados en la tabla N° 3, y según la fig. N° 9 el coeficiente de correlación positiva de  $r=0.64$ . Con esto se demuestra que también existe una importante relación entre las pendientes y la susceptibilidad relativa al desarrollo de cárcavas.

### 3.3 MODELO GEOMORFOMETRICO

Con base en los resultados antes acotados, se deduce que efectivamente los parámetros geomorfométricos densidad de drenaje y pendientes tienen una significativa relación con la génesis y desarrollo de cárcavas. Obviamente, como ha sido demostrado por diferentes investigadores y como ya se ha referido en este trabajo, hay

**TABLA N° 3**  
**Santiago, Puriscal: densidad de cárcavas según pendiente**

PENDIENTE %	Dc m/km <sup>2</sup>
< 3	925
3.1 - 8	915
8.1 - 15	1.384
15.1 - 30	1.863
30.1 - 50	2.193
<50.1 >	2.548



**Figura N° 9: Correlación espacial, pendientes vrs. densidad de cárcavas**

un mayor número de factores físicos y antrópicos que se incorporan en la dinámica de carcavamiento; sin embargo, hasta el momento no se ha alcanzado una síntesis metodológica que incorpore todos los componentes y que permita de alguna manera aproximarse a un cierto nivel de predicción o de identificación de zonas con mayor o

menor susceptibilidad a la ocurrencia de cárcavas, especialmente en lo que se refiere a su posible distribución espacial.

Partiendo de los resultados obtenidos, es pertinente valorar cuál puede ser el nivel de eficacia de un modelo empírico, el cual se basa en la «combinación» espacial de los dos parámetros geomorfométricos hasta aquí analizados.

Para determinar si la Dd1 y la P se podrían considerar como variables independientes entre sí, se procedió, utilizando los mapas correspondientes, a calcular el nivel de correlación espacial entre ambas. El resultado generado indicó que no existe una correlación significativa que haga pensar en que, a través de la incorporación de una de ellas en el modelo propuesto, se estaría de alguna manera valorando o incluyendo en doble medida un mismo factor. En otros términos, esto representa que cada factor por sí mismo es un componente independiente de una «ecuación» cuya función refleja una importante relación con el desarrollo de las cárcavas, y que, por lo tanto, su combinación espacial indicará, de manera más representativa, la mayor o menor susceptibilidad relativa al desarrollo de cárcavas.

Para crear el modelo fue necesario valorar en forma empírica cuál podría ser la mejor manera de asignarle un peso específico a cada variable y a los posibles rangos propuestos para cada una de ellas; por ser el factor pendiente un rasgo geomorfológico más concreto, fácil de identificar en el campo, y por estar de sobra demostrado para estudios de erosión su influencia en el proceso degradacional (KIRKBY et al., 1984), y en comparación con el factor Dd1, cuya cartografía es producto de un cálculo promedio y un nivel de generalización en determinados rangos, lo cual hace muy difícil su visualización en el campo, es que se le ha asignado al factor pendiente una mayor influencia a la hora de crear el modelo.

En la tabla N° 4 se muestra la forma en cómo han sido correlacionadas ambas variables para obtener como producto de esto un total de seis clases. Cada una de ellas es indicadora de un nivel relativo de susceptibilidad al desarrollo de cárcavas. Ha sido necesario jerarquizar en cuatro clases la Dd1 con la finalidad de abarcar en forma específica posibles valores superiores a 3.000 m/km<sup>2</sup>, los cuales fueron hallados para algunos otros sitios estudiados.

Como se ha reiterado, este es un enfoque empírico sobre la problemática espacial de la ocurrencia de cárcavas, por lo tanto la concepción del modelo es igualmente empírica. Así, se tomarán como criterios para el establecimiento de las seis clases, a) que pendientes con valores bajos, correlacionados espacialmente con valores bajos de Dd1, suponen una menor susceptibilidad al desarrollo de cárcavas, y b) que conforme aumenta la pendiente y a la vez en estos espacios aumenta la Dd1, se tendrá un aumento en la susceptibilidad para la ocurrencia de cárcava.

**TABLA N° 4**  
**MODELO GEOMORFOMETRICO:**  
**SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA AL DESARROLLO DE CARCAVAS**

Pendiente	< 3%	3.1-8%	8.1-15%	15.1-30%	30.1-50%	50.1>
<b>Dd1</b>						
Menos 1.000	I	I	III	III	V	V
1.000 a 2.000	I	I	III	III	V	V
2.000 a 3.000	II	II	IV	IV	VI	VI
3.000 y más	II	II	IV	IV	VI	VI

Conforme a lo propuesto en este modelo, se tendrá entonces que las zonas que clasifiquen en clase I serán las menos propensas a ser afectadas por cárcavas y que por el contrario, las zonas que clasifiquen en las clases V y VI serán las más afectadas por el desarrollo de cárcavas.

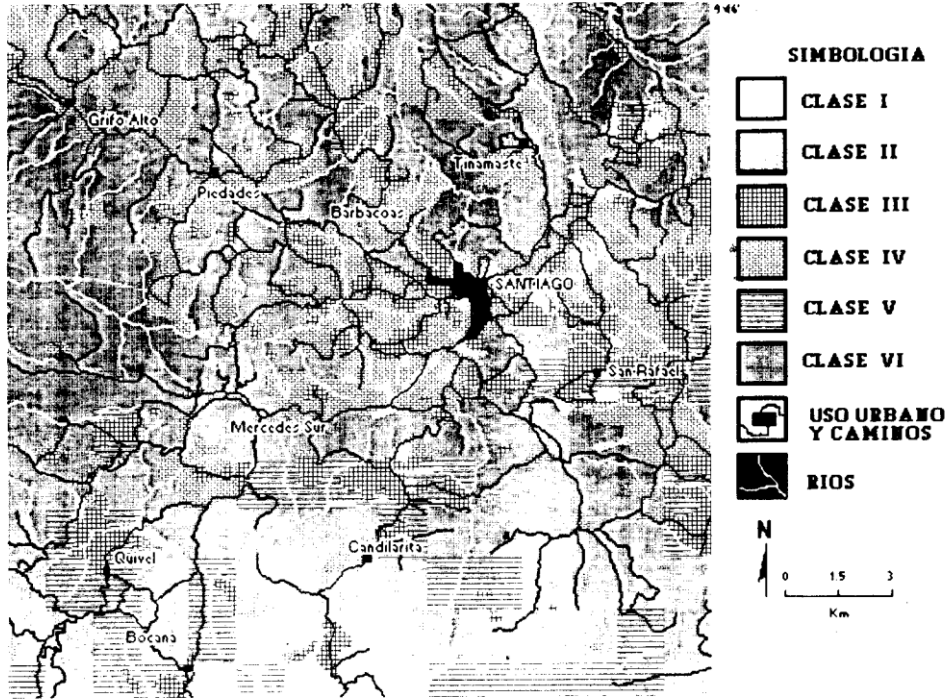
### 3.4 MODELO GEOMORFOMETRICO VRS. AREAS DEGRADADAS

El método para comprobar si el modelo propuesto cumple con su función de zonificar jerárquicamente la susceptibilidad al proceso de carcavamiento, es comparar el mapa de susceptibilidad (según el modelo, mapa N° 9), con los mapas que representan los procesos degradacionales reales que afectan la zona estudiada, a saber el mapa N° 6 de cárcavas y el mapa N° 10 en el que se representan las zonas afectadas por algún grado de desarrollo de terracetos. Ambos son los procesos degradacionales más evidentes en el área de estudio.

Para poder calcular la Dc según cada clase de susceptibilidad, lo primero que se debió hacer fue la creación de dicho mapa, por lo tanto se planteó un «overlay» entre el mapa de pendientes (mapa N° 5) y el mapa de Dd1 (mapa N° 4). El producto de esta operación se reclasificó según las seis clases que se proponen en la tabla N° 4. Para efectos de la investigación, a este mapa se le llamará de susceptibilidad al carcavamiento (mapa N° 9).

Una vez cuantificada la Dc según la clase de susceptibilidad, los resultados son los que se exponen en la tabla N° 5 y fig. N° 10. Se aprecia que, efectivamente se produce una «correlación positiva» ( $r = 0.99$ ) entre las clases y los valores calculados de Dc.

Por otro lado, al comparar las áreas afectadas por terracetos según cada clase de susceptibilidad (fig. N° 11) se evidencia cómo, principalmente para las clases 3, 4, 5 y 6, que son las de mayor presencia areal, los porcentajes de superficie degradada por



Mapa N° 9: Puriscal: Susceptibilidad al cárcavamiento

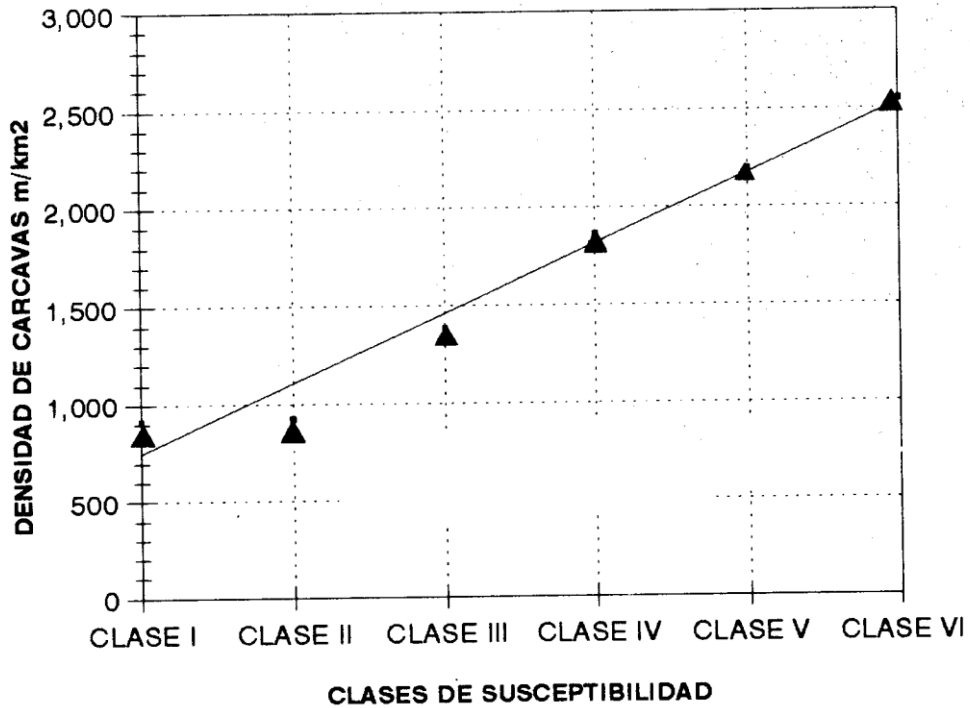
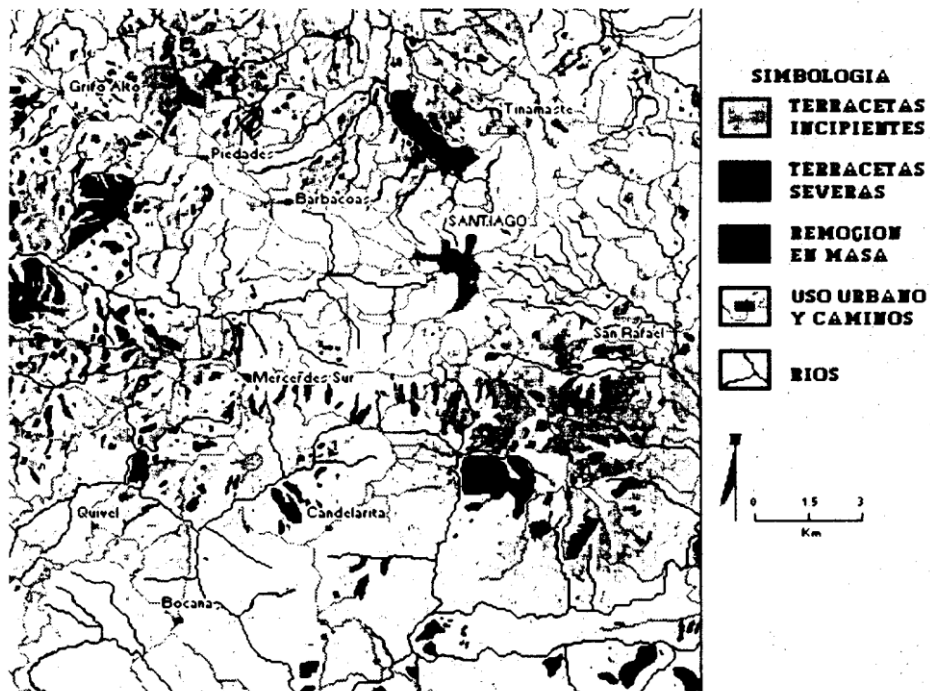


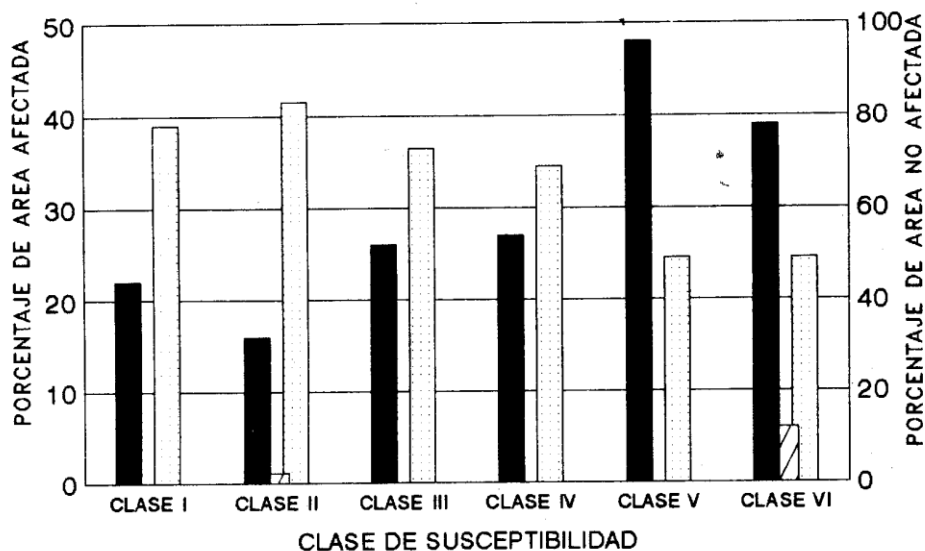
Figura N° 10: Correlación espacial, clases de susceptibilidad vrs. densidad de cárcavas

**TABLA N° 5**  
**Santiago, Puriscal**  
**DENSIDAD DE CARCAVAS (m/km<sup>2</sup>)**  
**SEGUN CLASE DE SUSCEPTIBILIDAD AL CARCAVAMIENTO**

CLASE	Dc m/km <sup>2</sup>	% de clase
I	915	2.51
II	925	1.06
III	1.384	11.20
IV	1.863	20.00
V	2.193	15.29
VI	2.548	49.90



**Mapa N° 10: Puriscal: Areas afectadas por terracetas**



■ TERRACETAS INCIPIENTES ▨ TERRACETAS SEVERAS □ NO AFECTADO  
**Figura N° 11: Porcentaje de área afectada por terracetas según clase de susceptibilidad**

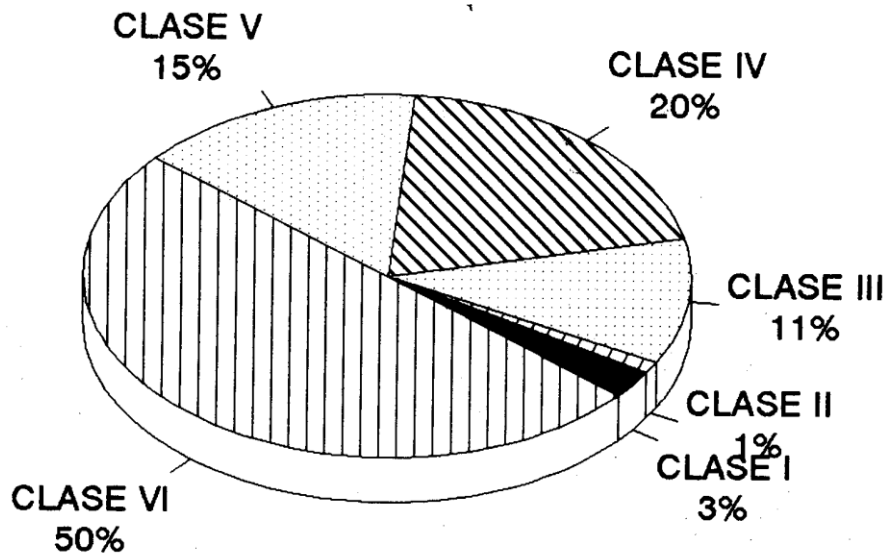
terracedas son significativamente menores para las dos menos susceptibles, 3 y 4, mientras que las dos de mayor susceptibilidad, 5 y 6, se muestran relevantemente superiores en cuanto al monto areal afectado por el citado proceso degradacional.

*Los resultados obtenidos como producto de comparar la zonificación de susceptibilidad con las características geomorfológicas reales en cuanto a la presencia de cárcavas y/o de terracetas, representan un muy significativo nivel de correlación espacial. Podemos afirmar que la zonificación de susceptibilidad diferencial al desarrollo de cárcavas, establecido mediante el modelo propuesto, tiene un nivel de predicción, o más bien de aproximación espacial, muy confiable y ajustado con la ocurrencia real de cárcavas en sus diferentes niveles de intensidad.*

### 3.2.1 Comentarios al mapa de susceptibilidad

En la fig. N° 12 se representan los porcentajes de la ocupación areal de cada clase de susceptibilidad. Llama la atención como predomina la clase VI y, por el contrario la ocupación de las clases I y II es mínimo, prácticamente inexistente. En el mapa N° 9 se aprecia como las clases II, III y IV se concentran principalmente hacia el cuadrante noreste de la región estudiada, aproximadamente en lo que puede ser la periferia del centro urbano de Santiago de Puriscal, mientras que las clases IV y V predominan ampliamente en los sectores noroeste, suroeste y sureste.





**Figura N° 12: Porcentaje areal de las clases de susceptibilidad**

Al comparar este mapa de susceptibilidad, con el mapa de uso del suelo (mapa N° 2 y fig. N° 13), se aprecia como la actividad agrícola se concentra mayoritariamente en las II, III y IV, mientras que en las clases V y VI este tipo de uso baja sensiblemente; esto es un posible indicador de que para esta zona específica, las «mejores» tierras agrícolas son, posiblemente, las que se localizan en las clases II, III y IV; obviamente las menos aptas son las de tipo V y VI.

Si siguiendo con esta misma línea de inferencia, al sobreponer el mapa de uso del suelo con el mapa de susceptibilidad, se aprecia como la red de caminos ocupa principalmente sectores de clase I, II, III y IV (fig. N° 14), se muestran aproximadamente las áreas relacionadas u ocupadas por infraestructura vial.

Se aprecia como conforme aumenta la clase de susceptibilidad, disminuye la ocupación u asociación con la infraestructura vial. Se ha querido referir este análisis con respecto a la red vial, ya que ésta tiene como una de sus funciones básicas servir de apoyo en las labores relacionadas principalmente con la agricultura. Al respecto, GUEDEMAN (1978) refiere que una carretera representa el símbolo más gráfico del aumento de interés en áreas fronterizas.

La relación entre el uso del suelo y la susceptibilidad del terreno al desarrollo de cárcavas es punto de apoyo que respalda, hasta cierto nivel, los resultados de la zonificación establecida mediante el análisis geomorfológico. Es evidente cómo los

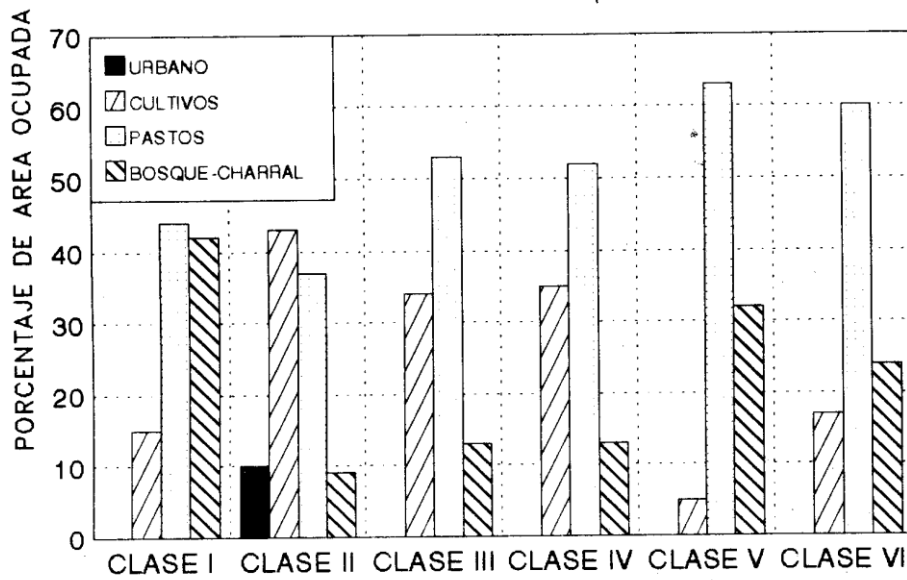


Figura N° 13: Relación de ocupación areal entre uso del suelo y clases de susceptibilidad

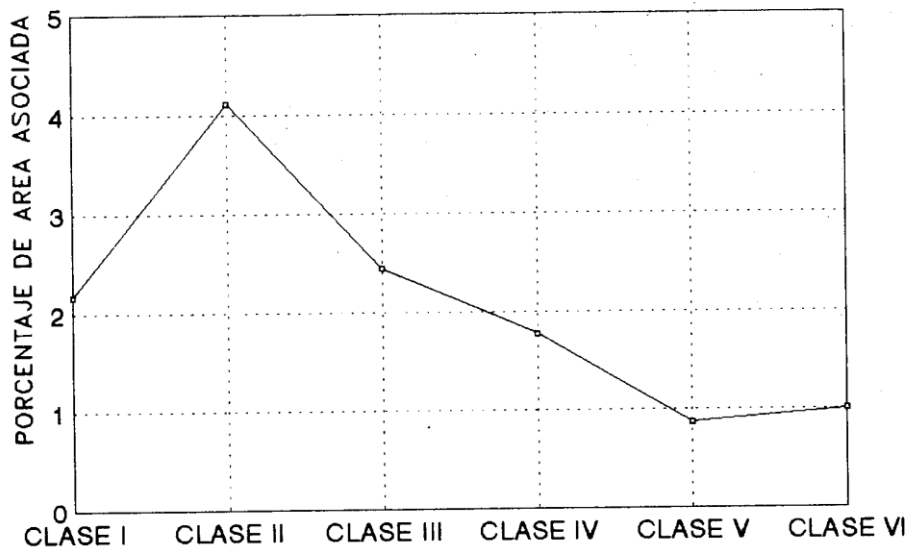


Figura N° 14: Relación areal entre zonas asociadas con infraestructura vial y clases de susceptibilidad

agricultores, mediante el conocimiento empírico de sus terrenos, han ido seleccionando los mejores «sitios» para explotar agrícolamente sus fincas, dejando para otros usos (principalmente pasto) las tierras menos aptas; es lógico pensar que zonas en las cuales la actividad económica principal es la agricultura, los mejores terrenos para esta actividad sean ocupados en forma temprana, en comparación con terrenos de condiciones más limitantes.

Comentario aparte merece el hecho de que prácticamente el 65% de la zona estudiada corresponde a terrenos de clase 5 y 6, indicador de lo frágil que resultan estos terrenos. De este 65% mencionado, un 61% es dedicado a ganadería, la mayor parte de estas áreas con pastos se muestran evidentemente dañadas por terracetos, las cuales van progresivamente degenerando en deslizamientos en algunos casos, y en otros dan origen a cárcavas. Un 27% aproximadamente corresponde con bosque y charral; realmente este uso está ubicado en terrenos marginales, cercanos a las quebradas o ríos, y sus condiciones topográficas son absolutamente limitantes para cualquier otro tipo de aplicación; por último, solo un 12% de estas zonas se dedica a cultivos.

### 3.2.2 Réplica de resultados

Una vez obtenidos los resultados mencionados para la zona de Puriscal, se procedió a aplicar el modelo a otras zonas del país, con el objetivo de valorar los resultados y observar si los mismos eran consecuentes con los obtenidos para Puriscal. Los lugares escogidos corresponden con zonas cuyas características físico-geográficas (geomorfología, clima, suelo), no son necesariamente semejantes a las de Puriscal. Por ejemplo, Hojancha, Liberia y Santa Cruz tienen un clima relativamente más «seco», mientras que Tilarán y Buenos Aires poseen características de mayor precipitación.

En la fig. N° 15 se aprecia como para cada uno de los sitios estudiados, la densidad de cárcavas aumenta conforme aumenta la clase de susceptibilidad. Aunque los montos de densidad son diferentes para cada uno de los lugares, la tendencia es la misma para todos. Los resultados obtenidos, tanto en el cálculo de las relaciones particulares entre la Dc según pendiente, Dc según Dd1, como la Dc según el modelo geomorfométrico, son los que se detallan en las tablas N° 6, 7 y 8. En las mismas, la columna de rango densidad de cárcavas, corresponde con la densidad de las mismas, según se las calcula con respecto a las tres clases de Dd1, las cinco clases de pendiente o las seis clases de susceptibilidad.

Los resultados obtenidos para estas réplicas, al igual que en Puriscal, reflejan el mismo patrón general de relación entre la ocurrencia de cárcavas y las variables pendiente y densidad de drenaje. De igual manera son consecuentes las correlaciones entre la ocurrencia de cárcavas y las zonificaciones alcanzadas por medio de la aplicación del modelo geomorfométrico.

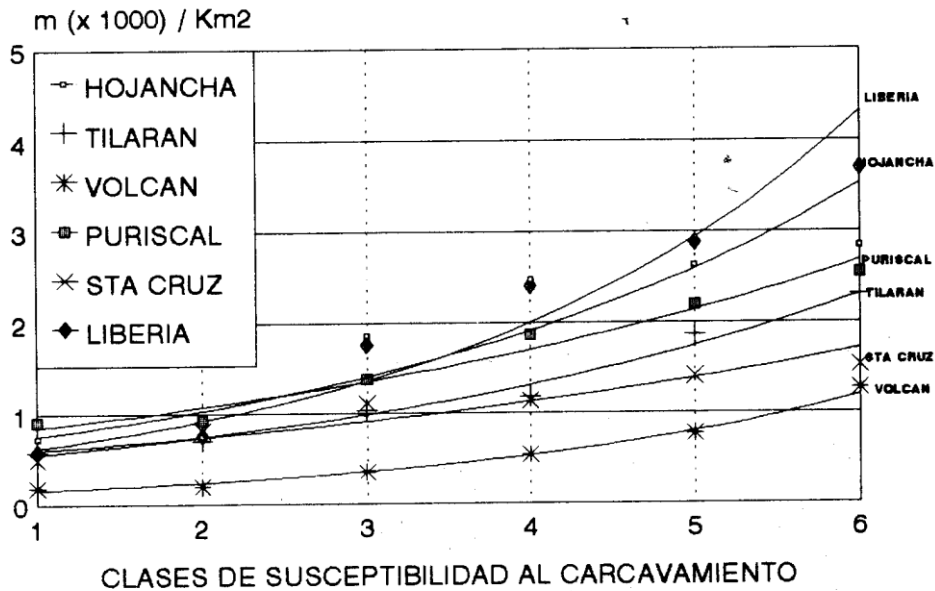


Figura N° 15: Densidad de cárcavas vs. clase de susceptibilidad, según sitios de estudio

TABLA No. 6  
DENSIDAD DE CARCAVAS ( $m/km^2$ )  
VRS. DENSIDAD DE DRENAJE (ORDEN 1)

LUGAR	r	RANGO DENSIDAD CARCAVAS $m/km^2$	AREA ESTUDIADA $km^2$
Tilarán	0.81	1.075-1.722	80
Liberia	0.95	400-2.554	49
Buenos Aires	0.98	276-590	208
Hojancha	0.78	1.312-2.713	126
Santa Cruz	0.62	586-1.310	84

Con esto se confirma que, a pesar de haberse desarrollado el modelo en un primer momento para la zona de Puriscal, con sus propias condiciones físico-geográficas, como por ejemplo, régimen de lluvias, el cual es uno de los factores que más influyen en los procesos erosivos, y aplicarse posteriormente en otras zonas con las condiciones mencionadas anteriormente relativamente diferentes, el modelo

**TABLA No. 7,  
DENSIDAD DE CARCAVAS (m/km<sup>2</sup>)  
VRS. PENDIENTES**

LUGAR	r	RANGO DENSIDAD CARCAVAS m/km <sup>2</sup>	AREA ESTUDIADA km <sup>2</sup>
Tilarán	0.89	620-2.859	80
Liberia	0.89	648-3.639	49
Buenos Aires	0.96	29-2.815	208
Hojancha	0.62	717-2.859	126
Santa Cruz	0.35	353-1.472	84

**TABLA No. 8  
DENSIDAD DE CARCAVAS (m/km<sup>2</sup>)  
VRS. ZONAS MODELO GEOMORFOMETRICO**

LUGAR	r	RANGO DENSIDAD CARCAVAS m/km <sup>2</sup>	AREA ESTUDIADA km <sup>2</sup>
Tilarán	0.91	590-2.310	80
Liberia	0.92	590-3.690	49
Buenos Aires	0.92	190-1.268	208
Hojancha	0.88	740-2.840	126
Santa Cruz	0.80	469-1.525	84

siempre alcanzó de modo satisfactorio identificar correlaciones espaciales significativas entre la zonificación geomorfométrica y la ocurrencia de cárcavas. Se demuestra con esto su condición de extrapolable.

#### **IV. CONCLUSIONES**

Lo que el modelo geomorfométrico propone como resultado de su aplicación, es una zonificación de la susceptibilidad diferencial al desarrollo de cárcavas. Permite, por lo tanto, obtener una diferenciación espacial que refleja cuáles pueden ser los lugares más propensos y los menos propensos a su desarrollo. Esto serviría como apoyo, entre otras aplicaciones, para el planeamiento de estrategias o estudios de conservación de suelos a nivel regional.

Para estudios a nivel regional, desde el punto de vista económico, los costos se verían reducidos enormemente en comparación con otras metodologías, las cuales, principalmente, requieren de mucho trabajo de campo y de laboratorio. Por los pocos parámetros de entrada que son necesarios para «correr» el modelo, a saber datos como la densidad de drenaje y las pendientes (cartografiados a partir de mapas topográficos o fotografía aérea), la reducción en los costos, tanto de personal especializado como de resultados a corto plazo, son factibles a partir de su empleo.

Por ser un modelo de tipo empírico, desarrollado con base en datos específicos de las zonas estudiadas, se tiene que los rangos de pendientes y los rangos de densidad de drenaje de primer orden, asumidos en el modelo, son consecuentes con la población de valores típicos encontrados para dichas zonas; sin embargo, se considera que dichos rangos, tanto de pendientes como de densidades de drenaje, tienen la suficiente representatividad como para abarcar en forma satisfactoria valores predominantes en zonas con laderas.

Si se agrega a esto el hecho de que los resultados encontrados fueron muy semejantes para cinco zonas geográficas o áreas de estudio con características distintas entre sí, podríamos asumir que el modelo es extrapolable.

Se debe considerar que la jerarquización en seis clases obtenidas por la calibración del modelo es un indicador relativo de la susceptibilidad diferencial a la erosión, desarrollado para tierras en ladera; su aplicación para zonas llanas no ha sido posible evaluarla en esta investigación, sin embargo cabe esperar que su nivel de eficacia sea parecido que cuando se aplica en zonas de relieve quebrado. Queda abierta la posibilidad de experimentar el modelo en lugares de relieve llano.

Los resultados obtenidos y reflejados finalmente en el modelo geomorfométrico, lo que hacen realmente es sintetizar los resultados de anteriores investigaciones en el campo de la erosión de suelos y de la geomorfología. Por un lado, se tiene que, en cuanto al factor pendiente del relieve, está de sobra demostrada su influencia en el proceso de erosión de suelos. En este caso se hizo un estudio exhaustivo de diferentes clasificaciones de pendientes propuestas por varios investigadores, escogiéndose como base la propuesta por Van Zuidam (1987) ya que fue la que mejor se ajustó en su correlación con respecto a la densidad de cárcavas por unidad de pendiente.

Por otra parte, el factor geomorfológico densidad de drenaje de primer orden, como ya se ha dicho, es un rasgo fisiográfico cuya génesis y evolución está condicionada por una serie de variables tales como litología, suelo, clima, cobertura y uso del suelo, cuya interacción e influencia (combinada) sobre la degradación de la superficie terrestre es prácticamente imposible de medir o establecer, a no ser por la diferenciación espacial que es aportada como producto de la cuantificación de la red de drenaje. Por lo tanto, al incorporar esta variable en el modelo, implícitamente se está incorporando la posible influencia aportada por la acción combinada entre otras de las variables mencionadas.

Aunque el modelo propuesto no alcanza a ofrecer resultados cuantitativos tal y como lo hacen algunos modelos físicos, su utilidad estriba en lo sencillo de su aplicación y que aporta resultados espaciales o de zonificación, a partir de los cuales se puede profundizar en estudios de mayor detalle.

Hasta el momento, los modelos físicos ofrecen resultados cuantitativos muy puntuales a nivel de sitio, debido a la gran cantidad de factores y análisis de registros temporales y espaciales que se deben recopilar para obtener resultados confiables. La extrapolación en términos espaciales, mediante estos modelos, es difícil de lograr, y esto se constituye en una limitante seria para efectos de planificación.

Es importante valorar cuál puede ser el aporte que esta metodología podría tener en estudios para determinar la capacidad de uso de la tierra. Se puede proponer como un parámetro más (susceptibilidad a la erosión) que ofrecería como resultado la zonificación geomorfométrica de una región dada, y a partir de esta zonificación, aplicar, para escalas de mayor detalle, el resto de variables que se estudian en la determinación de la capacidad de uso de la tierra. Es posible que la aplicación de esta metodología permitiría obtener una zonificación geomorfológica más objetiva que la hecha por los métodos convencionales usados normalmente, los cuales tienen mucho énfasis en la parte fisiográfica, dejando de lado las posibles influencias de elementos climáticos y litológicos, entre otros.

En cuanto a la zonificación de susceptibilidad al desarrollo de cárcavas obtenida para Puriscal, los resultados de la aplicación del modelo indican que en este lugar se identificó la presencia de todas las seis clases que propone el mismo (lo cual no necesariamente tenía que ser así). La mayor presencia de las dos clases más susceptibles (V y VI) en contraste con la ínfima presencia de las clases menos susceptibles (I y II), es un indicador de que esta región (como se puede apreciar a simple vista en el campo) es de por sí altamente propensa a generar problemas de degradación de suelos y otros asociados como baja productividad agrícola (en comparación con el área) y problemas de sedimentación en las partes bajas de las cuencas.

En el caso particular de Puriscal, lo que correspondería como paso siguiente a la zonificación es determinar con más detalle cuáles son las características propias de cada clase, por ejemplo, en función de determinar la capacidad de uso de la tierra, para así hacer propuestas de manejo y explotación racional.

La aplicación de los sistemas de información geográfica y la fotografía aérea, ha resultado un componente tecnológico de gran utilidad que facilita el manejo de enormes montos de datos, tanto estadístico-cuantitativos como en el manejo de datos espaciales (mapas digitales).

## BIBLIOGRAFIA

- ALVARADO, A.; NUÑEZ, J.** 1985. In MAG-DGF-IICA-FAO. 1985. Plan de Manejo de la Cuenca del Río Parrita. Puriscal, Costa Rica.
- BOCCO, G.** 1991. Gully erosion; Processes and Models. Revista: Progress in Physical Geography. 15 (1); 392-406. Holanda.
- BUOL, S.W.; HALE, F.D.; McCracken, R.J.** 1986. Génesis y Clasificación de Suelos. Zed. Ed. Trillas. México.
- CHINNAMANI, S.; KALIA PERUMAL, R. E.; THILLAI, S.** 1981. Quantification of Watershed Parameters Using Remote Sensing Techniques. A case Study In; Int. Symp on Rainfall Runoff Modeling, pp. 350-351. Mississippi, USA.
- DENYER, P.; ARIAS, M.O.** 1991. Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. Rev. Geológica de América Central, 12; 1-59. San José, Costa Rica.
- FAO.** 1989. Evaluación de los estados de erosión hídrica en Costa Rica. San José, Costa Rica.
- FLORES, E.; GARCIA, M.; DIMENTEL, M.R.; PEREZ, V.J.** 1992. La Densidad de Drenaje del Valle de la Paz el Carrizal, Baja California Sur y su relación con la Recarga de los Sistemas Acuíferos. Investigación Geográfica Boletín del Instituto de Geografía. N° 24, México.
- GARCIA, G.** 1991. Aplicação de Modelos Probabilísticos Na Previsão Da EROSAO de Solos. Boletín de Geografía Teórica. 21 (41); 61-80. Brasil.
- GARCIA, G.J.; ESPINDOLA, C.R.** 1976. Variação decenal do padrão de drenagem na região de Anhembi-Botucatu, Anais da 6a. Jornada Científica de FCMBB, Botucatu. SP. pp. 50-52.
- HERNANDEZ, R.G.** 1994. Metodología para el Cálculo de Pendiente. Mimeografiado. p. 8. ECG-UNA. Heredia.
- HORTON, R.E.** 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; by drophysical approach to quantitative morphology. Geol. Soc. Am. Bull; 56; 275-370.
- HUDSON, N.** 1979. Soil Conservation. 4 ed. Great Britain, Ed. Bastford.
- KIRKBY, M.J.; MORGAN, R.P.C.** 1984. Erosión de Suelos. México, Ed. Limusa.
- LOPEZ, A.** 1992. Simulación de la degradación por erosión que se observa en los conos de escoria. Investigaciones Geográficas (Méx.) N°. 24: 7-15.
- LOPEZ, F.** 1994. Degradación del suelo; ¿totalidad climática o mala gestión humana? Hacia una gestión sostenible del recurso en el contexto mediterráneo. Papeles de Geografía. (Esp.) N°. 20; 49-64.
- LORI, A.T.** 1980. Deforestation Agricultural Development, and Cattle Expansion in Costa Rica. An Integrated Approach to problems of Land-Use Transformation. Honors Thesis Human Biology Program. Latin American Studies.
- LUGO, H. JOSE.** 1989. Diccionario Geomorfológico. Universidad Nacional Autónoma de México. Editorial Libros de México, S.A. México, D.F. pp. 25 y 31.



- MAG-DGF-IICA-FAO.** 1985. Plan de Manejo de la Cuenca del Río Parrita. Puriscal, Costa Rica.
- MAG/SEPSA.** 1991. Programa de Zonificación Agropecuaria. Manual descriptivo de Mapa: Asociaciones de Subgrupos de Suelos de Costa Rica.
- NUÑEZ, S.** 1985. Fundamentos de Edafología. 2da. ed. San José, Costa Rica, EUNED.
- PALACIOS, G.; ALFARO, M.** 1991. Geografía de los factores que influyen en la erosión hídrica en la microcuenca de la Quebrada Pital (Puriscal) y sugerencias para la adaptación del Modelo Aplicado (E.U.P.S.) Tesis. Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- ROO, A.P.** 1993. Modeling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. University Utrecht, Netherland.
- SANDNER, G.** 1960. Turrubares: Estudio de Geografía Regional. Instituto Geográfico de Costa Rica.
- SCHUMM, S.A.; HARVEY, M.D. Y WATSON, C.C.** 1984. Incised Channels; Morphology, dynamics and control. Water Resources Research, Colorado. Citado por; Arnáez V., José. 1989. Incisiones (cárcavas) en el nivel supraforestal de la Sierra de la Demanda. Morfología y Dignificación. Cuadernos Investigación Geográfica, Colegio Universitario de La Rioja (España). XV (1 y 2); 7-17.
- STRAHLER, A.** 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. Am. Geophysical Union, Washington, 38; 913-920.
- VARHSON, W.G.** 1991. Aspectos Climáticos de la Erosión Hídrica en Costa Rica. In; Memoria del Taller de Erosión de Suelos. ECG-UNA. Heredia, Costa Rica. Pp. 33-47.
- ZINKE, P.T.** 1960. Photogrammetry of Soil. In American Society of Photogrammetry Manual of Photographic Interpretation. Washington. Pp. 539-560.
- ZUIDAM, R.A.; VAN, ZUIDAM; F.I. VAN.** 1979. Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs. Text. Books of Photo-interpretation, Vol. VII. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences. Holland.