

A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas

ANTONIO CRISTOFOLETTI *

A densidade da rede de canais desde há longo tempo é reconhecida como variável das mais importantes na análise morfométrica das bacias de drenagem, representando o grau de dissecação topográfica em paisagens elaboradas pela atuação fluvial (Strahler, 1964) ou expressando a quantidade disponível de canais de escoamento. Em 1873, Belgrand procurou demonstrar a diferenciação na densidade fluvial da bacia hidrográfica do rio Sena (conforme citação de Wilgat, 1968). Entretanto, Neuman (1900) foi o primeiro a isolar esse parâmetro e estudá-lo em detalhe, assinalando que as diferenças na densidade dos sistemas fluviais dependem de fatores como o tipo de substratum, a declividade das vertentes, a cobertura vegetal e a precipitação, sendo este último considerado o fator mais importante. A definição proposta mostrava a "densidade de uma rede de canais como a relação da soma do comprimento de todos os rios em determinada área com a superfície da respectiva área". Em virtude da sua clareza, essa noção ganhou aceitação generalizada. Entretanto, Horton (1932; 1945) realizou uma sutil modificação, considerando os comprimentos dos canais dentro de determinada bacia hidrográfica, e não mais de uma área qualquer, procedimento que passou a ser adotado e empregado pelos pesquisadores interessados na análise morfométrica. Desta maneira, o valor da Dd pode ser calculado pela seguinte equação

$$Dd = \frac{L_b}{A}$$

na qual L_b = comprimento total dos rios ou canais existentes na bacia, e A = área da bacia considerada.

Na natureza dinâmica da bacia hidrográfica, a densidade de drenagem possui funções distintas: a) é resposta aos controles

Departamento de Geografia e Planejamento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro.

exercidos pelo clima, vegetação, litologia e outros característicos da área drenada; b) é fator influenciando o escoamento e o transporte sedimentar na bacia de drenagem. Desde que atinja o equilíbrio com as condições ambientais, a rede de canais torna-se variável independente do tempo, mas pode sofrer alterações rápidas em virtude das modificações ocasionadas no fornecimento de matéria e energia ao sistema. Nessa perspectiva, pode tornar-se variável sensível às mudanças climáticas ou antrópicas em curtos períodos de tempo.

A simplicidade favoreceu ampla aplicação do índice da densidade de drenagem, que se mostrou útil sob variados aspectos:

— como a D_d reflete dependência das condições climáticas e de outros controles existentes na bacia, pode servir de base para a classificação de bacias de drenagem e caracterização de regiões físicas (Eyles, 1971; Gregory e Gardiner, 1975; Woodruff, 1964; Woodyer e Brookfield, 1966);

— Como a D_d exerce controle sobre os processos, possibilita que seja aplicada para a predição espacial dos processos morfogenéticos atuantes na bacia de drenagem, considerando a sua distribuição e áreas de ocorrência (Gregory e Walling, 1968; 1973; Stall e Bartelli, 1959);

— em virtude de representar a quantidade de canais disponíveis para o escoamento, procurou-se demonstrar a relação entre a densidade de drenagem e o escoamento dos aquíferos responsáveis pelo abastecimento do fluxo de base (Carlston, 1963; Trainer, 1969; Dynowska, 1976), e a sua importância como fator determinando o tempo de travessia da água pela rede de drenagem (Langbein, 1947);

— a compreensão das variações espaciais e temporais da densidade de drenagem poderá facilitar a interpretação de paleoredes de drenagem (Gregory, 1971).

A densidade de drenagem é variável potencialmente significativa e útil, e torna-se estranho verificar que o seu uso ainda é muito restrito. Para explicar esse estado, podemos enumerar algumas justificativas:

— problemas de definição da rede: — embora os cursos de água desde há muito sejam classificados em perenes, intermitentes e efêmeros, só recentemente passaram a ser incluídos, de modo extensivo, nas análises das redes hidrográficas. Caso a medição se restrinja somente aos cursos perenes, o resultado, além de falso, é maior nas áreas relacionadas com pluviometria elevada e bem distribuída no decorrer do ano. Se omitir os canais fluviais intermitentes e efêmeros, notar-se-á que nas regiões secas não haveria possibilidades de medições. Na realidade, apesar de formado por canais fluviais intermitentes e efêmeros, as regiões de climas secos possuem rede de drenagem hierarqui-

zada. De modo semelhante, resta distinguir, de modo preciso, entre o escoamento fluvial e o de vertente;

— características da documentação: — as diferentes escalas dos mapas e as técnicas de representação ocasionam diversidade na derivação da rede de drenagem, refletindo nas mensurações sobre os valores da densidade. Devido aos tipos de documentação, ao grau de sensibilidade na representação, ocorrem diferenças importantes em redes restituídas de mapas, de fotos aéreas ou de levantamento de campo. Por outro lado, como a rede de canais recebe a contribuição de fluxos superficiais e subterrâneos, que são variados de uma área para outra, é inevitável que alguns sintomas da rede de drenagem não sejam registrados pelos mapas topográficos nem pelas fotos aéreas. O conhecimento dessas limitações operacionais possibilita a escolha da documentação mais apta à análise morfométrica, considerando os seus objetivos diversos;

— estabelecer a rede e mensurar acuradamente os comprimentos dos canais e as áreas são tarefas que consomem muito tempo, e podem se tornar enfadonhas e desestimulantes;

— embora a bacia de drenagem seja considerada como unidade geomorfológica fundamental (Chorley, 1969), resta indefinida a escolha do tamanho (ou da ordem) da bacia a ser selecionada como a unidade melhor representativa para o estudo e mapeamento da densidade de drenagem. Embora o critério estabelecido por Strahler seja muito utilizado, deve-se lembrar a inexistência de um critério de ordenação plenamente satisfatório (Gardiner, 1971 : 168);

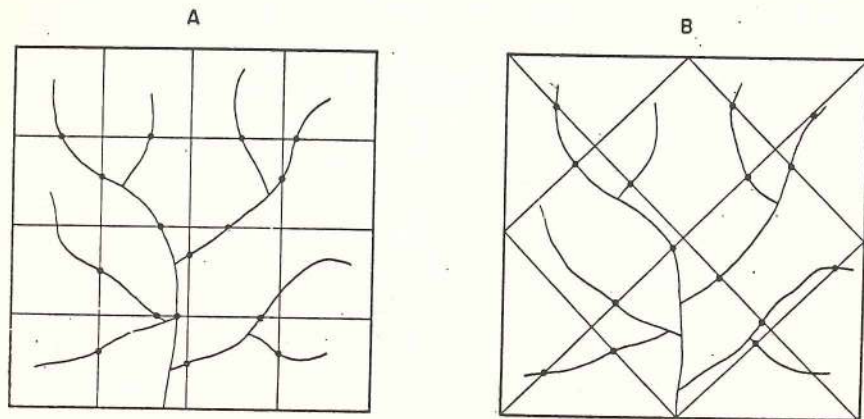
— para se compreender devidamente as variações espaciais e interpretar as mudanças temporais, torna-se necessário desenvolver conhecimento melhor da magnitude das oscilações climáticas (Gregory, 1976 : 290) e as consequências das sucessivas mudanças na elaboração da rede de canais.

A fim de superar essas dificuldades, procura-se estabelecer consenso comum na definição da rede e no conhecimento das bases interpretativas. Por outro lado, há proposições de procedimentos mais rápidos para a aquisição de dados e determinação da densidade da drenagem, propiciando condições para o mapeamento de grandes áreas. Melton (1975) verificou que o número de confluências em determinada rede está altamente correlacionada com a D_d da referida rede. Ao analisar a densidade de ruas e avenidas em áreas metropolitanas, Borchert (1961) utilizou a quantidade de intersecções observadas em determinada unidade de área, e Bassett e Nordcliffe (1969) usaram processo semelhante no estudo das redes de transporte.

Carlston e Langbein (1960) mostraram a utilidade do uso de quadrados e linhas amostrais para estimar a densidade de drenagem. O procedimento reside em traçar linhas de comprimento

pré-determinado, aleatoriamente orientadas, em contornos de áreas previamente delimitadas (células quadráticas, por exemplo), e contar o número de canais intersectados por essas linhas. Para fornecer amostra adequada, os autores advogam um mínimo de cinquenta cruzamentos. A expressão seno 45°. L/n oferece o índice da *distância média entre os canais*, e a recíproca fornece o valor aproximado da densidade de drenagem, na qual $Dd = 1,41 n/L$. (Nessas equações, L = comprimento das linhas, e n = número de canais intersectados.

O procedimento proposto por Carlston e Langbein (1960) foi modificado por McCoy (1971) e Mark (1974). McCoy coletou os pontos intersectados superimpondo *overlays*, de padrão aleatório



de linhas, e contando o número total de intersecções e o comprimento das linhas englobadas nos limites da bacia hidrográfica. As linhas devem ser em quantidade suficiente para propiciar grande número de intersecções. Mark (1974), entretanto, usou rede de linhas transversais (figura 1. a), e Christofolletti e Felizola (1978), testaram as técnicas de estimativa da densidade de drenagem, considerando o uso de linhas diagonais em células quadráticas (figura 1. b) para a contagem dos pontos de intersecção. Os dados obtidos permitiram aos diversos autores que a densidade de drenagem fosse calculada usando o quociente do número de intersecções (N) pelo comprimento das linhas (L), possibilitando a proposição de diversas relações empíricas para a ajustagem no cálculo da densidade de drenagem (Dd) de modo que

$$Dd = 1,414 \frac{N}{L} \quad (\text{Carlston e Langbein, 1960})$$

$$Dd = 1,8 + (1,27) \frac{N}{L} \quad (\text{McCoy, 1971})$$

$$Dd = 1,571 \frac{N}{L} \quad (\text{Mark, 1974})$$

$$Dd = 1,83 \frac{N}{L} \quad (\text{Christofolletti e Felizola, 1978})$$

Tomando como exemplo a área de Dartmoor, no setor Norte Ocidental de Devon, Gardiner (1971) mostrou que a utilização dos valores da Dd , com base em bacias de primeira, segunda e terceira ordens, não é útil nem viável para o mapeamento dessa variável em grandes áreas. Como procedimento mais prático e alternativo, o referido autor propôs utilizar a técnica da rede de células quadráticas, cujas vantagens são as seguintes: a) não requer seleção de bacias de determinada ordem; b) não necessita medição de áreas, desde que o tamanho do quadrado seja pré-determinado; c) permite recobrimento completo de toda a área; d) o tamanho do quadrado da rede pode ser variado a fim de controlar a generalização do mapa final; e) a informação obtida é eminentemente viável para o processamento automatizado dos dados, e f) a única medição necessária é a dos comprimentos dos canais em cada célula quadrática (Gardiner, 1971 : 168). Em sua pesquisa, a fim de calcular indiretamente o valor da densidade da drenagem, Gardiner registrou as seguintes informações para cada célula: número de confluências, número de nascentes, número de intersecções dos canais com as linhas laterais do quadrado, número de intersecções dos canais com as linhas diagonais do quadrado e número total de segmentos dos cursos de água. Dentre tais parâmetros, Gardiner (1971) observou que o melhor elemento predictor para a Dd é o número de confluências. Entretanto, a acuidade da predição pode ser aumentada pela inclusão dos demais parâmetros. Considerando que a regressão linear simples ofereceu modelo significativo para estimar a densidade de drenagem, Gardiner (1971; 1977) estabeleceu que a equação utilizada no caso da região Sudoeste da Inglaterra foi igual a:

$$Dd = 2,1 + 0,245 \times$$

na qual Dd = densidade de drenagem estimada;
 \times = número de junções em cada célula quadrática.

Donahue (1974) usou o processo de empregar células quadráticas padronizadas com quantidade de pontos previamente determinado, sabendo-se também o raio e a área ocupada em cada ponto. Em determinada célula verifica-se a quantidade de pontos interceptados pelas linhas da drenagem (n) e a sua proporção com a quantidade global (N), assinalando a porcentagem da intensidade da drenagem. De modo semelhante, pode-se verificar a relação entre a área ocupada pelos pontos e a área da célula. Aplicando esse procedimento, Donahue (1972) distinguiu três regiões de intensidade da drenagem no Planalto de Aleganis, na área ocidental do Estado de Nova Iorque, explicando-nas como consequência das diferenças na atuação da glaciação e das características do manto superficial.

O uso de mecanismos eletrônicos para o esquadramento de fotografias aéreas, infra-vermelhas e imagens de radar, a fim de obter dados para a análise morfométrica da drenagem, constitui tentativa que pouco a pouco se amplia (McCoy, 1971). Tais mecanismos podem detectar as variações na densidade do filme, medir os ligamentos e contar as confluências, e realizar diversas outras operações.

Em trabalho publicado em 1958, Melton analisou detalhadamente as relações entre a densidade de drenagem e a densidade de segmentos. A densidade de segmentos refere-se à quantidade relativa de segmentos existente em determinada bacia hidrográfica por unidade de área. Para obter esse índice deve-se aplicar o sistema de ordenação de Strahler (1952) e somar a quantidade de segmentos de todas as ordens da bacia. Analisando 156 bacias de drenagem, representando vasta amplitude em escalas, clima, topografia, cobertura superficial e tipos geológicos, Melton (1958 : 36) observou que existe apenas pequena dispersão dos valores, mostrando que a densidade de segmentos tende a se manter como constante na natureza. Com base nos dados coletados nessas bacias hidrográficas e em virtude da alta correlação encontrada, o referido pesquisador derivou a seguinte fórmula, relacionando a densidade de segmentos (F_s) com a densidade de drenagem (Dd),

$$F = 0,694 Dd^2$$

A partir desta fórmula pode-se observar que

$$Dd = \sqrt{\frac{F_s}{0,694}}$$

Ao estudar exemplos da Romênia, Zavoianu (1972) salientou a importância desse relacionamento para o cálculo rápido da densidade de drenagem, que se pode fazer possuindo apenas a hierarquização da bacia hidrográfica. Todavia, com base em seus dados, expressou a relação através dos seguintes valores

$$Dd = 0,690 F_s^{0,702}$$

Esse procedimento para o cálculo da densidade de drenagem só pode ser aplicado para bacias hidrográficas consideradas como unidades funcionais, e não células areais (quadráticas, circulares e outras) tomadas como padrão. A tabela 1 demonstra a variabilidade dos valores da densidade de drenagem, para doze bacias hidrográficas brasileiras, comparando os valores mensurados e os estimados conforme a aplicação da fórmula de Melton (1958) e de Zavoianu (1972). Entre as duas proposições, a de Melton surge como a mais adequada.

Poucas tentativas foram realizadas para caracterizar e esclarecer a variação da densidade da drenagem na escala mundial, no tocante ao zoneamento climático. Os dados disponíveis são predominantes para as áreas de latitudes médias, havendo poucos para as regiões tropicais e ausência de informações para as latitudes altas. As contribuições de Peltier (1962), Gregory (1976) e Gregory e Gardiner (1975) apresentam panorama global da questão, salientando que os climas com acentuadas variações sazonais estão relacionados com as densidades de drenagem mais elevadas. Os valores mais baixos são encontrados em áreas desérticas, os valores máximos se relacionam com as semi-áridas e diminuem em valor nas áreas temperadas. As mensurações realizadas por Peltier (1962) mostram que os valores da Dd em áreas tropicais podem ser mais altos que os das latitudes temperadas. Entretanto, se há diferenças substanciais na densidade da rede de drenagem conforme a distribuição dos climas na face da Terra, também há variações significativas no interior da mesma zona climática. As observações vem demonstrando que os valores mais elevados são encontrados em áreas com climas de acentuada variação sazonal, e a densidade de drenagem surge como elemento indicador da magnitude dessa variabilidade, pois aparece como estando relacionada com o índice da intensidade de precipitação.

A litologia tem importância para a hidrografia por controlar a permeabilidade. A esse propósito, Carlston (1963 : 5) observou que a transmissibilidade (medida da permeabilidade do terreno) aumenta quando a densidade de drenagem diminui, e a transmissibilidade diminui quando a densidade de drenagem aumenta", e o referido autor chega a concluir, no final do seu trabalho, que "a densidade de drenagem, o escoamento pluvial

TABELA 1 — DADOS DEMONSTRATIVOS DA VARIABILIDADE DOS VALORES DA DENSIDADE DE DRENAGEM, ENTRE OS MENSURADOS (COLUNA A) E OS ESTIMADOS CONFORME A FÓRMULA DE MELTON (COLUNA B) E A DE ZAVOIANU (COLUNA C), E DA COMPARAÇÃO ENTRE O LOGARÍTIMO DO COMPRIMENTO TOTAL DOS CANAIS E O LOGARÍTIMO DA ÁREA.

Bacia	Ordem	Área (km ²)	N.º de segmentos	F	Densidade de drenagem			Comprimen- to total (km)	log compri- mento log da área
					A	B	C		
1. Rio das Antas	6. ^a	423,0	690	1,63	1,614	1,533	682,6	1,080	
2. Rio Verdinho	5. ^a	54,3	170	3,13	2,644	2,123	143,6	1,242	
3. Córrego do Quartel	5. ^a	66,7	195	2,92	2,071	2,051	138,2	1,175	
4. Cór. Pouso Alegre	5. ^a	103,7	212	2,36	1,593	1,844	165,3	1,104	
5. Rio Verde	6. ^a	213,5	558	2,61	2,104	1,939	449,3	1,137	
6. Cór. Vargens	4. ^a	27,4	64	2,04	1,790	1,714	62,8	1,251	
7. Cór. Grande	4. ^a	68,9	85	1,23	1,425	1,331	98,0	1,087	
8. Rib. das Cruzes	5. ^a	252,0	310	1,23	1,676	1,331	334,6	1,050	
9. Rib. Arrancado	5. ^a	198,0	246	1,24	1,356	1,336	342,0	1,104	
10. Rib. Ponte Pensa	5. ^a	603,8	586	0,97	1,326	1,182	801,0	1,043	
11. Rib. Câ Cá	5. ^a	230,0	220	0,96	1,220	1,176	281,9	1,038	
12. Rib. Padula Diniz	5. ^a	321,6	331	1,03	1,397	1,218	427,7	1,052	

superficial e o movimento da água subterrânea são partes de um único sistema hidrológico controlado pela transmissibilidade do *bedrock* e de seu regolito". Nas rochas (e regolitos) onde a infiltração é mais dificultada há maior escoamento superficial, gerando possibilidades para a esculturação de canais permanentes e consecutiva densidade de drenagem mais elevada. Ray (1963 : 16), comentando as generalizações que podem ser feitas com relação ao caráter litológico das rochas sedimentares, afirmou que os clásticos de granulação fina geralmente apresentam drenagem de textura fina, quando há espaçamento pequeno entre os cursos de água, enquanto as rochas sedimentares de granulometria grossa, como os arenitos, tendem a apresentar drenagem com textura grosseira ou baixa, com espaçamento largo entre os cursos de água. Horton (1932) considerou que os valores da *Dd* oscilam de 0,93 a 1,24 km/km², em áreas impermeáveis de regiões de precipitação elevada, e são menores em áreas permeáveis, como elevada taxa de infiltração.

Ao analisar os valores observados nas bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas, Christofolletti (1970; 1973) expôs as seguintes considerações: "a influência da litologia é sensível quando se comparam os valores da *Dd* das bacias do córrego Grande (1,425) e do córrego da Cachoeira (1,478). Seus valores são semelhantes, em áreas de relevo totalmente diferentes. A mesma influência pode ser discernida em relação aos córregos das Vargens (1,79) e do Tamanduá (1,719), cujas bacias são possuidoras de relevo fracamente movimentado. Esquematizando a sequência qualitativa para a densidade de drenagem, das litologias mais aptas às menos propícias, verifica-se a seguinte: rochas vulcânicas (córrego Quartel, 2,3 km/km²), fenitos (rio Verdinho, 2,644), foaitos (córrego das Vargens, 1,79), lavas fonolíticas (córrego Tamanduá, 1,719), tinguaitos (córrego da Cachoeira, 1,478), córrego Pouso Alegre, 1,593) e gnaisses (córrego Grande, 1,425). A diferença observada entre os córregos Cachoeira e Pouso Alegre é explicada pela movimentação topográfica, mais acentuada no caso do Pouso Alegre".

A influência da permeabilidade pode ser usada para explicar muitos casos na variação espacial da *Dd*, quando as condições climáticas são semelhantes. O fator climático, todavia, afeta de maneira significativa, direta ou indiretamente, através da disponibilidade da precipitação, do solo, da topografia ou da cobertura vegetal. Cotton (1962; 1964) observou que o regime e a intensidade das precipitações tornam-se as responsáveis primeiras pela dissecação topográfica em qualquer área. Em vista das críticas recebidas, Carlston (1966) modificou a sua hipótese anterior tendo em vista considerar os efeitos provocados pela precipitação. Quando se comparam áreas de litologia semelhante, mas sob climas diferentes, é o fator climático que responde pelas

diferenças de densidade da drenagem, a exemplo da conclusão obtida por Chorley e Morgan (1962), ao confrontar as áreas graníticas de Unaka Mountains (Tennessee e Carolina do Norte, U.S.A.), cuja densidade de drenagem é de 7,0 km/km²) e Dartmoor (Inglaterra, com densidade de drenagem média igual a 2,10 km/km²)

Ao abordar o significado da densidade de drenagem, Horton (1945) explicou as variações regionais em função da sua teoria da infiltração e escoamento. Posteriormente, diversos pesquisadores tentaram esclarecer os fatores controlantes desse fenômeno geohidrológico. Melton (1957: 33-35) usou análises de regressão e correlação múltiplas, nas quais a *Dd* é a variável dependente em relação ao índice de precipitação efetiva, capacidade de infiltração, cobertura vegetal, rugosidade superficial e índice da intensidade do escoamento. Dentre elas, a rugosidade superficial foi a única que não apresentou correlação significativa, e o fator mais forte parece ser o índice de precipitação efetiva, de Thornthwaite, com coeficiente de correlação negativa de 0,943. Todavia, ao verificar as relações entre a densidade de drenagem e a precipitação efetiva, em 24 bacias das colinas centrais de Sri Lanka (Ceilão), em áreas recobertas por plantações de chá, Bandara (1974) encontrou significativa correlação positiva ($r = 0,776$). A combinação dos resultados obtidos por Melton e Bandara (figura 2) mostra que quando o índice de precipitação efetiva atinge os valores de 80-90, e passa a excedê-los, passa a predominar a tendência da correlação positiva. Talvez esse valor possa representar um nível crítico, e novas investigações são necessárias para a compreensão mais precisa dos mecanismos dos sistemas denudacionais nas regiões tropicais úmidas.

O conjunto dos canais de escoamento pode ser considerado como resposta ao estímulo fornecido pelas condições ambientais. Nesta perspectiva, por exemplo, a *Dd* representa medida da ajustagem da rede para transportar os excessos da precipitação. Se a rede está devidamente ajustada, em estado de equilíbrio, então é possível estabelecer correlação entre os valores da *Dd* e as condições ambientais controladoras. E essa preocupação, de grande poder preditivo e explicativo, continua em aberto devido a complexidade envolvida no equacionamento do problema e na distinção entre os graus de intensidade do controle exercido pelas variáveis. Várias pesquisas vem demonstrando que a *Dd* é altamente correlacionada com a amplitude altimétrica e relação altimétrica (Schumm, 1956; Hadley e Schumm, 1961); com o índice de precipitação efetiva de Thornthwaite e intensidade do escoamento (Melton, 1957; Bandara, 1974); com a intensidade de precipitação (Chorley, 1957; Williams e Fowler, 1969), com a capacidade de infiltração (Hadley e Schumm, 1961), com o fluxo de base dos rios (Carlston, 1963; Trainer,

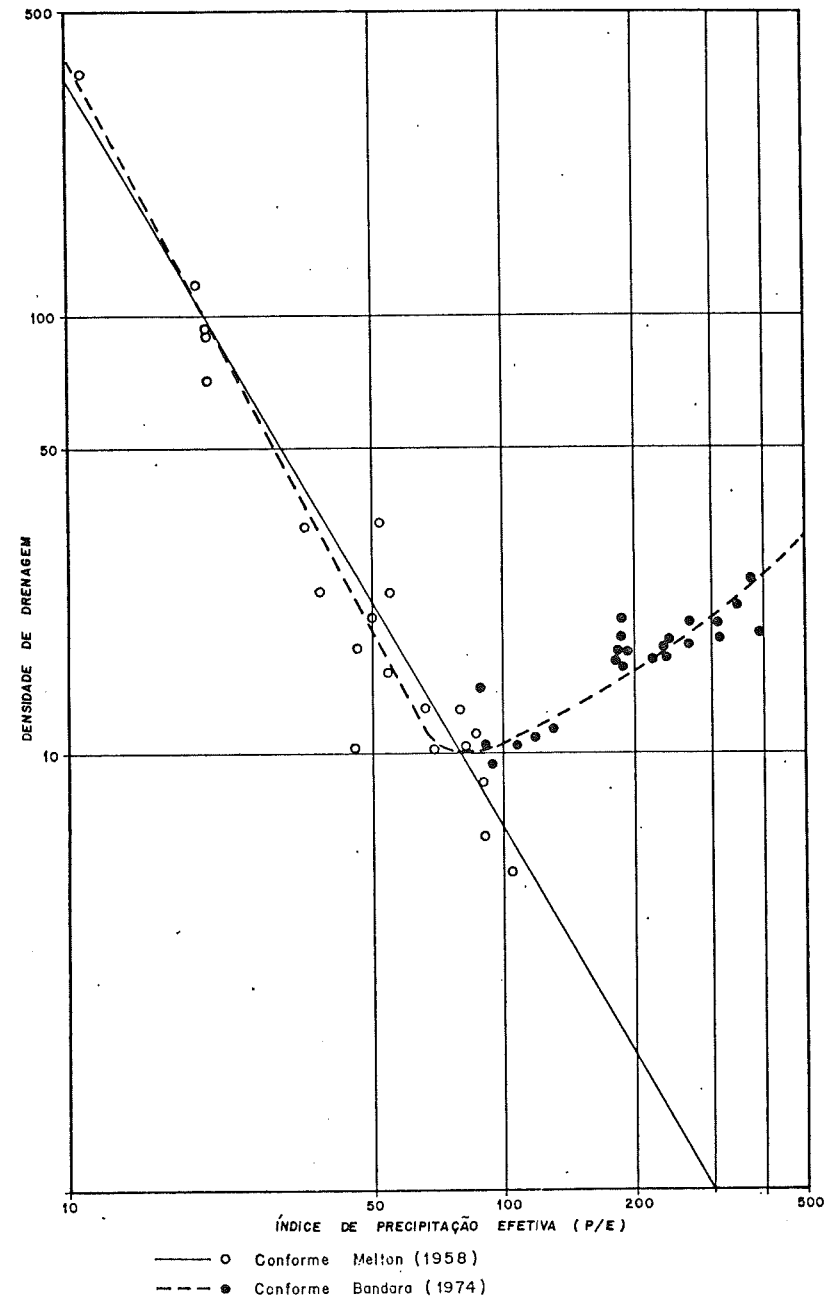


Figura 2 — Relações entre os valores da densidade de drenagem e os da precipitação efetiva (P/E), de Thornthwaite, conforme dados fornecidos por Melton (1958) e Bandara (1974).

1969; Dynowska, 1976) e com a cheia anual média (Carlston, 1963; Hadley e Schumm, 1961). A interação entre essas variáveis é muito grande, o que dificulta solução simplista do problema. Outra questão paralela reside em estabelecer a magnitude e a frequência dos eventos capazes de esculpir canais de escoamento, elaborando a rede de drenagem ou modificando a existente.

Ao tratar das comparações entre os valores da densidade de drenagem, obtidos nas diversas áreas, deparamos com exemplos colhidos em bacias dos mais diversos tamanhos, desde as parcelas experimentais, de 20 m² (Melton, 1957), até bacias de centenas de quilômetros quadrados. Reconhece-se que a densidade de drenagem é dependente do tamanho da área da bacia, e que os valores da *Dd* tendem a ser maiores nas bacias de tamanho menor (Gregory e Walling, 1973). Pethick (1975) procurou demonstrar que essa dependência não era causal. Todavia, verifica-se a tendência para que as densidades de drenagens de bacias de ordens menores (primeira e segunda) sejam maiores que as densidades para as bacias de ordens mais elevadas. Algumas explicações podem ser lembradas para essa tendência, tais como:

a) à medida que aumenta a ordem da bacia, há aumento gradativo das áreas vazias drenando diretamente para os ligamentos interiores (Gardiner, Gregory e Walling, 1978);

b) aceita-se que os comprimentos dos ligamentos interiores e exteriores, com suas bacias associadas, em bacias com clima e litologia homogêneas, podem ter distribuições estatísticas correspondentes a populações independentes (Shreve, 1974). Smart e Werner (1976) mostraram que a relação entre comprimento médio do ligamento exterior/comprimento médio do ligamento interior, em 30 casos analisados, era igual a 1,43, enquanto o valor médio da relação entre a área média dos ligamentos exteriores/área média dos ligamentos interiores era de 1,34. Desta maneira, a relação entre a densidade de drenagem dos ligamentos exteriores e a dos ligamentos interiores era igual a 1,43/1,34 = 1,07;

c) considerando a lei das declividades, os segmentos de ordens inferiores estão nas partes relativamente mais altas dos cursos de água, onde as declividades são mais acentuadas. Aumentando o tamanho da bacia e a ordem da rede hidrográfica, incorporam-se áreas onde pode haver topografias relativamente mais suaves. O fator topográfico também pode interferir para que a densidade de drenagem seja mais elevado nas bacias de ordem menor.

Procurando suplantar essa dificuldade, Gregory (1976 : 294) delineou procedimento para se comparar os valores da densidade de drenagem entre as diversas bacias, independentemente da escala da área e, de modo ideal, procurando separar o cará-

ter geral da *Dd* das interferências resultantes das características locais das bacias. O procedimento consiste em relacionar o comprimento total de todos os canais existentes na bacia com a área da referida bacia, considerando os logaritmos desses dois valores. Desta maneira, temos o seguinte,

$$= \frac{\text{logaritmo do comprimento total de todos os canais}}{\text{logaritmo da área da bacia}}$$

A relação entre o logaritmo do comprimento total ($\log L_t$) e o logaritmo da área ($\log A$) deve ser uma constante, próxima da unidade, a menos que a densidade de drenagem varie com a escala da área (A). Os desvios observados nesta relação ($\log L \approx \log A$), em determinada área, poderão refletir a natureza e as características das bacias individualizadas. A Tabela 1 insere valores para algumas bacias brasileiras.

Strahler (1952 : 1136) observou que “à medida que aumenta o valor numérico da densidade de drenagem há diminuição quase proporcional do tamanho dos componentes fluviais das bacias de drenagem”. Como a rede de canais é sistema composto por elementos, podemos considerar que as unidades relacionadas com as diversas ordens hierárquicas sejam os componentes fluviais. Desta maneira, conforme a observação de Strahler, deve-se notar a existência de relação inversa entre os valores da densidade de drenagem e os comprimentos médios dos segmentos das diversas ordens. Com a finalidade de analisar a correlação entre essas duas variáveis, Christofolletti e Cesar (1978) coletaram dados pertinentes a 33 bacias hidrográficas de quarta ordem. (Tabela 2). O cálculo dos coeficientes de correlação entre *Dd* e os comprimentos das diversas ordens revelou os seguintes —0,74; —0,58; —0,54 e —0,33, respectivamente para com a 1.^a, 2.^a, 3.^a e 4.^a ordens. Esses valores comprovam a existência de relacionamento inverso entre a *Dd* e o tamanho dos componentes das bacias de drenagem. A diminuição do valor da correlação com o aumento da ordem pode indicar que as ordens menores possuem maior acuidade para expressar o comportamento hidrogeológico. Já se tornou fato conhecido que a soma dos comprimentos dos canais de primeira ordem representa a parcela maior do comprimento total somado de todos os rios da bacia. No caso das 33 bacias estudadas, a relação porcentual variou entre 66,95 e 44,20, com média de 61,61 e desvio padrão de 16,37. Por outro lado, os referidos autores ponderaram que “em virtude dos processos de desenvolvimento das bacias de drenagem, a área praticamente se torna estabilizada em sua grandeza. Toda e qualquer modificação que se processa na ordenação hierárquica faz-se pelo surgimento de segmentos de primeira ordem. As or-

TABELA 2 — VALORES DA DENSIDADE DA DRENAGEM E DO COMPRIMENTO MÉDIO PARA AS DIVERSAS ORDENS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS LOCALIZADAS NA REGIÃO CENTRO-MERIDIONAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, NO PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS E NA REGIÃO NORTE OCIDENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. (Cf. Christofletti e César, 1978).

Bacias	Dens. da drenagem	Comprimentos médios (em Km)			
	(Km/Km)	1. ^a ord.	2. ^a ord.	3. ^a ord.	4. ^a ord.
A) <i>Bacias da região Centro Meridional do Estado de São Paulo</i>					
Rib. Barra Grande	2,167	0,66	0,75	1,51	4,65
Rib. Cincinatina	1,970	0,75	1,11	2,63	7,00
Rib. do Alegre	1,923	0,79	1,01	2,13	3,10
Rib. Santo Inácio	1,911	0,60	0,71	2,02	1,67
Rib. do Barreiro	1,336	0,90	1,41	3,61	1,75
Rib. Bonito	1,237	0,96	1,96	3,10	8,00
Rib. Anhumas	1,220	0,74	1,00	1,83	2,83
Rib. da Água Parada	1,194	1,05	1,36	2,86	4,41
Rib. da Figueira	1,194	0,77	3,32	3,00	10,00
Rib. Batalhinha	1,139	0,82	1,07	3,31	12,00
Rib. das Antas	1,096	0,83	1,26	2,29	5,30
Rio Bauru	0,997	1,22	1,66	3,06	21,67
Rib. do Lageado	0,936	0,94	2,20	9,83	13,00
Rio Palmital	0,910	0,83	1,45	2,37	31,00
Rio Turvinho	0,862	1,44	1,90	8,33	13,00
Rib. Santa Clara	0,821	0,87	1,37	3,74	17,50
Rio Lençóis	0,818	1,18	2,22	3,69	16,19
B) <i>Bacias do Planalto de Poços de Caldas</i>					
Rio Verdinho	2,644	0,61	1,08	1,55	1,90
Córrego Quartel	2,300	0,43	0,82	1,20	11,80
Rio Verde	2,104	0,57	0,97	1,42	5,19
Córrego Vargens	1,790	0,63	1,88	3,80	4,20
Córrego Tamanduá	1,720	0,68	1,21	4,20	5,80
Rio Antas	1,614	0,65	1,09	2,79	6,42
Córrego Pouso Alegre	1,593	0,56	0,90	1,49	4,98
Córrego Cachoeira	1,478	0,69	1,25	4,00	0,90
Córrego Grande	1,425	0,75	1,57	3,64	12,81
C) <i>Bacias da região Norte Ocidental do Estado de São Paulo</i>					
Ribeirão das Cruzes	1,676	0,86	1,26	1,91	2,62
Ribeirão Padula Diniz	1,397	0,94	1,75	3,63	14,48
Córrego Arrancado	1,356	0,98	1,84	3,41	3,87
Ribeirão Ponte Pensa	1,326	1,05	1,23	5,03	7,52
Ribeirão Cã Cã	1,220	0,88	1,97	2,44	11,35

dens superiores são meras consequências do critério de ordenação e não possuem significância maior para exprimir o comportamento hidrogeológico. Não há critério para se perceber a intensidade de como as confluências organizam os seus arranjos, nem há relacionamento efetivo entre a magnitude da bacia e a ordem a ser atingida pela rede de drenagem." (Christofletti e Cesar, 1978 : 604). Essas considerações permitem melhor compreender porque há decréscimo no grau de significância dos valores da correlação, para as ordens superiores, entre a *Dd* e o comprimento médio dos segmentos.

Alguns pesquisadores procuraram definir limites para distinguir as diversas classes de valores da densidade de drenagem. Smith (1950) e Strahler (1957) estabeleceram as seguintes delimitações (em km/km²):

inferior a 3,2 = grosseira
entre 3,2 e 9,0 = média
entre 9,0 e 100 = ultrafina
superior a 100 = fina

Posteriormente, Strahler (1960 : 379) estabeleceu apenas três classes, com os seguintes valores da *Dd* (em km/km²):

menor que 7,5 = baixa densidade de drenagem
entre 7,5 e 10,0 = média densidade de drenagem
superior a 10,0 = alta densidade de drenagem

Ao confrontarmos os dados inseridos na tabela 2, com os limites das classificações propostas, verifica-se a existência de possível diferença nos procedimentos e conceitos. Os principais trabalhos americanos que estabeleceram a análise morfométrica de bacias hidrográficas são da lavra de Horton e Strahler, enquanto o de Schumm (1956) representa um dos primeiros trabalhos de grande fôlego a propósito. Entretanto, esses autores, tanto Strahler quanto Schumm, estudaram áreas minúsculas e elaboraram uma metodologia que é válida para o estudo das bacias hidrográficas reais, mas os resultados obtidos pelos referidos autores não oferecem a mesma segurança quando extrapolados para bacias com grandes áreas. Por exemplo, Schumm (1956) pesquisou em uma área de 31.027 pés quadrados (2.900 m²), encontrando 3.531 pés (1.177 metros) como comprimento de todos os canais, o que resulta em 0,403 m/m². Na escala do quilômetro, a densidade de drenagem atinge a cifra de 403 km/km². Nos casos inseridos na tabela 2, os dados obtidos levaram em consideração os canais perenes e os canais incisivos caracterizados e denunciados pelas isoípsas. No Planalto de Poços de Caldas, o clima é tropical úmido (Cwb) e a área é recoberta exten-

sivamente por formações campestres. O regolito é profundo. As condições ambientais favorecem o escoamento difuso, e as vertentes são convexas em sua maior parte, tanto nas áreas amorreadas como nas colinosas. Condições semelhantes são observadas nas demais áreas. A enorme disparidade entre os dados está no critério de estabelecer, com precisão, entre o que se relaciona com a rede de canais fluviais e com os sulcos e ravinas relacionadas com os processos operantes no âmbito das vertentes. Se as concepções metodológicas e conceituais podem ser transpostas e utilizadas, o uso dos valores requer maior cuidado para serem utilizados como referência. Desta maneira, o emprego dos termos "grosseira", "baixa", "média", "alta", "fina" e "ultra-fina" permanece como simples adjetivação para expressar a percepção visual do pesquisador sobre a intensidade da densidade de drenagem.

Resta ainda em aberto a questão de avaliar a significância da densidade de drenagem como índice para interpretar as oscilações paleoclimáticas. Costuma-se admitir como válida o seguinte modelo:

a) sob condições de clima úmido instala-se uma rede de canais refletindo o balanço hidrológico entre as condições climáticas, a cobertura vegetal (florestas) e o manto de decomposição;

b) sob condições de clima seco, a transformação climática provoca o desaparecimento da cobertura vegetal (florestas) e propicia maior intensidade do escoamento superficial, o que leva ao entalhamento e esculturação de numerosos canais. Com o surgimento desses novos canais, a drenagem torna-se mais "fina" e apresenta valores mais elevados.

Esse esquema interpretativo foi aplicado à Amazônia brasileira, por exemplo, por Jean Tricart (1974; 1975; 1977). Considerando certo número de anomalias biogeográficas, assim como resultados obtidos através de métodos geomorfológicos e sedimentos, o referido autor escreve que "a vegetação florestal da parte axial, neogena, da Amazônia, resultaria de uma colonização recente, provavelmente do início do Holoceno. Pôde-se estabelecer que a dissecação muito fina e profunda que a caracteriza foi produzida durante a regressão pré-flandriana. Ela também dá o testemunho de outras condições biogeográficas; pôde desenvolver-se apenas sob uma cobertura vegetal relativamente pouco densa que permitiu um amplo escoamento superficial. Savanas abertas ofereceriam as condições requeridas" (Tricart, 1977 : 9).

Parece óbvio que o entalhamento de um canal fluvial é fato irreversível. Na sequência das oscilações do clima úmido para o seco, compreende-se que haja aumento da densidade de drenagem. Mas, se voltar o domínio das condições úmidas semelhantes às anteriores, a região permanecerá com a quantidade de

canais correspondente à fase seca, pois as novas condições úmidas vigentes não apagarão nem destruirão os vales fluviais. Assim, se mensurarmos a densidade de drenagem de inúmeras áreas atualmente úmidas, estaremos obtendo valores para as condições de controle climático úmido ou para as de controle de clima seco? E se, posteriormente, houver nova oscilação para clima seco haverá nova fase de entalhamento e necessidade de elaborar mais canais? Em suma, a densidade de drenagem é reflexo de quais condições ambientais?

Considerando o relacionamento entre a D_d e a F_s , parece viável supor que esses dois elementos possuam implicações importantes para a evolução geomorfológica de uma região. Tendo em vista as consequências oriundas das oscilações climáticas quaternárias, seria oportuno estabelecer análise comparativa entre as zonas afetadas sob intensidades diversas. Nessa perspectiva a afirmação de Zavoianu (1972 : 173), a de que "uma bacia hidrográfica possuindo valores elevados da D_d e da F_s tem capacidade mais rápida para drenar a área do que uma outra bacia com condições climáticas similares mas possuindo valores menores para esses dois elementos", poderia ser tomada como hipótese a ser testada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahams, A. D. (1972) Drainage densities and sediment yields in Eastern Australia. *Australian Geographical Studies*, 10 (1): 19-41.
- Bandara, C. M. M. (1974) Drainage density and effective precipitation. *Journal of Hydrology*, 21 (2): 187-190.
- Bassett, K. A. e Nordcliffe, G. B. (1969) Filter theory and filter methods in geographical research. *Seminar Papers* — Série A, n.º 19, Department of Geography, University of Bristol.
- Borchert, John R. (1961) The twin cities urbanized area: past, present, future. *Geographical Review*, 51 (1): 47-70.
- Carlston, C. W. (1963) Drainage density and streamflow. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper* (422-C): 1-7.
- Carlston, C. W. (1966) The effect of climate on drainage density and streamflow. *Int. Assoc. Scientists Hydrol. Bull.*, 11 (1): 62-69.
- Carlston, C. W. e Langbein, W. B. (1960) Rapid approximation of drainage density: line intersection method. *U. S. Geol. Survey Water Resources Div. Bull.* (11).
- Chorley, R. J. (1957) Climate and morphometry. *Journal of Geology*, 65 (6): 628-638.
- Chorley, R. J. e Morgan, M. A. (1962) Comparison of morphometric features, Unaka Mountains, Tennessee and North Carolina, and Dartmoor, England. *Geol. Soc. America Bull.*, 72 (1): 17-34.
- Christofoletti, Antonio (1969) Análise morfométrica de bacias hidrográficas. *Notícia Geomorfológica*, 9 (18): 35 a 64.
- Christofoletti, Antonio (1970) *Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas*. Tese de Livre Docência, F. F. C. e Letras de Rio Claro, 215 pp. (edição mimeografada).

- Christofoletti, Antonio (1973) Análise da densidade hidrográfica e da densidade de drenagem no Planalto de Poços de Caldas. *Ciência e Cultura*, 25 (5): 454-457.
- Christofoletti, A. e Cesar, A. L. (1978) Correlação entre densidade de drenagem e comprimento médio de canais em bacias hidrográficas. *Ciência e Cultura*, 30 (5): 601-604.
- Christofoletti, A. e Felizola, H. F. (1978) Procedimentos expeditos para o cálculo da densidade de drenagem. *Boletim Geográfico*, 36 (256): 96-104.
- Christofoletti, A. e Perez Filho, A. (1975) Estudo comparativo entre a documentação cartográfica e a aerofotográfica para a análise da drenagem. *Notícia Geomorfológica*, 15 (30): 55-64.
- Cotton, Charles A. (1962) Development of fine-textured landscape relief in temperate pluvial climates. *New Zeal. Journal Geol. and Geophysics*, 6 (4): 528-533.
- Cotton, Charles A. (1964) The control of drainage density. *New Zeal. Journal Geol. and Geophysics*, 7 (2): 348-352.
- Donahue, John J. (1972) Drainage intensity in Western New York. *Annals Assoc. American Geographers*, 62 (1): 23-36.
- Donahue, John J. (1974) Measuring drainage density with a dot planimeter. *The Professional Geographer*, 26 (3): 317-319.
- Dynowska, Irena (1976) Drainage density as an index of groundwater runoff. *Prace Geograficzne* (43): 65-81, Cracóvia.
- Eyles, R. J. (1971) A classification of West Malaysian drainage basins. *Annals Assoc. American Geographers*, 61: 460-467.
- Gardiner, V. (1971) A drainage density map of Dartmoor. *Transactions of Devonshire Association* (103): 167-180.
- Gardiner, V. (1977) Estimated drainage density and physical regions in South West England. *National Geographer*, 12 (2): 115-130.
- Gardiner, V., Gregory, K. J. e Walling, D. E. (1977) Further notes on the drainage density-basin area relationship. *Area*, 9 (2): 117-121.
- Gregory, K. J. (1971) Drainage density changes in South West England. in "Eceter Essays in Geography" (Gregory, K. J. e Ravenhill, W. L. D., editors), pp. 33-54.
- Gregory, K. J. (1976) Drainage networks and climate. in "Geomorphology and climate" (Derbyshire, E., editor). John Wiley & Sons, New York, pp. 289-315.
- Gregory, K. J. e Gardiner, V. (1975) Drainage density and climate. *Zeits. fur Geomorphologie*, 19 (3): 287-298.
- Gregory, K. J. e Walling, D. E. (1968) The variation of drainage density within a catchment. *Bull. International Association Scientific Hydrology*, 13 (2): 61-68.
- Gregory, K. J. e Walling, D. E. (1973) *Drainage basin form and process*. Edward Arnold Ltd., Londres, pp. 456.
- Hadley, R. F. e Schumm, S. A. (1961) Hydrology of the upper Cheyenne River Basin. *U. S. Geol. Survey Water Supply*, 1531-B): 137-198.
- Horton, Robert E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. America Bull.* 56 (3): 275-370.
- Langbein, W. B. e outros (1847) Topographic characteristics of drainage basins. *U. S. Geol. Survey Water Supply Paper*, (968-C): 125-147.
- Mark, David M. (1974) Line intersection method for estimating drainage density. *Geology*, 2 (5): 235-237.
- McCoy, A. (1971) Rapid measurement of drainage density. *Bull. Geol. Soc. America*, 82 (3): 757-762.
- Melton, M. A. (1957) An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology. *Technical Report*, n.º 11, 102 pp, Department of Geology, Columbia University.
- Melton, M. A. (1958) Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an E_4 phase space. *Journal of Geology*, 66 (1): 35 a 56.
- Neumann, L. (1900) Die Dichte des Flussnetzes in Schwarzwalde. *Beitrag fur Geophysische*.
- Peltier, L. C. (1962) Area sampling for terrain analysis. *Professional Geographer*, 14 (2): 24-28.
- Pethick, J. S. (1975) A note on the drainage density-basin area relationship. *Area*, 7 (3): 217 a 222.
- Ray, Richard G. (1963) *Fotografias aéreas na interpretação e mapeamentos geológicos*. Instituto Geográfico e Geológico, São Paulo.
- Schumm, S. A. (1956) Evolution of drainage system and slopes in badlands of Perth Amboy, New Jersey. *Geol. Soc. America Bul.*, 67 (3): 597-646.
- Shreve, R. L. (1969) Stream lengths and basin areas in topologically random channel networks. *Journal of Geology*, 77 (4): 397-414.
- Shreve, R. L. (1974) Variations of mainstream length with basin area in river networks. *Water Resources Research*, 10 (6): 1.167-1.177.
- Smart, J. S. e Surkan, A. J. (1967) The relation between mainstream length and area in drainage basins. *Water Resources Research*, 3 (4): 963-974.
- Smart, J. S. e Werner, C. (1976) Applications of the random model of drainage basin composition. *Earth Surface Processes*, 1 (3): 19-233.
- Smith, K. G. (1950) Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248: 655-668.
- Stall, J. B. e Bartelli, L. J. (1959) Correlation of reservoir sedimentation and watershed factors. *Report of Investigations*, n.º 37, Illinois State Water Supply Division.
- Strahler, A. N. (1952) Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. America Bulletin*, 63 (10): 1.117-1.142.
- Strahler, A. N. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Amer. Geophysical Union Transactions*, 38: 913-920.
- Strahler, A. N. (1960) *Physical Geography*. John Wiley & Sons, New York, 534 pp., 2.ª edição.
- Strahler, A. N. (1964) Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. in "Handbook of Applied Hydrology" (Chow, V. T., editor), Mc Graw Hill Book Co., New York, pp. 4.39-4.76.
- Trainer, F. W. (1969) Drainage density as an indicator of base flow in part of the Potomac river basin. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, (650-C): 177-183.
- Tricart, Jean (1974) Existence, au Quaternaire, de périodes sèches en Amazonie et dans les régions voisines. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 23 (4): 145-158.
- Tricart, Jean (1975) Influences des oscillations climatiques récentes sur le modelé en Amazonie orientale (région de Santarém), d'après les images de radar lateral. *Zeits. fur Geomorphologie*, 19 (2): 140-163.
- Tricart, Jean (1977) Tipos de planícies aluviais e de leitos fluviais na amazônia brasileira. *Rev. Brasileira de Geografia*, 39 (2): 3-40.
- Wilgat, T. (1966) The distance from water as an index of drainage density. *Przegląd Geograficzny*, 38 (3): 371-380.
- Wilgat, T. (1968) Distance from water — an index of the density of a hydrographical network. *Geographia Polonica* (13): 79-89.

- Williams, R. E. e Fowler, P. M. (1969) A preliminary report on an empirical analysis of drainage network adjustment to precipitation input. *Journal of Hydrology*, 8 (2): 227-238.
- Woodruff, J. F. (1964) A comparative analysis of selected drainage basins. *Professional Geographer*, 16 (1): 15-19.
- Woodyer, K. D. e Brookfield, M. (1966) The land system and its stream nets. *Technical Memorandum*, n.º 66/5, CSIRO Division of Land Resources.
- Zavoianu, I. (1969) Determination of the drainage density of the hydrographic network based on Horton's laws. *Revue Roumaine de Géographie*, 16 (2): 167-174.

ABSTRACT

The drainage density and its geomorphic implications. The drainage density is concerned with the channel length per area unit. Expressing the interaction among environmental factors, the drainage density is a basis for the drainage basin classification and for the morphoclimatic zone distinction. Reviewing some questions, this paper deals with the techniques for estimating drainage density and with its variability in the earth surface, showing its relations with the climate and lithologic controls. Special attention is concerned with the correlation between drainage density and basin area and between drainage density and mean length of fluvial network segments. The last question seeks to evaluate the importance of the drainage density to the paleoclimatic changes.