

GEOUSP Espaço e Tempo, São Paulo, N^o 13, p. 35-46, 2003

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO E OS COMPONENTES DO ESCOAMENTO EM BACIA TROPICAL DE MESO ESCALA

Fernando Frosini de Barros Ferraz*
Jefferson Mortatti**

RESUMO

O objetivo desse trabalho é verificar a existência de diferenças significativas no escoamento superficial e subterrâneo entre sub-bacias com diferentes tipos de solo na bacia do rio Piracicaba/SP. Para isso foi estudada a distribuição espacial da precipitação no período considerado no estudo (1995 -1997) e para um período de 30 anos (1962 - 1993) com a utilização de um Sistema de Informações Geográficas. Para a separação do escoamento total utilizou-se uma técnica estatística de filtros numéricos, que demonstrou que os escoamentos superficial e subterrâneo são semelhantes em todas as sub-bacias estudadas, independente da formação geológica e do uso do solo.

PALAVRAS-CHAVE

Análise espacial da precipitação; Sistema de Informações Geográficas; Separação de hidrogramas.

ABSTRACT

This paper goal is to verify differences on surface runoff among some selected areas in the Piracicaba river basin, which have different soil types. Spatial distribution of precipitation was studied with geographic information system (GIS) for 2 periods: the 30-year normal (1962-1993) and the study period (1995-1997). In order to separate the stream hydrograph, the numerical filters statistical procedure was used. The results showed that the same surface runoff for all areas studied, independently of its land use or geologic formation.

KEY WORDS

Rainfall spatial analysis; Geographic Information System; Hydrograph separation.

* TRN Tecnologia em Recursos Naturais / email: fernando@trngeo.com

**Jefferson Mortatti Universidade de São Paulo Centro de Energia Nuclear na Agricultura
Laboratório de Isótopos Estáveis / email: jmortatti@cena.usp.br

1. Introdução

A distribuição da precipitação em uma bacia de drenagem de porte regional não é uniforme, sofrendo influências diversas como altitude, massas de ar, uso do solo e posição geográfica entre outros. Vários estudos para a determinação do comportamento espacial da precipitação têm sido realizados, com a utilização de técnicas que vão desde a identificação de regiões homogêneas por processo trigonométrico até a interpolação de dados por Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Essa última, a mais utilizada atualmente, pode se utilizar inúmeros tipos de algoritmos computacionais, cada um com uma vantagem, mas nem sempre adequados para o trato com distribuição espacial da precipitação.

Retomando os caminhos do bem conhecido ciclo hidrológico, parte da água precipitada sobre a superfície produz os diferentes tipos de escoamento. O escoamento superficial rápido está relacionado com as águas geradas imediatamente após as chuvas, de rápida circulação e alto poder erosivo mecânico, enquanto os componentes sub-superficial e subterrâneo são mais lentos.

A erosão mecânica em uma bacia de drenagem, como fenômeno de abrasão, está intimamente relacionada ao transporte de material em suspensão, que por sua vez é determinado pelo escoamento superficial rápido, agente do processo (Tardy, 1990). A separação da componente do escoamento superficial rápido do hidrograma do escoamento total é, portanto, de fundamental importância para o estudo do processo erosivo em uma bacia de drenagem.

O objetivo desse trabalho é avaliar o comportamento espacial dos dois principais componentes do ciclo hidrológico relacionados à produção e transporte de sedimentos em uma bacia de drenagem de escala regional, a distribuição espacial da precipitação e o comportamento do escoamento superficial rápido em diversas sub-bacias com diferentes formações geológicas e uso do solo. Nos dois casos utilizou-se método estatístico, sendo o estudo desenvolvido sobre o SIG ESRI ArcView GIS 3.2 e suas extensões.

2. A área de estudo

Realizou-se o estudo na bacia do rio Piracicaba/SP, situada na região sudeste do Brasil, possui área aproximada de 12400 Km², considerada uma bacia de drenagem de meso escala desenvolvida. Cerca de 90% de sua área situa-se no Estado de São Paulo e o restante no Estado de Minas Gerais. **A Figura 1** apresenta a sua localização e coordenadas limite. Por ser uma região sub-tropical de acelerado desenvolvimento no estado mais industrializado do país, essa bacia de drenagem apresenta uma acelerada alteração de paisagem, principalmente pelo avanço dos plantios de cana-de-açúcar e da expansão urbana.

O solo da bacia do rio Piracicaba é coberto por cana-de-açúcar (35%), pastagens (24%), culturas anuais e citrus (15%), silvicultura (16%), vegetação nativa (3.4%) e áreas urbanas (2.7%), segundo Ballester et. al, (2001). Sua população é de 3.2 milhões de habitantes (São Paulo, 1996) concentradas em mais de 90% nas áreas urbanas. A atividade

Figura 1

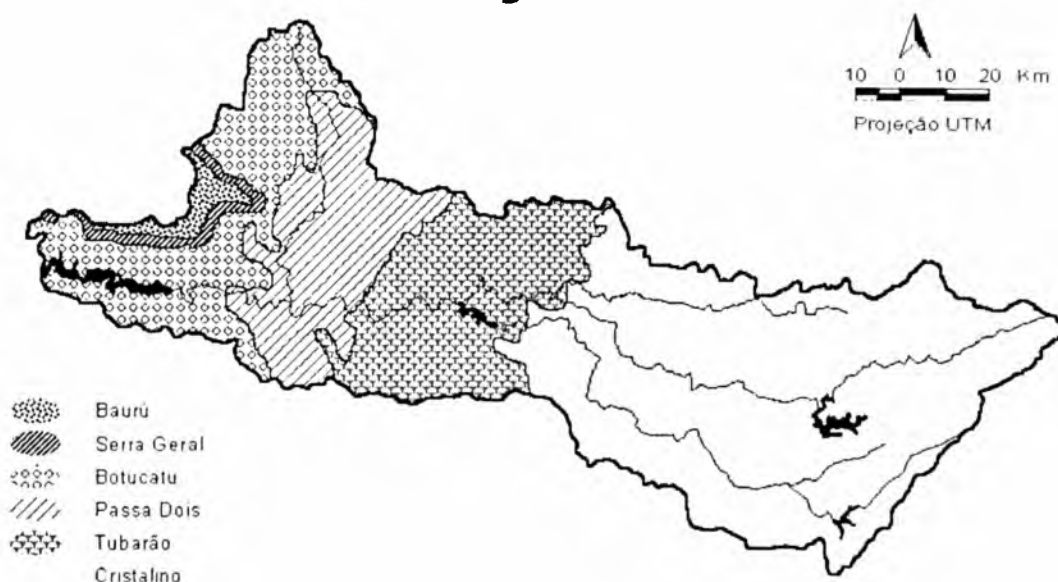


econômica é bastante diversificada, com vocações regionais para a indústria e agroindústria na região central e para a agricultura nas demais, constituindo o 3º maior pólo econômico brasileiro.

A bacia de drenagem do rio Piracicaba possui dois domínios geológicos diferentes. De sua porção média para leste encontram-se as rochas do embasamento cristalino, suscetíveis à movimentação gravitacional de massas e a erosão sub-superficial do solo. As unidades litológicas que formam o

embasamento cristalino situam-se entre as eras Arqueana e Eo-paleozoica. Nessa região o solo é usado predominantemente para pastagens. De sua porção média para oeste ocorrem rochas sedimentares da bacia geológica do Paraná, onde se encontram quatro grandes unidades estratigráficas pertencentes aos Grupos Tubarão, Passa Dois, São Bento e Bauru (São Paulo, 1996). Nesta região o uso predominante é a cultura de cana-de-açúcar e é onde se encontram as maiores manchas urbanas. **A Figura 2** apresenta

Figura 2



um mapa com as formações geológicas da bacia de drenagem do rio Piracicaba.

Geomorfologicamente a bacia do rio Piracicaba tem dois setores distintos: das cabeceiras até a porção média, predomina o relevo montanhoso, com declividade média acima de 15%, alta densidade de drenagem e altitudes entre 600 e 2000 metros. Da porção média para oeste situa-se a depressão periférica, assim chamada pelas suas altitudes inferiores em relação às províncias geomorfológicas que a ladeiam, com declividade menos acentuada, terrenos sedimentares e relevo colinoso (São Paulo, 1990). As altitudes variam entre 500 e 700 metros, a densidade de drenagem é considerada média-baixa.

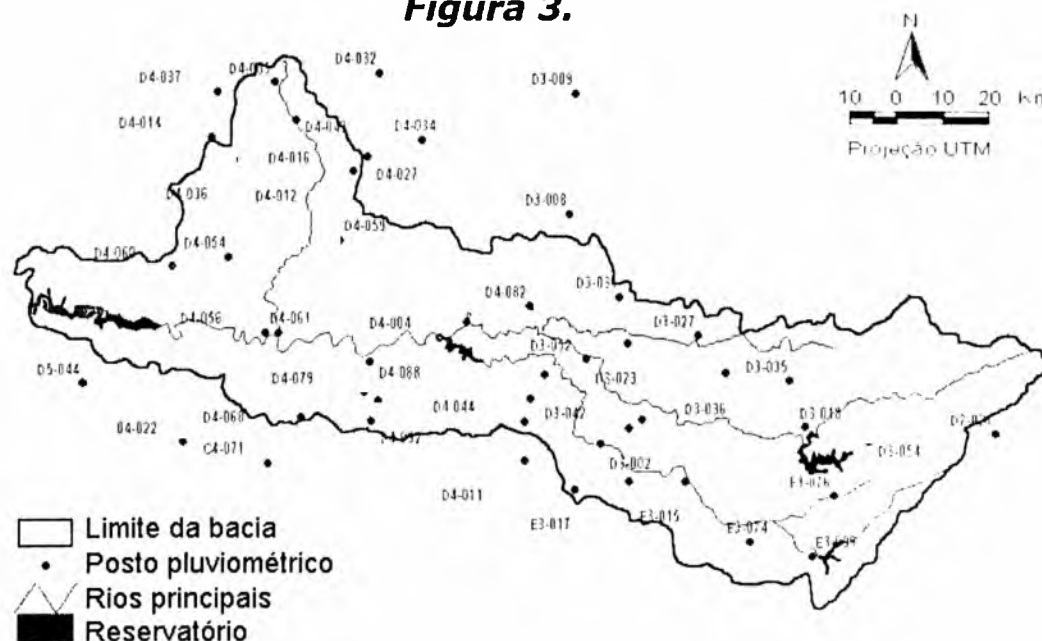
Segundo classificação de Köppen, a predominância do clima na bacia de drenagem do rio Piracicaba é do tipo Cwa, que indica a média do mês mais frio entre +3°C e +18°C, seca no inverno e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. Já a porção situada na

serra da Mantiqueira possui o clima do tipo Cwb, segundo a mesma classificação, porém com temperatura do mês mais quente inferior a 22°C.

A distribuição pluvial segue um regime caracterizado por duas estações bem distintas com verão chuvoso que se estende de outubro a março e inverno seco de abril a setembro. A média pluviométrica anual da bacia é de 1440 mm, sendo a média mensal do período seco, que vai de abril a setembro, inferior a 20 mm e do período úmido, entre outubro e março, 300 mm (Pellegrino, 1995).

As médias mensais de precipitação, uma rede de 60 postos pluviométricos situados no interior e no entorno da área da bacia de drenagem do rio Piracicaba, utilizadas no estudo, foram fornecidos pelo DAEE, Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE, 1998a), cuja localização é apresentada na **Figura 3**.

Figura 3.



As descargas utilizadas no estudo são referentes ao período de Maio de 1995 a Junho de 1997, medidas nos postos fluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE, 1998b) situados ao longo

dos principais rios da bacia de drenagem, como mostra a **Figura 4**. As características morfométricas de cada sub-bacia foram extraídas por meio do SIG e podem ser observadas na **Tabela 1**.

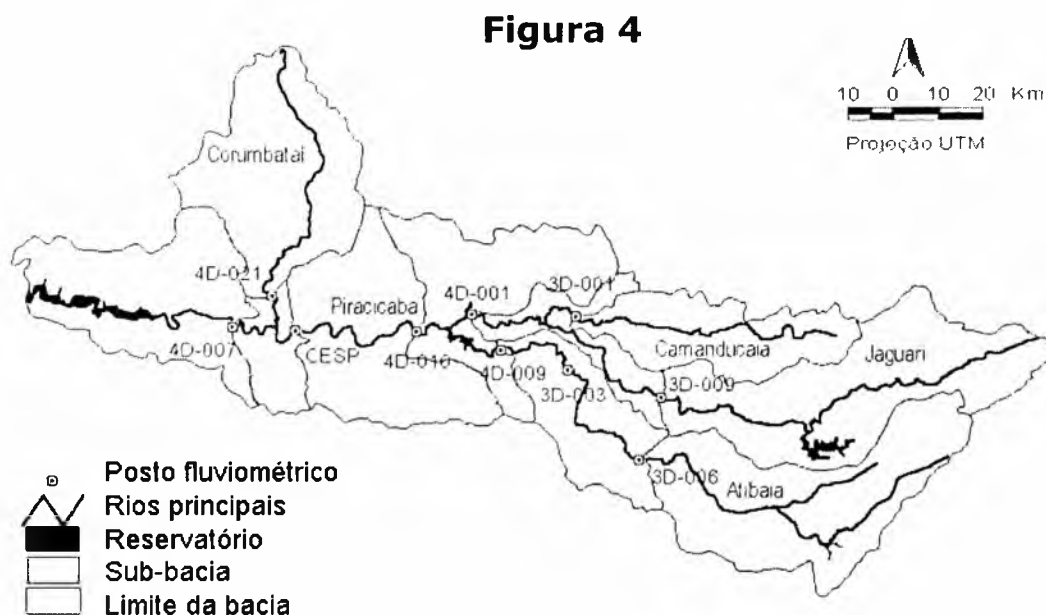


Tabela 1: As principais características morfométricas das sub-bacias da bacia de drenagem do rio Piracicaba, sendo H_{min} a altitude mínima, H_{max} a altitude máxima, Q_{ts} a vazão média para o trimestre seco, Q_{um} a vazão média para o trimestre úmido e D a declividade média.

Prefixo posto	Área (km ²)	H_{min} (m)	H_{max} (m)	Q_{ts} (m ³ /s)	Q_{um} (m ³ /s)	D (%)
3D-001	956	570	700	8,31	17,16	10,0
3D-006	1813	700	2010	15,02	39,40	15,3
4D-009	808	560	750	20,88	42,34	7,6
3D-009	1931	740	1980	8,79	37,66	12,1
4D-001	493	560	600	21,40	69,59	9,1
4D-010	1158	530	560	30,02	58,58	8,4
CESP	1467	500	550	57,42	73,86	7,4
4D-007	505	440	680	75,30	129,88	4,2
4D-021	1627	480	1060	17,88	56,72	8,0

3. Metodologia

As modernas técnicas de interpolação de dados climáticos com a utilização de SIG estão bem descritas em Nalder & Wein (1998), que apresentam as características das técnicas do inverso do quadrado da distância, vizinho mais próximo e krigagem, nas suas diversas variações, em um estudo realizado no Canadá.

A separação de hidrógrafas é um dos maiores problemas da hidrologia (Kattan et. al., 1987), tendo sido propostas diversas metodologias com o objetivo separação do escoamento total de um corpo d'água em dois ou três componentes principais. Os primeiros métodos que surgiram baseavam-se na aplicação de procedimentos gráficos como descrito em Barnes (1939), Schoeller (1962), Castany (1963), Probst (1983) e Tardy (1986) entre outros. As maiores dificuldades do método estão relacionadas com o formato da hidrógrafa de rios de médio e grande porte, que torna difícil a avaliação do ponto de descarga subterrânea máxima durante o período de cheia (Mortatti, 1998).

A utilização de métodos estatísticos na separação de hidrógrafas é uma técnica de uso relativamente recente (Probst e Sigha, 1989 e Mortatti et al. 1992), onde as flutuações das vazões, comparadas às ondas senoidais, são expressas na função de Fourier após a definição dos principais parâmetros da análise espectral da série temporal de vazões, através do equacionamento:

$$Q_t = \sum_{f=0}^{f_c} A \cos(ft) + B \sin(ft) + \sum_{f=f_c}^{\infty} A \cos(ft) + B \sin(ft)$$

onde f é a frequência (0 a π), A e B

são coeficientes de cosseno e seno de Fourier, f_c é a frequência de separação e t é o tempo.

Os sinais de vazão durante o período de águas baixas estão relacionados às baixas frequências das ondas senoidais, enquanto as vazões mais altas estão associadas aos sinais de alta frequência. A análise espectral permite a definição da frequência de corte ou separação f_c , que na função de Fourier, separa as componentes superficial e subterrânea.

3.1. Espacialização da precipitação

As séries dos postos pluviométricos estudados no período entre Junho de 1995 a Maio de 1997 foram reconstituídas e consistidas, obtendo-se médias mensais para o período, que posteriormente foram totalizadas nas médias anuais de cada posto.

Para a análise da distribuição espacial das médias anuais procedeu-se a interpolação dos dados em um SIG através da técnica de interpolação denominada Krigagem, descrita com detalhes em Isaaks & Srivastava (1989) e cuja principal característica é o cálculo da margem de erro para cada valor estimado, que resulta em um variograma e proporciona uma estimativa de acerto da interpolação. O variograma define a variação da cota Z como uma função da distância, como descrevem Nalder & Ross (1998) pela equação:

$$\gamma_h = \frac{1}{2N_h} \sum_{k=1}^{N_h} [Z(x_k + h) - Z(x_k)]^2$$

onde γ_h é a semi-variância da variável

Z a uma distância h, Nh é o número de pares de pontos no intervalo de distância h + Δh.

Os valores de Z são calculados para cada possível par de postos e o valor médio das semi-variâncias são plotados em sucessivos intervalos de distância para produzir um variograma experimental. Um variograma padrão é então ajustado a esses pontos e o modelo é utilizado para a geração de uma matriz de auto-covariância, de onde saem os valores estimados para cada ponto.

3.2. Separação do escoamento

A utilização de filtros numéricos a partir de análises de correlação de dados temporais de vazões dos rios é uma variação do método estatístico desenvolvido por Hino & Hasebe (1986). A metodologia é baseada na utilização de um filtro numérico de separação de alta frequência que somente permite a passagem dos sinais de baixa frequência, associados à componente subterrânea do escoamento total, em um modelo que considera somente o escoamento superficial e o subterrâneo (Araújo & Dias, 1995). O filtro numérico de separação de alta frequência, para uma série temporal dos dados do escoamento total (Qt) de um rio, calculado para uma equação de filtro de 1ª ordem é expresso da seguinte forma:

$$Q_b(t) = \alpha [B Q_b(t-1)] + A Q(t)$$

onde Q_b(t) corresponde ao escoamento subterrâneo filtrado e α é o fator de ponderação escolhido de maneira a evitar os sinais filtrados negativos. A e B são constantes expressas por:

$$A = \frac{e^{(1/T_c)}}{T_c} \quad B = \frac{\Delta t}{T_c}$$

onde Δt corresponde ao intervalo de tempo e T_c é o período de corte.

O período de corte corresponde ao inverso da frequência de separação (T_c = f_c-1) e a frequência de separação f_c pode ser determinada a partir do tempo de defasagem (lag time), onde os coeficientes da auto-regressão apresentam um ponto de inflexão ou a partir do periodograma oriundo da análise da densidade espectral da série temporal de vazões.

4. Resultados

4.1. Comportamento espacial da precipitação

O mapa de distribuição da precipitação anual obtido para o período entre 1962 e 1993 na bacia de drenagem do rio Piracicaba é apresentado na **Figura 5**, onde se observa que as maiores precipitações situam-se a leste da bacia, na região das nascentes, região do planalto. Do centro da bacia em direção a oeste, onde começa a depressão periférica, são encontrados os menores volumes precipitados, com um ligeiro acréscimo na região das cabeceiras do rio Corumbataí.

A **Figura 6** apresenta o mapa de distribuição da precipitação anual para o período entre 1995 e 1997 na bacia de drenagem do rio Piracicaba, revelando uma região bastante úmida situada nas cabeceiras dos rios Camanducaia, Jaguarí e Atibaia, com precipitação anual média

Figura 5

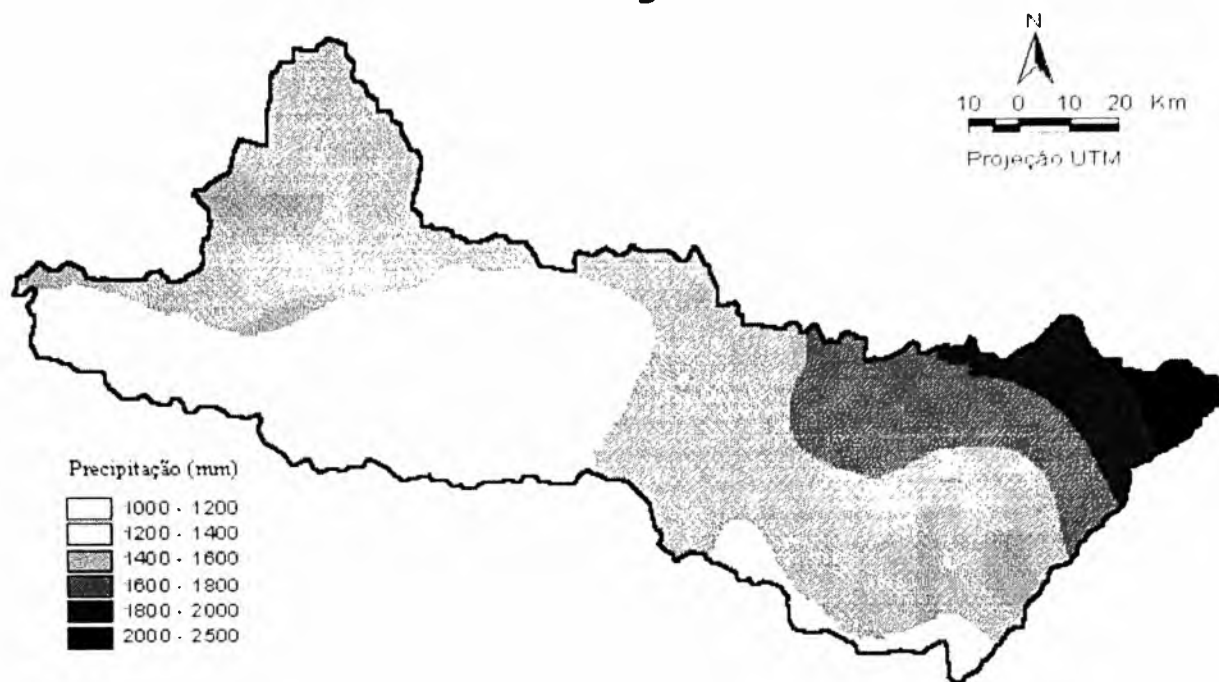
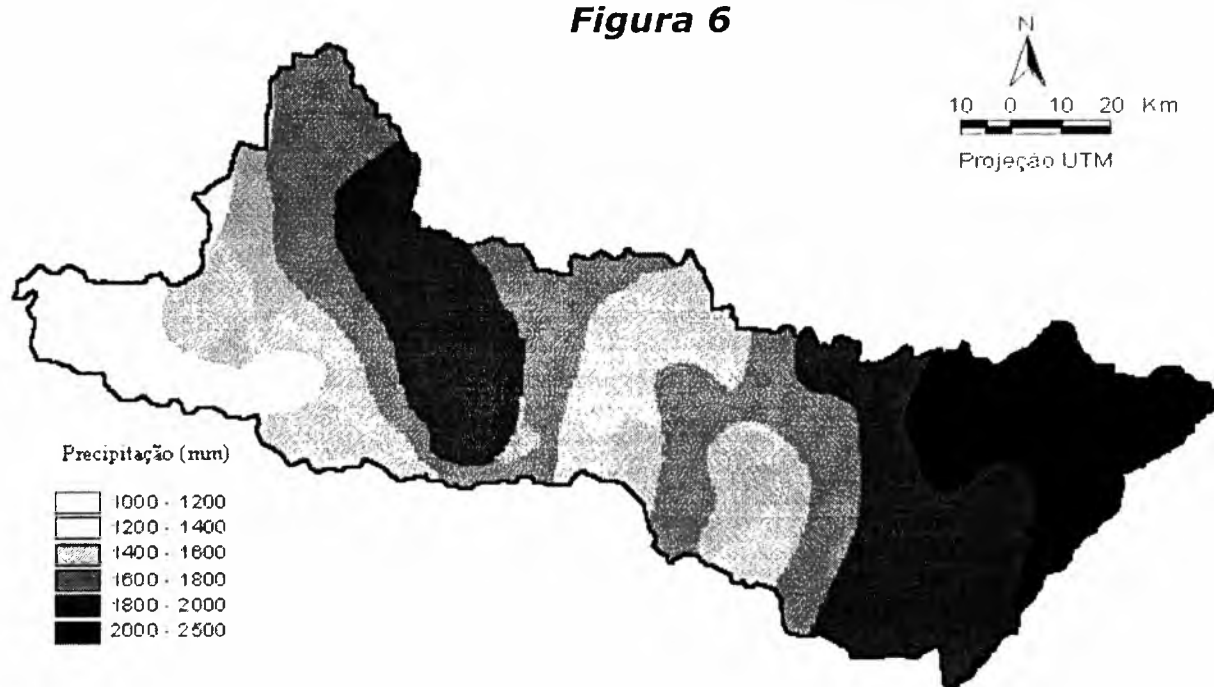


Figura 6



acima de 2000 mm, que diminui em direção ao centro da bacia com média em torno de 1400 mm, atingindo, já na depressão periférica, uma região úmida com médias de 1800 mm, retornando a

média de 1400 mm na região da foz do rio Corumbataí. A distribuição espacial da precipitação é diferente daquela obtida para as médias de 30 anos, o que pode ser explicado pela influência

do fenômeno El Niño, principalmente no ano de 1997 Pellegrino (1995), estudando o comportamento espacial da precipitação para o ano de 1983, obteve comportamento espacial semelhante ao observado na *Figura 6*.

Calculou-se, por meio da técnica de integração de pixels em sistemas de

informação geográfica a precipitação média por sub-bacia para os dois períodos estudados. O resultado da precipitação média por sub-bacia, acompanhado do respectivo desvio-padrão é apresentado na **Tabela 2**, onde se pode observar que o maior acréscimo do volume precipitado ocorreu nas sub-

Tabela 2: Precipitação média anual para os períodos 1995-1997 (1), para o período 1962-1993 (2), coeficientes de escoamento subterrâneo (K_b), superficial (K_r) e índices médio de proteção do solo (I_p) e erodibilidade média do solo (E_r).

Prefixo posto	P_1 (mm)	P_2 (mm)	K_b	K_r	I_p	E_r
3D-001	1812	1652	0,83	0,17	0,02	2,85
3D-006	1900	1499	0,82	0,18	0,01	2,60
4D-009	1562	1432	0,82	0,18	0,04	2,87
3D-009	1984	1729	0,81	0,19	0,01	2,15
4D-001	1574	1446	0,81	0,19	0,06	2,78
4D-010	1700	1389	0,82	0,18	0,10	2,67
CESP	1768	1352	0,81	0,19	0,10	3,22
4D-007	1472	1355	0,81	0,19	0,08	3,68
4D-021	1709	1438	0,81	0,19	0,05	3,12

bacias de cabeceiras (3D-006, 3D-009) e da região central (4D-010, CESP, 4D-021 em parte) da bacia de drenagem do rio Piracicaba. Deve-se observar também o aumento dos desvios-padrão dessas áreas indicando uma maior amplitude de volume precipitado dentro de uma sub-bacia.

4.2. Comportamento espacial do escoamento

Os resultados da separação do hidrograma obtidos para cada sub-bacia

também são apresentados na Tabela 2, onde pode-se observar que o coeficiente médio de escoamento superficial (K_r) encontrado é semelhante para todas as sub-bacias, situando-se em torno de 0,19 ou 18% do escoamento total, semelhante ao estimado por Rodrigues Jr (1998), de 18,8%. Não se observou variações significativas do escoamento subterrâneo entre as sub-bacias situadas na região da formação cristalina e as demais.

Para se determinar estatisticamente se existe correlação entre o uso do solo e os componentes superficial e subterrâneo

do escoamento gerou-se um mapa de índices de proteção do solo, baseada em valores propostos por Cerri (1999) para a bacia de drenagem do rio Piracicaba. Os índices médios de proteção para cada sub-bacia estão apresentados na **Tabela 2**. Executou-se uma análise de correlação entre os coeficientes de escoamento subterrâneo K_b e os índices de proteção do solo, para se avaliar a relação entre os dois conjuntos de dados, independentes da unidade de medida. O resultado obtido $R = 0.0077$ demonstra que os dois conjuntos de dados não se movem juntos. A mesma análise realizada entre o índice de erodibilidade médio dos solos e o coeficiente de escoamento subterrâneo K_b apresentou resultado semelhante ao anterior demonstrando a inexistência de correlação entre eles.

5. Conclusões

O volume médio precipitado no período entre 1995-1997 foi superior ao da média de 1962-1993 em 16,5% e a sua distribuição espacial sofreu grandes alterações, aumentando de forma considerável a amplitude do volume precipitado nas sub-bacias estudadas.

A metodologia empregada na interpolação mostrou-se adequada para o trato com dados climáticos, devendo

se ressaltar o cuidado necessário no tratamento dos dados brutos, sem o qual a espacialização pode produzir resultados esdrúxulos. As taxas de escoamento superficial e subterrâneo mostraram-se praticamente constantes para todas as sub-bacias estudadas, independentes do volume precipitado, da sua distribuição, do uso do solo e da sua origem geológica. Esse resultado pode ser decorrência da técnica de separação empregada que pode estar ocultando oscilações no escoamento rápido, o que alteraria os padrões de comportamento de acordo com o uso do solo na bacia do rio Piracicaba.

6. Glossário

Krigagem: Processo de estimação de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma.

Semivariograma: mostra a medida do grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico.

Regressão múltipla: Técnica usada para testar dependências cumulativas de uma única variável dependente em relação à diversas variáveis independentes.

Bibliografia

ARAUJO, A.A.M.; Dias, N.L. Separação de hidrograma de cheias através de filtros auto-recursivos. In: XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11., Recife, 1995. Anais. Recife, 1995. p. 267-272.

BALLESTER, M.V.R.; KRUSCHE, A.V.; MARTINELLI, L.A.; FERRAZ, E.S.B.; VICTORIA, R.L.; BERNARDES, M.C.; OMETTO, J.P.; CERRI, C.E.P.; TOLEDO, A.M.A.; CAMARGO, P.; FRACASSI, F.C. Análise integrada de bacias de drenagem utilizando Sistemas de Informações Geográficas e biogeoquímica de águas superficiais na bacia do rio Piracicaba (São Paulo) In: Schiavetti, A.; Camargo, A.F.M. (Ed.) Conceito de bacias hidrográficas, teoria e aplicações. Ilhéus: Editora Editus, 2001. cap.11.

BARNES, B.S. The structure of discharge recession curves. Transactions of the American Geophysical Union, v.20, n.4, p.721-725, 1939.

CASTANY, G. Traité pratique des eaux souterraines. Paris: Ed. Dunod, 1963. 686p.

CERRI, C.E.P. Mapeamento das áreas de risco de erosão dos solos da bacia do rio Piracicaba, utilizando geoprocessamento. Piracicaba, 1999. 89p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. Banco de dados pluviográficos do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras, 1998a.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. Banco de dados pluviográficos do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras, 1998b.

HINO, M.; HASEBE, M. Separation of a storm hydrograph into runoff components by both filter separation (AR) method and environmental isotope tracers. Journal of Hydrology, v.85, p.251-264, 1986.

ISAAKS, E.H.; Srivastava, R.M. Applied geostatistics. Oxford: Oxford University Press, 1989.

KATTAN, Z., GAC, J.Y., PROBST, J.L. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin - Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. Journal of Hydrology, v.92, p.59-76. 1987

MORTATTI, J.; PROBST, J.L.; FERREIRA, J.R. Hydrological and geochemical characteristics of the Jamari and Jiparana river basin (Rondonia, Brazil). GeoJournal, v.26, n.3, p.287-296, 1992.

MORTATTI, J.; PROBST, J.L. Hidrogeoquímica de bacias de drenagem. Piracicaba: CENA, 1998. 235p. (Série Didática, 1)

NALDER, I.A.; WEIN, R.W. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. Agricultural and Forest Meteorology, v.92, p.211-225, 1998.

PELLEGRINO, G. Q. Análise espaço-temporal de dados hidrológicos da bacia do rio Piracicaba. Piracicaba, 1995, 177p. (Dissertação de Mestrado, USP/ESALQ).

PROBST, J.L. Hydrologie du bassin de la Garonne, modèle de mélange, bilan de l'érosion, exportation des phosphates et des nitrates. Toulouse, 1983. 148p.

PROBST, J.L.; SIGHA, N. Estimation de l'écoulement superficiel et descharge en suspension sur quelques grands bassins fluviaux du monde. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Serie 2, v.309, p.357-363, 1989.

RODRIGUES JUNIOR, J.C. Balanço da erosão na bacia do rio Piracicaba. Piracicaba, 1998. 58p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

São Paulo (Estado) Conselho Estadual de Recursos Hídricos Plano estadual de recursos hídricos: Primeiro plano do Estado de São Paulo. São Paulo: DAEE, 1990. 113p.

São Paulo (Estado) Levantamento e sistematização de dados sobre áreas de risco, áreas degradadas, áreas sujeitas à erosão e informações específicas sobre resíduos sólidos domésticos e sobre atividades agrícolas desenvolvidas nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. São Paulo: Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras, 1996. t.II. (Relatório Técnico).

SCHOELLER, H. Lex eaux souterraines. Paris: Ed. Masson et Cie, 1962. 642p.

TARDY, Y Le cycle de l'eau; climats, paléoclimats et géochimie globale. Paris: Masson, 1986. 338p.

TARDY, Y Erosion. Encyclopedia Universalis, v.8, p.615-627, 1990.

Data de entrega julho/2002

Data de aceite novembro/2002