Departamento de Hidromecânica e Hidrologia
Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

GERENCIAMENTO DA DRENAGEM URBANA

Carlos E. M. Tucci

André Silveira

Abril/2001

I.Súmula da disciplina:

Revisão de conceitos ambientais e hidrológicos na bacia hidrográfica como base para o gerenciamento; Características da urbanização e seu impacto na infraestrutura hídrica; Água No meio Urbano; Impactos Ambientais e na saúde; Gerenciamento das áreas ribeirinhas: medidas estruturais e não-estruturais, zoneamento de áreas de inundação, avaliação econômica; Gerenciamento da drenagem urbana: Impactos, controles atuais, visão moderna do controle na drenagem urbana, mecanismos institucionais e de gestão.

II.Objetivos

O curso tem a finalidade de orientar os alunos dentro dos aspectos principais do gerenciamento da drenagem urbana sem entrar no detalhamento de engenharia. O curso é voltado para alunos de engenharia e arquitetura que irão trabalhar nas cidades e necessitam entender todos os elementos hidrológicos e ambientais relacionado com a ocupação do espaço e os impactos na drenagem urbana em específico.

III. Professores

Carlos E. M. Tucci
André L.L. Silveira
Joel Goldenfum

IV. Programa

1. Introdução a Hidrologia

1.1 Introdução
1.2 Histórico
1.3 Ciência hidrológica
1.4 Hidrologia aplicada

2. Conceitos Hidrológicos

2.1 Ciclo hidrológico global e regional
2.2 Impactos da urbanização no ciclo hidrológico local
2.3 Noções do comportamento do escoamento em rios e reservatórios
2.4 Noções do transporte de massa em rios e reservatórios
2.5 Principais variáveis hidrológicas
2.6 Séries hidrológicas: enchentes e estiagens
2.7 Noções de regularização de vazão

3. Água no meio urbano

3.1 Crescimento populacional e urbanização
3.2 Infraestrutura de Água no meio urbano
3.2.1 Manancial
3.2.2 Abastecimento de Água
3.2.3 Saneamento
3.2.4 Drenagem Urbana e inundações ribeirinhas
3.2.5 Resíduos Sólidos

3.3 Impactos ambientais na infra-estrutura
3.4 Impactos da Saúde

4. Gerenciamento das Inundações ribeirinhas

4.1 Avaliação das Inundações
4.2 Medidas de Controle
4.2.1 Medidas Estruturais
4.2.2 Medidas Não-estruturais
4.3 Zoneamento de Inundação
4.4 Avaliação econômica

5. Drenagem urbana

5.1 Impactos
5.2 Medidas de Controle atuais
5.3 Medidas de controle sustentáveis
5.3.1 Na Fonte
5.3.2 Na microdrenagem
5.3.3 Na macrodrenagem

6. Plano Diretor de Drenagem urbana
6.1 Objetivos e justificativas
6.2 Princípios
6.3 Estrutura
6.3.1 Concepções
6.3.2 Desenvolvimentos
6.3.3 Produtos
6.3.4 Programas
6.4 Estudos de casos

V. Bibliografia

TUCCI, C.E.M. 1993. Hidrologia Ciência e Aplicação. Editora UFRGS, EDUSP ABRH 952p

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.; BARROS, M.T., 1995. Drenagem urbana Editora da UFRGS ABRH 450 p

TUCCI, C.E.M. 1999. Água no Meio Urbano. Capítulo 14 de Águas do Brasil. IEP

TUCCI, C.E.M.(ed.) 2000. Urban Drainage in Tropics Humids UNESCO.

TUCCI, C.E.M. MARQUES, D. M. (eds.) 2000. Gerenciamento Ambiental da Drenagem Urbana. Editora da UFRGS e ABRH.

VI. Programa de aulas

Data	Conteúdo
12 / 03	Apresentação da disciplina e discussão com os alunos
14 / 03	Ciclo hidrológico global e regional e impactos
19 / 03	Noções sobre o escoamento e transporte de massa
21 / 03	Principais variáveis hidrológicas, estiagens e enchentes
26 / 03	Noções sobre regularização de vazão
28 / 03	Água no meio urbano: tendência de urbanização; visão de conjunto da água no meio urbano
02 / 04	Prova do capítulo 1
04 / 04	Manancial, abastecimento e saneamento
09 / 04	Drenagem urbana e inundações ribeirinhas; resíduos sólidos
11 / 04	Impactos ambientais e na saúde
16 / 04	Teste do capítulo 2
18 / 04	Gerenciamento das inundações ribeirinhas: avaliação
23 / 04	Medidas de controle estrututurais
25 / 04	Medidas de controle não-estruturais: previsão de cheia e zoneamento de inundação
30 / 04	Zoneamento e avaliação econômica
02 / 05	Drenagem Urbana: Impactos
06 / 05	Teste capítulo 2
08 / 05	Medidas de controle atuais e medidas sustentáveis
13 / 05	Medidas na fonte
15 / 05	Medidas da microdrenagem
20 / 05	Medidas na macrodrenagem
22 / 05	Plano Diretor de drenagem urbana: objetivos e princípios, justificativa
27 / 05	Teste do capítulo 3
29 / 05	Estrutura, estratégica e avaliações econômica
03 / 06	Medidas de controle estruturais por bacias
05 / 06	Regulamentação e sua interação externa a cidade
10 / 06	Programas
12 / 06	Estudos de Casos: Região Metropolitana de Curitiba
17 / 06	Porto Alegre
19 / 06	Caxias do Sul como visão integrada
20 / 06	Aula de revisão
25 / 06	Teste capítulo 4

VII. Avaliações

Os testes serão realizados para cada capítulo. O questionamento será realizado sempre os conceitos principais discutidos em aula, onde o aluno deve buscar mostrar que entendeu o básico e conseguiu racionar sobre o assuntos abordados.

1 . Introdução a Hidrologia

1.1 Introdução

Hidrologia, a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas (U.S. Federal Council for Science and Technology, citado por Chow,1959).

Esta é uma disciplina consideravelmente ampla, abrangendo uma grande parte do conhecimento humano. Algumas das áreas em que a Hidrologia, foi subdividida são as seguintes:

Hidrometeorologia - é a parte da ciência que trata da água na atmosfera;
Limnologia - refere-se ao estudo dos lagos e reservatórios.
Potamologia - trata do estudo dos arroios e rios.
Glaciologia - é a área da ciência relacionada com a neve e o gelo na natureza;
Hidrogeologia - o campo científico que trata das águas subterrâneas.

A Hidrologia é uma ciência interdisciplinar que tem tido evolução significativa em face aos problemas crescentes, devido a ocupação das bacias, do incremento significativo da utilização da água e do resultante impacto sobre o meio ambiente do globo. Profissionais de diferentes áreas como engenheiros, agrônomos, geólogos, matemáticos, estatísticos, geógrafos, biólogos, entre outros atuam nas diferentes sub-áreas dessa ciência.

A Hidrologia evoluiu de uma ciência preponderantemente descritiva e qualitativa, para uma área de conhecimento onde os métodos quantitativos têm sido explorados através de metodologias matemáticas e estatísticas, melhorando de um lado os resultados e de outro explorando melhor as informações existentes.

No âmbito da utilização de Hidrologia em Recursos Hídricos ou como, as vezes chamada de Engenharia Hidrológica (figura 1.1), a mesma é entendida como a área que estuda o comportamento físico da ocorrência e o aproveitamento da água na bacia hidrográfica, quantificando os recursos hídricos no tempo e no espaço e avaliando o impacto da modificação da bacia hidrográfica sobre o comportamento dos processos hidrológicos. A quantificação da disponibilidade hídrica serve de base para o projeto e planejamento dos recursos hídricos. Alguns exemplos são: produção de energia hidrelétrica, abastecimento de água, navegação, controle de enchentes e impacto ambiental.

No passado, a ocupação do homem na bacia foi realizada com pouco planejamento, tendo como objetivos o mínimo custo e o máximo benefício de seus usuários, sem maior preocupação com a preservação do meio ambiente. Com o crescimento demográfico e da exploração da água, os recursos naturais têm-se deteriorado. Na população, criou-se uma preocupação maior com a quantificação do impacto que a exploração humana provoca na bacia, para que sejam estabelecidas medidas preventivas que minimizem os danos à natureza. Os resultados da ação da população, sobre o meio ambiente, tinham uma visão na escala da bacia hidrográfica nos anos 70, enquanto que atualmente o problema está na escala do globo terrestre, em decorrência dos potenciais efeitos globais da

modificação do clima. A complexidade dos sistemas hídricos cresceu devido à diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos e deterioração da qualidade das águas. Como conseqüência, projetos com múltiplas finalidades tenderam a ser desenvolvidos, além do aumento do interesse público pelo impacto dos aproveitamentos hídricos sobre o meio ambiente. O planejamento da ocupação da bacia hidrográfica , uma necessidade numa sociedade com usos crescentes da água, e que tende a ocupar espaços com riscos de inundação, além de danificar o seu meio.

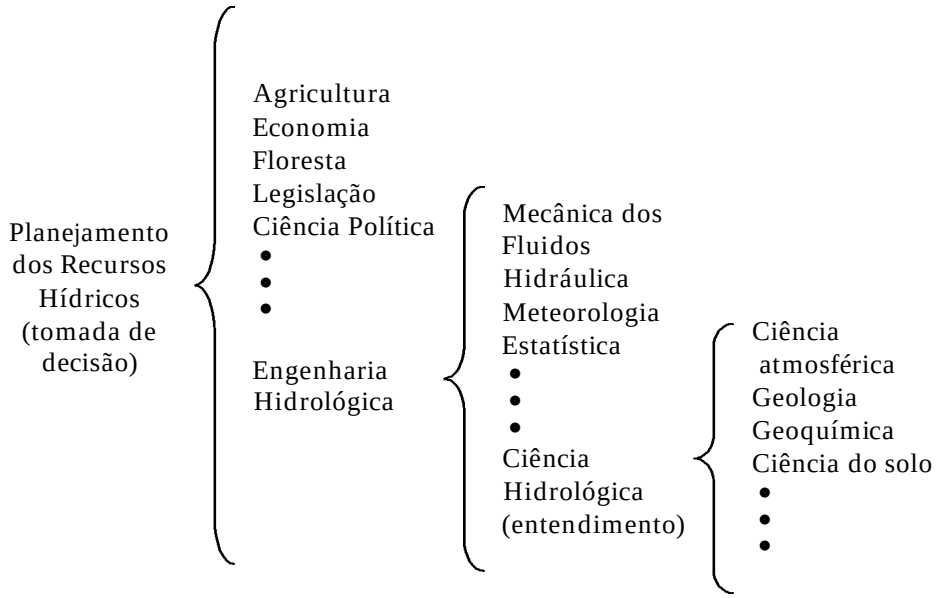

Figura 1.1 Planejamento, previsão e entendimento (NRC, 1991)

A tendência atual envolve desenvolvimento sustentado da bacia hidrográfica, que implica o aproveitamento racional dos recursos com o mínimo dano ao ambiente.

A Ciência Hidrológica trata processos que ocorrem em sistemas moldados pela natureza. Os processos físicos ocorrem num meio que o homem não projetou, mas ao qual deve-se adaptar, procurando conviver com o comportamento deste meio ambiente. Para o entendimento desses processos é necessário interagir com diferentes áreas do conhecimento que influenciam o ciclo hidrológico (figura 1.1)

NRC(1991) concluiu que o desenvolvimento da ciência hidrológica tem sido influenciado por aspectos específicos do uso da água, como atendimento da demanda de água e controle de desastres. A comissão menciona a necessidade de instruir-se profissionais com formação mais ampla, que englobe conhecimentos de matem tica, física, química, biologia e geociência, para desenvolver uma ciência dentro de um contexto mais amplo.

1.2 Histórico

A Hidrologia , uma ciência que se baseia na observação dos processos envolvidos no meio físico natural. Para analisar a sazonalidade da ocorrência de precipitações, num determinado local, utilizam-se observações realizadas no passado, uma vez que os fenômenos provocadores dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica são os eventos meteorológicos, cuja previsão a médio e longo prazos, o conhecimento atual ainda não dispõe de explicações determinísticas

suficientes.

O homem, desde a sua origem, convive com as condições naturais do planeta, tanto no seu uso como na sua sobrevivência. Filósofos gregos tentaram erroneamente explicar o ciclo hidrológico, apenas Marcus Vitruvius Pollio 100 a.C. apresentou conceitos próximos do entendimento atual do ciclo hidrológico. Admitia-se que o mar alimentava os rios através do subsolo. Até no início deste século ainda existiam pessoas que questionavam o conceito moderno do ciclo hidrológico.

Mesmo não conhecendo a origem da água e o funcionamento dos fenômenos naturais, as civilizações antigas puderam explorar os recursos hídricos através de projetos de irrigação como os do Egito e Mesopotâmia, aquedutos para abastecimento de água romanos e irrigação e controle de inundação pelos chineses.

Somente a partir do século 15, com Leonardo da Vinci e Bernard Palissy o ciclo hidrológico passou a ser melhor compreendido. A dificuldade era aceitar que a precipitação tinha um volume maior que a vazão e que os rios são mantidos perenes pelo retardamento do escoamento do subsolo. Pierre Perrault, no século 17 (1608-1680), analisou os componentes da relação precipitação-vazão, ou seja a precipitação, evaporação e capilaridade da bacia do rio Sena e comparou estas grandezas com medições de vazão realizadas por Edm, Mariotte, constatando que a vazão era apenas cerca de 16% da precipitação.

No século 19 inicia-se de um lado as medições sistemáticas de precipitação e vazão e de outro o desenvolvimento teórico e experimental da hidráulica. Nos Estados Unidos a coleta sistemática de precipitação iniciou em 1819, enquanto que a de vazões iniciou em 1888. No Brasil os postos mais antigos de precipitação são do final do século passado, enquanto que a coleta de dados de níveis e vazão iniciou no começo deste século.

Até a década de 30 a Hidrologia tinha como base elementos descritivos do funcionamento dos fenômenos naturais e fórmulas empíricas de processos específicos, tais como as equações de Chezy, para movimento uniforme em canais, e o método racional para cálculo de vazão máxima em pequenas bacias. Essa década marcou o início da hidrologia quantitativa com os trabalhos de Sherman em 1932, que apresentou os conceitos do hidrograma unitário utilizado para o escoamento superficial; Horton em 1933 apresentou uma equação empírica para o cálculo da infiltração, permitindo a determinação da precipitação efetiva; e Theiss em 1935 desenvolveu uma teoria para a hidráulica de poços. Outros métodos quantitativos foram apresentados a partir desta época, permitindo a ampliação considerável dos conhecimentos nessa ciência. Apesar da grande quantidade de dados coletados diariamente, os métodos utilizados na Hidrologia até a década de 50, praticamente limitavam-se à indicadores estatísticos dos processos envolvidos. Com o advento do computador, aprimoramento e experimentação das técnicas numéricas e estatísticas, houve desenvolvimento acelerado de algumas sub-áreas da Hidrologia. Os modelos semiconceituais de transformação precipitaçãovazão agregaram o conhecimento de diferentes processos na bacia hidrográfica para, numa macroanálise, simular matematicamente essa parte do ciclo hidrológico. Os primeiros modelos foram apresentados por Mero (citado por Clarke, 1973) e SSARR (Rockwood, 1958) aplicados no rio Columbia. A Hidrologia Estatística, que teve impulso no começo do século com o estudo da freqüência de cheias, desenvolveu-se depois com a quantificação de séries temporais (Hidrologia Estocástica) para dimensionamento de reservatórios.

Outros aspectos da Hidrologia tais como: o escoamento subterrâneo, fluxo em rios, lagos e estuários desenvolveram-se com a observação e quantificação das variáveis envolvidas, aprimoramento de técnicas matemáticas e o aumento da capacidade do computador.

Quanto à Hidrologia Experimental, foram criados em diferentes países, bacias

representativas e experimentais visando ao entendimento e quantificação de processos físicos que ocorrem na bacia, tais como reflorestamento e desmatamento, erosão do solo e escoamento superficial. Os estudos visam a um melhor entendimento desses processos e a embasar o planejamento do uso da bacia hidrográfica.

O desenvolvimento na hidrologia moderna está ligado ao uso da água, ao controle da ação da mesma sobre a população e ao impacto sobre a bacia e o globo terrestre.

1.3 Ciência hidrológica

Dooge (1988) caracteriza que a Hidrologia Científica está dentro do contexto do desenvolvimento clássico do conhecimento científico, enquanto que a Hidrologia Aplicada estuda os diferentes fatores relevantes ao provimento de água para a saúde e para a produção de comida no mundo.

A Hidrologia é uma ciência que se consolidou apenas na segunda parte do século 20, através do desenvolvimento de programas de observação e quantificação sistemática dos diferentes processos que ocorrem no ciclo hidrológico. A subdivisão apresentada na introdução se expandiu, surgindo sub- áreas mais especializadas, como resultado da necessidade crescente da utilização e preservação da bacia hidrográfica. Algumas das sub-áreas que tratam da análise dos processos físicos que ocorrem na bacia são:

Hidrometeorologia: já definido anteriormente na introdução;

Geomorfologia: trata da análise quantitativa das características do relevo de bacias hidrográficas e sua associação com o escoamento;

Escoamento superficial: trata do escoamento sobre a superfície da bacia;
Interceptação vegetal: é a sub-área do conhecimento que avalia a interceptação de precipitação pela cobertura vegetal na bacia hidrográfica;

Infiltração e escoamento em meio não-saturado: trata da observação e previsão da infiltração no solo e do escoamento no solo não-saturado;

Escoamento em meio saturado: envolve o estudo do comportamento do fluxo em aqüíferos, camada do subsolo saturada;

Escoamento em rios e canais: trata da análise do escoamento em rios, canais e reservatórios;

Evaporação e evapotranspiração: trata da avaliação da perda de água por evaporação de superfícies livres como reservatórios e lagos, evapotranspiração de culturas e da vegetação natural;

Fluxo dinâmico em reservatórios, lagos e estuários: trata do escoamento turbulento em meios multidimensionais;

Produção e transporte de sedimentos: trata da quantificação da erosão de solo e do transporte de sedimento, na superfície da bacia e nos rios, devido às condições naturais e do uso do solo;

Qualidade da água e meio ambiente: trata da quantificação de parâmetros físicos,

químicos e biológicos da água e sua interação com os seus usos na avaliação do meio ambiente aquático.

A Hidrologia como ciência está voltada para a representação dos processos físicos que ocorrem na bacia hidrogr fica. Em diferentes partes do mundo foram equipadas bacias representativas e experimentais que permitem observar em detalhe o comportamento dos diferentes processos. Com base no registro das variáveis hidrológicas envolvidas é possível entender melhor os fenômenos e procurar representá-los matematicamente.

Dooge (1988) ressalta que a caracterização dos processos hidrológicos tem sido desenvolvida para a microescala (10 a 10 m), enquanto que para a mesoescala (10 a 10 m) e macroescala (10 a 10m) existem muitas dificuldades, principalmente na transferência da teoria usada de uma escala para outra.

A representação matemática dos processos evoluiu dentro de dois aspectos principais: o determinístico para os fenômenos físicos que podem ser descritos por equações diferenciais que retratam o comportamento do processo; e o estocástico onde estão envolvidos os aspectos probabilísticos das variáveis.

O National Research Council (Estados Unidos) apresentou um relatório sobre a ciência hidrológica (Eagleson, 1990), onde ressalta o seguinte:

"Para estabelecer a identidade para a Hidrologia como uma ciência separada da Geociência o comitê definiu que a ciência hidrológica inclui: 1) Processos físicos e químicos do ciclo continental da água em todas as escalas, assim como os processos biológicos que interagem significativamente com o ciclo hidrológico; 2) As características temporais e espaciais do balanço global da água e suas partes no sistema terrestre."

NRC(1991) ressaltou as seguintes prioridades científicas em Hidrologia, sem ordem hierárquica: (a) componentes químicos e biológicos do ciclo hidrológico: envolve o melhor conhecimento dos processos geoquímicos; (b) a escala dos processos dinâmicos: a dificuldade de transferência entre processos que o ocorrem em diferentes escalas; (c) interação entre superfície e atmosfera: a interação entre as variáveis climáticas e as superfícies; (d) conhecimento ao nível global do armazenamento e fluxos de água e energia; (e) efeitos hidrológicos devido a atividades humanas.

1.4 Hidrologia Aplicada

A Hidrologia Aplicada está voltada para os diferentes problemas que envolvem a utilização dos recursos hídricos, preservação do meio ambiente e ocupação da bacia.

No primeiro caso estão envolvidos os aspectos de disponibilidade hídrica, regularização de vazão, planejamento, operação e gerenciamento dos recursos hídricos.

Dentro dessa visão os principais projetos que normalmente são desenvolvidos com a participação significativa do hidrólogo são: aproveitamentos hidrelétricos, abastecimento d'água, irrigação e regularização para navegação.

Quanto à preservação do meio ambiente, modificações do uso do solo, regularização para controle de qualidade da água, impacto das obras hidráulicas sobre o meio ambiente aquático e terrestre, são exemplos de problemas que envolvem aspectos multidisciplinares em que a hidrologia tem uma parcela importante.

A ocupação da bacia pela população gera duas preocupações distintas: a) o impacto do meio sobre a população através das enchentes; e b) o impacto do homem sobre a bacia, mencionado na preservação do meio ambiente.

A ação do homem no planejamento e desenvolvimento da ocupação do espaço na Terra, requer cada vez mais uma visão ampla sobre as necessidades da população, os recursos terrestres e aquáticos disponíveis e o conhecimento sobre o comportamento dos processos naturais na bacia, para racionalmente compatibilizar necessidades crescentes com recursos limitados.

No Brasil algumas das principais áreas do desenvolvimento da Hidrologia Aplicada encontram-se nos seguintes aspectos:

Planejamento e gerenciamento da bacia hidrográfica: o desenvolvimento das principais bacias quanto ao planejamento e controle do uso dos recursos naturais requer uma ação pública e privada coordenada;

Drenagem urbana: atualmente 75% da população do Brasil ocupa o espaço urbano. Enchentes, produção de sedimentos e qualidade da água são problemas s,rios encontrados em grande parte das cidades brasileiras;

Energia: a produção de energia hidrelétrica representa 92% de toda a energia produzida no país. O potencial hidrelétrico ainda existente é significativo. Esta energia depende da disponibilidade de água, da sua regularização por obras hidráulicas e o impacto das mesmas sobre o meio ambiente;

O uso do solo rural: a expansão das fronteiras agrícolas e o intenso uso agrícola têm gerado impacto significativos na produção de sedimentos e nutrientes nas bacias rurais, resultando em perda de solo fértil e assoreamento dos rios;

Qualidade da água: o meio ambiente aquático (oceanos, rios, lagos, reservatórios e aqüíferos) sofre com a falta de tratamento dos despejos domésticos e industriais e de cargas de pesticidas de uso agrícola;

Abastecimento de água: a disponibilidade de água, que apesar de farta em grande parte do país, apresenta limitações nas regiões áridas e semi-áridas do nordeste brasileiro. A redução da qualidade da água dos rios e as grandes concentrações urbanas têm apresentado limitações quanto à disponibilidade de água para o abastecimento;

Irrigação: a produção agrícola nas regiões áridas e semi- á ridas depende essencialmente da disponibilidade de água. No sul, culturas como o arroz utilizam quantidade significativa de água. O aumento da produtividade passa pelo aumento da irrigaçÃo em grande parte do país;

Navegação: a navegação interior é ainda pequena, mas com grande potencial de transporte, principalmente nos rios Jacuí, Tietê / Paraná, São Francisco e na Amazônia. A navegação pode ter um peso significativo no desenvolvimento nacional. Os principais aspectos hidrológicos são: disponibilidade hídrica para calado, previsão de níveis e planejamento e operação de obras hidr áulicas para navegação.

2. Conceitos hidrológicos

2.1 Ciclo Hidrológico Global e seus Componentes

O ciclo da água no globo é acionado pela energia solar. Esse ciclo retira água dos oceanos através da evaporação da superfície do mar e da superfície terrestre. Anualmente cerca de 5,5 $.10^5$ km^3 de água é evaporada, utilizando 36% de toda a energia solar absorvida pela Terra, cerca de 1,4 . 10^{24} Joules por ano (IGBP, 1993). Essa água entra no sistema de circulação geral da atmosfera que depende das diferenças de absorção de energia (transformação em calor) e da reflectância entre os trópicos e as regiões de maior latitude, como as áreas polares. Em média, cerca de 5. 10^9 MW é transportado dos trópicos para as regiões polares em cada hemisfério.

O sistema de circulação da atmosfera é extremamente dinâmico e não-linear, dificultando sua previsão quantitativa. Esse sistema cria condições de precipitação pelo resfriamento do ar úmido que formam as nuvens gerando precipitação na forma de chuva e neve (entre outros) sobre os mares e superfície terrestre. A água evaporada se mantém na atmosfera, em média apenas 10 dias.

O fluxo sobre a superfície terrestre é positivo (precipitação menos evaporação), resultando nas vazões dos rios em direção aos oceanos. O fluxo vertical dos oceanos é negativo, com maior evaporação que precipitação. O volume evaporado adicional se desloca para os continentes através do sistema de circulação da atmosfera e precipita, fechando o ciclo. Os número médios aproximados desse ciclo podem ser observado na figura 2.1. Em média, a água importada dos oceanos é reciclada cerca de 2,7 vezes sobre a terra através do processo precipitação-evaporação, antes de escoar de volta para os oceanos (IGBP,1993).

Esse ciclo utiliza a dinâmica da atmosfera e os grandes reservatórios de água, que são os oceanos (1.350 10^5 m^3), as geleiras (25 10^5 m^3) e os aqüíferos (8,4 10^5 m^3). Os rios e lagos, biosfera e atmosfera possuem volumes insignificantes se comparados com os acima.

2.2 Descrição dos processos hidrológicos na bacia

Os processos hidrológicos na bacia hidrográfica possuem duas direções predominantes de fluxo na bacia: vertical e o longitudinal. O vertical é representado pelos processos de precipitação e evapotranspiração e o longitudinal pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do sub-solo (escoamento subterrâneo), observe a figura 2.2.

O balanço de volumes na bacia depende inicialmente dos **processos verticais**. Na figura 2.3 pode-se observar que, da radiação solar que atinge a superfície da terra, parte é refletida e parte é absorvida. A proporção entre a energia refletida e a total é o albedo, que depende do tipo de superfície. Por exemplo, o albedo de uma superfície líquida é da ordem de 5-7%, enquanto que de uma superfície como uma floresta tropical é cerca de 12%, para pasto e uso agrícola, está entre 15 e 20% (Bruijnzeel,1990). O albedo também varia sazonalmente ao longo do ano e dentro do dia.

A vegetação tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água. A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação; quanto maior for a superfície de folhagem, maior a área de retenção da água durante a precipitação. Esse volume retido é evaporado assim que houver capacidade potencial de evaporação. Quando esse volume, retido pelas plantas, é totalmente evaporado, as plantas passam a perder umidade para o ambiente através da transpiração. A planta retira essa umidade do solo

através das suas raízes. A evapotranspiração (evaporação + transpiração) de florestas tropicais que raramente têm déficit de umidade do solo, é, em média, 1.415 mm (1.310-1500). Esse valor pode cair para 900 mm se houver períodos de déficit hídrico (Bruijnzeel,1990). A transpiração em florestas tropicais é da ordem de 70% desses valores.

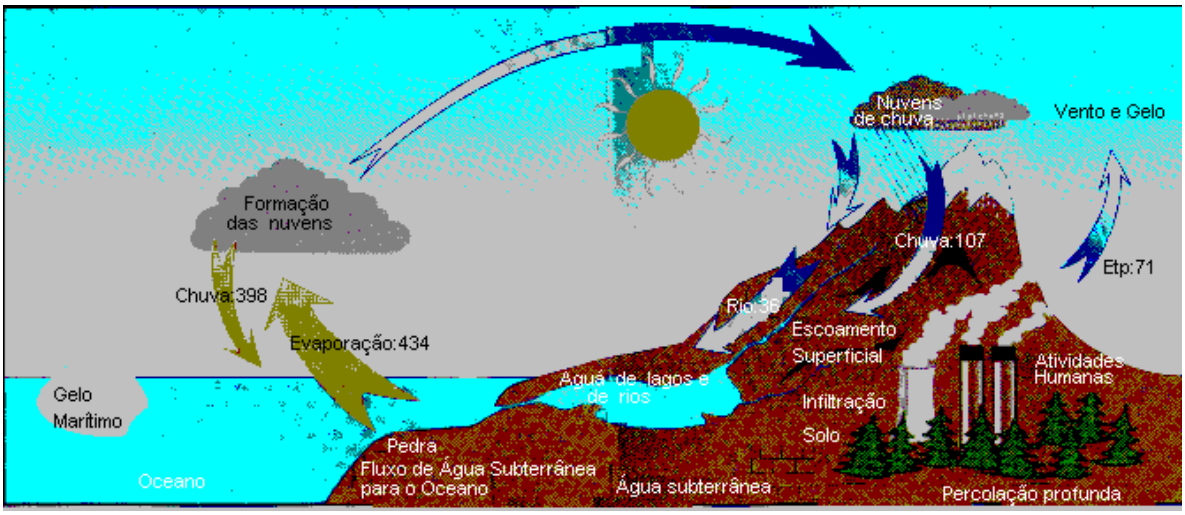

Figura 2.1 Ciclo Hidrológico Global (GRDC,1996)

A precipitação atinge o solo por (figura 2.4): (i) atravessando a vegetação da floresta (em média 85% da precipitação incidente) ou; (ii) através dos troncos (1 a 2% da precipitação). A diferença é a interceptação. Na Reserva Duke em Manaus 8,9% da precipitação é interceptada pela vegetação, enquanto que na Reserva Jarú a interceptação é de 12,4% e na Reserva da Vale do Rio Doce 13%, sendo 65% no período seco e 1% no período úmido.

Da parcela de precipitação que atinge o solo a mesma pode infiltrar ou escoar superficialmente dependendo da capacidade do solo em infiltrar. Essa capacidade depende de condições variáveis, como a quantidade de umidade já existente, das características do solo e da sua cobertura. A água que infiltra, pode percolar para o aqüífero ou gerar um escoamento sub-superficial ao longo dos canais internos do solo, até a superfície ou um curso d'água. A água que percola até o aqüífero é armazenada e transportada até os rios, criando condições para manter os rios perenes nos períodos de longa estiagem. Em bacias onde a capacidade da água subterrânea é pequena, com grandes afloramentos de rochas e alta evaporação, os rios não são perenes, como na região de cristalino do Nordeste.

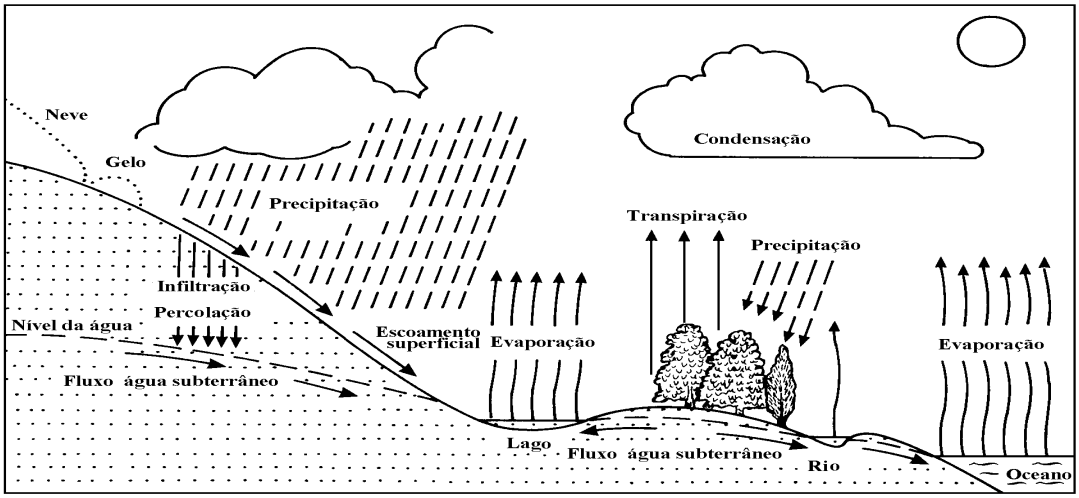

Figura 2.2 Ciclo hidrológico terrestre (IGBP, 1993)

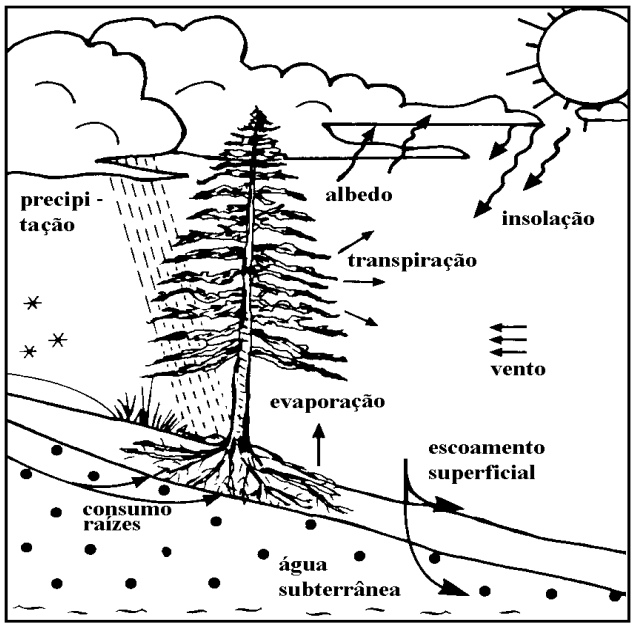

Figura 2.3 Processos na bacia (IGBP, 1993)

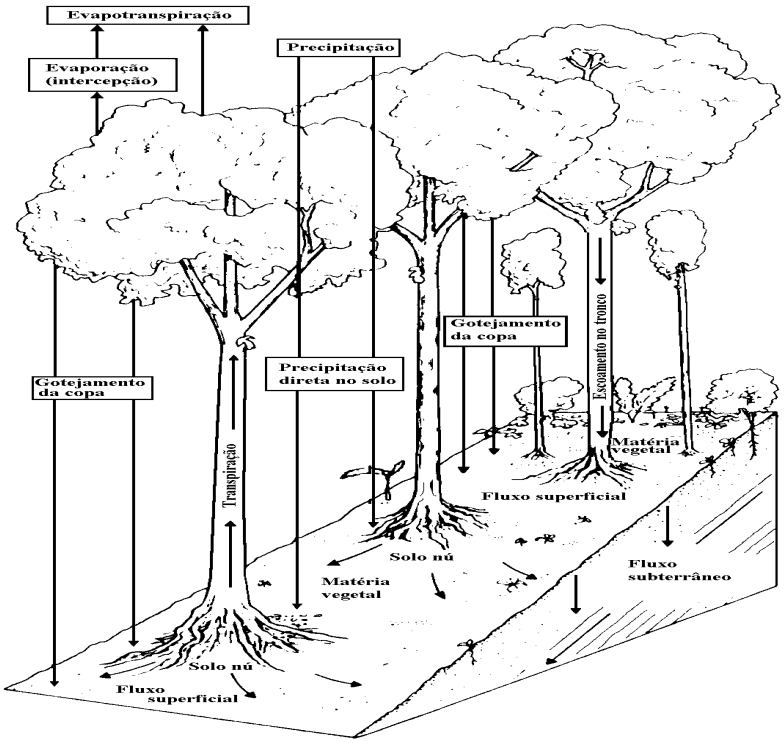

Figura 2.4 Processos de Interceptação vegetal na bacia (Bruijnzeel,1990).

A capacidade de infiltração depende do tipo e do uso do solo. Normalmente, a capacidade de infiltração de solos com floresta são altos (Pritchett, 1979), o que produz pequena quantidade de escoamento superficial. Para solos com superfície desprotegida

que sofre a ação de compactação, a capacidade de infiltração pode diminuir dramaticamente, resultando em maior escoamento superficial. Por exemplo, estradas, caminhos percorridos pelo gado sofrem forte compactação que reduzem a capacidade de infiltração, enquanto o uso de maquinário agrícola para revolver o solo durante o plantio pode aumentar a infiltração. De outro lado, essa mesma capacidade de infiltração varia com o tipo de solo e com suas condições de umidade. Um solo argiloso pode ter uma alta capacidade de infiltração quando estiver seco, no entanto, após receber umidade pode se tornar quase que impermeável.

Como pode ser observado na figura 2.2, existe uma camada do solo não saturada, onde ocorre infiltração e percolação e outra saturada onde ocorre armazenamento e escoamento subterrâneo. Na camada não-saturada podem existir condições de escoamento que depende da vários fatores físicos. Na figura 2.5a pode-se observar o escoamento dito "Hortoniano", onde o escoamento superficial é gerado em toda superfície (para capacidade de infiltração menor que a precipitação) e o escoamento sub-superficial escoa até o rio. No entanto, existem áreas onde praticamente não ocorre escoamento superficial (figura 2.5b), toda a precipitação se infiltra, tendo um significativo escoamento sub-superficial que é transportado através de macroporos, que pode aparecer na superfície através de fontes, produzindo escoamento superficial em conjunto com a precipitação local.

O escoamento superficial converge para os rios que formam a drenagem principal das bacias hidrográficas. O escoamento em rios depende de várias características físicas tais como a declividade, rugosidade, seção de escoamento e obstruções ao fluxo. Os rios tendem a moldar dois leitos, o leito menor, onde escoa na maior parte do ano e o leito maior, que o rio ocupa durante algumas enchentes. Quando o leito não é rochoso, as enchentes que ocorrem ao longo dos anos geralmente moldam um leito menor de acordo com a freqüência das vazões. O tempo de retorno da cota correspondente a definição do leito menor está entre 1,5 e 2 anos.

Como se observa dessa breve descrição, a interface entre solo-vegetação-atmosfera têm um forte influência no ciclo hidrológico. Associados aos processos naturais, já complexos, existe também a inferência humana que age sobre esse sistema natural.

A maior dificuldade em melhor representar os processos hidrológicos, nas interfaces mencionadas é a grande heterogeneidade dos sistemas envolvidos, ou seja a grande variabilidade do solo e cobertura vegetal, além da própria ação do homem.

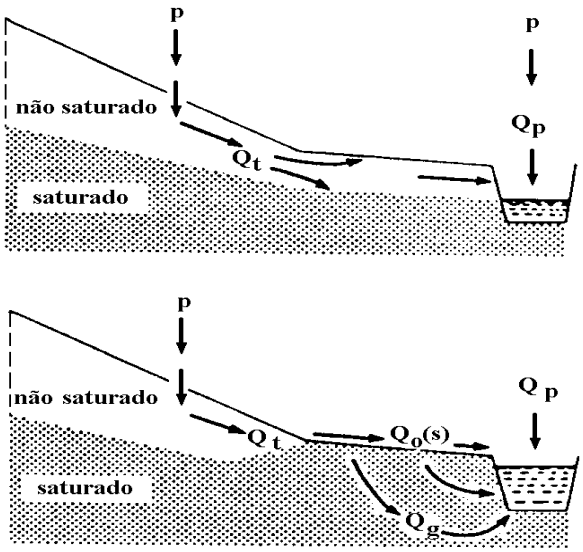

Figura 2.5 Escoamentos na bacia: (a) escoamento hortoniano; (b) áreas de saturação (Bruijnzeel,1990).

2.3 Bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica é caracterizada com relação a uma seção do rio principal. Considerando esta seção, a área que contribui por gravidade para o rio principal ou seus afluentes que escoem para a seção principal é definida pela bacia hidrográfica da mesma (figura 2.6). Esta área é definida pela topografia da superfície, no entanto, a geologia do sub-solo pode fazer com que parte do escoamento escoe para fora da área delimitada superficialmente. Esta diferença pode ser significativa para bacias pequenas e para formações geológicas específicas como o Karst.

As características principais da bacia hidrográfica são a área de drenagem, comprimento do rio principal, declividade do rio e declividade da bacia.

Os rios geralmente possuem um trecho superior, com características de Planalto onde a declividade não é muito grande, a seguir e observa-se um trecho médio de grande declividade e no seu trecho inferior a declividade é pequena onde o rio tende a meandrar.

2.4 Variáveis hidrológicas e terminologia

Probabilidade e tempo de retorno

Probabilidade: Utilizando os dados históricos de vazões ou níveis num determinado local é estimada a **probabilidade de que um determinado nível ou vazão seja igualado ou superado num ano qualquer.** ***O tempo de retorno*** é o inverso dessa probabilidade

$$T = 1 / P$$

onde T é o tempo de retorno e P é probabilidade.

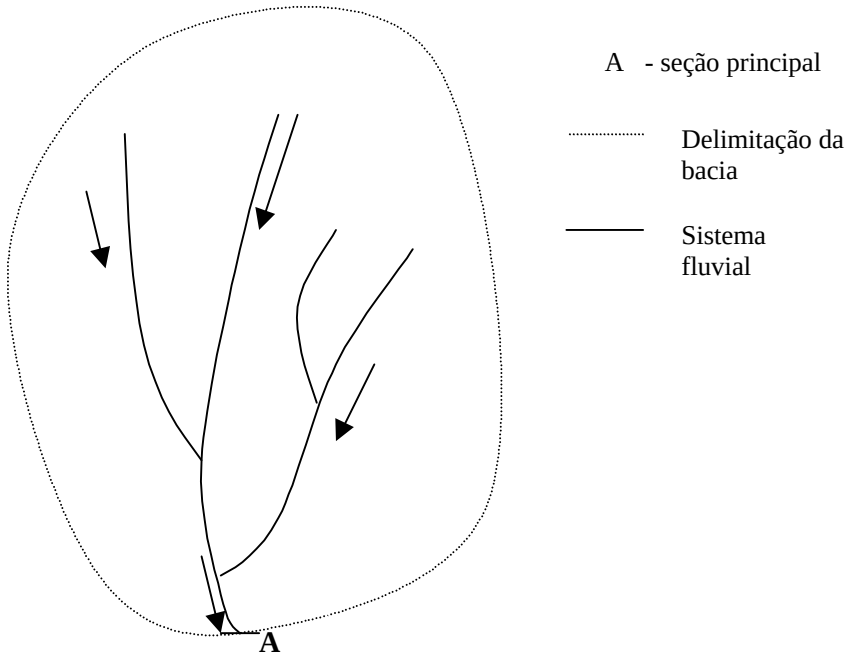

Figura 2.6 Bacia hidrográfica

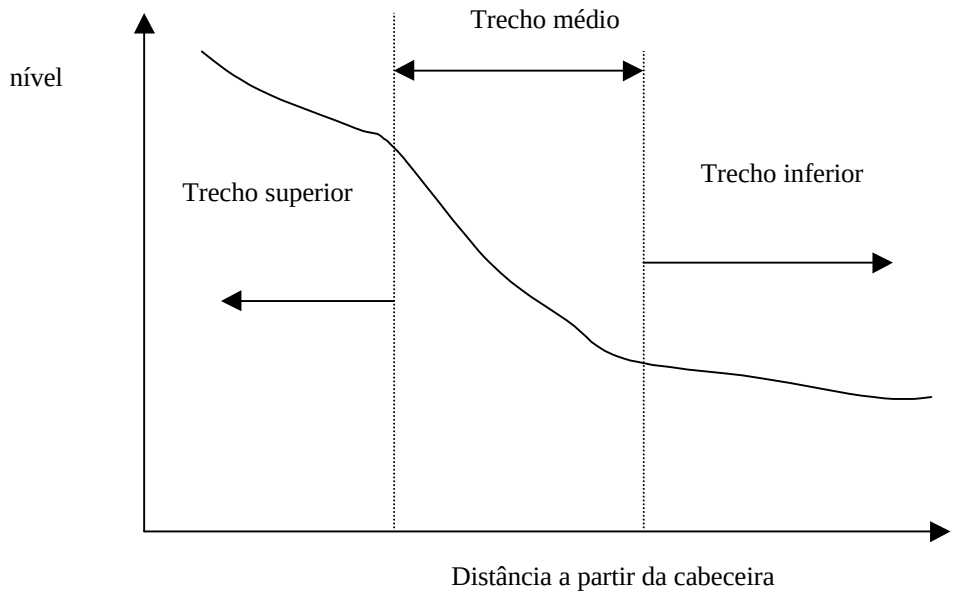

Figura 2.7 Declividade

Para exemplificar, considere um *dado*, que tem seis faces (números 1 a 6). Numa jogada qualquer a probabilidade de sair o número 4 é P=1/6 (1 chance em seis possibilidades). O tempo de retorno é, *em média*, o número de jogadas que o número desejado se repete. Nesse caso, usando a equação acima fica T = 1/(1/6)=6. Portanto, **em média**, o número 4 se repete a cada seis jogadas. Sabe-se que esse número não ocorre exatamente a cada seis jogadas, mas se jogarmos milhares de vezes e tirarmos a média, certamente isso ocorrerá. Sendo assim, o número 4 pode ocorrer duas vezes seguidas e passar muitas sem ocorrer, mas na média se repetirá em seis jogadas.

Fazendo uma analogia, cada jogada do *dado* é um ano para as enchentes. O tempo de retorno de 10 anos significa que, **em média**, a cheia pode se repetir a cada 10 anos ou em cada ano tem 10% de chance de ocorrer.

A outra probabilidade desejada é a seguinte: Qual a chance da cheia de 10 anos ocorrer nos próximos 5 anos? ou seja deseja-se conhecer qual a probabilidade de ocorrência para um período e não apenas para um ano qualquer. A equação para essa estimativa é a seguinte:

$$Pn = 1 - (1 - 1/T)^n$$

onde n é o número de anos onde se deseja a probabilidade; Pn é a probabilidade desejada. Para a pergunta acima fica:

$$Pn = 1 - (1 - 1/10)^5 = 0{,}41 \text{ ou } 41\%$$

Série Histórica: A probabilidade ou o tempo de retorno é calculado com base na série histórica observada no local.

Para o cálculo da probabilidade, as séries devem ser representativas e homogêneas no tempo. Quando a série é **representativa,** os dados existentes permitem calcular corretamente a probabilidade. Por exemplo, o período de cheia entre 1935 e 1980 em União da Vitória não é muito representativo, porque ocorreram apenas enchentes pequenas e fora desse período, ocorreram algumas maiores.

A série é **homogênea**, quando as alterações na bacia hidrográfica não produzem mudanças significativas no comportamento da mesma e, em conseqüência, nas estatísticas das vazões do rio. Nesse caso, para as maiores enchentes, se não sofrem efeito do reservatório, pode-se dizer que a série de União da Vitória é homogênea. As alterações na bacia de montante não são suficientemente significativas para alterar as condições estatísticas dessas enchentes.

Montante e Jusante

Montante de uma seção de rio se refere ao trecho de onde vem o escoamento (rio acima) e **jusante** é o trecho para onde o fluxo escoa (rio abaixo).

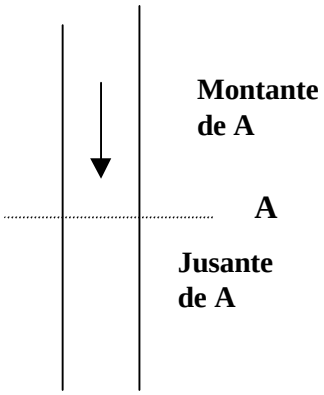

Figura 2.8 Montante e Jusante

Tempo de concentração: é o tempo que uma gota de água leva para escoar superficialmente to ponto mais distante da bacia até a seção principal. É indicador da memória de resposta da bacia.

Características do Rio: As principais características do rio são o nível e profundidade da água, cota do fundo, leitos maior e menor, declividade do rio (veja acima), e vazão**.**

Na figura 2.xx abaixo pode-se observar que o nível de água se refere a altitude da água correspondente a um datum. A profundidade se refere a distância entre a superfície e o fundo do rio. A cota do fundo de uma seção é o seu ponto inferior na seção. O leito menor é a parte do rio onde o mesmo escoa na maioria do tempo (> 95% do tempo) e o leito maior é quando o rio escoa durante as enchentes mais raras. A cota do leito menor se refere ao risco da ordem de 2 a 5 anos de tempo de retorno e o limite do leito maior é definido para um risco da ordem de 100 anos.

A vazão é a quantidade de água que passa na seção por unidade de tempo, normalmente utiliza-se m^3/s ou l/s.

O nível é observado nos rios ao longo do tempo. Para determinar a vazão é necessário estabelecer a relação entre a vazão e o nível. Esta relação é obtida com a medição da vazão e leitura do nível. Para cada par de valores é obtido um valor na curva denominada de *curva-chave* (figura 2.10). Esta curva é obtida pelo ajuste dos pontos. Com base na leitura dos níveis é possível obter a vazão.

Escoamento

Os processos de escoamento num rio, canal ou reservatório, variam com tempo e o espaço (ao longo do seu comprimento). Para dimensionar ou conhecer uma situação limite, muitas vezes admite-se que o escoamento ocorre em regime *permanent*e, ou seja admite-se que não existe variação no tempo.

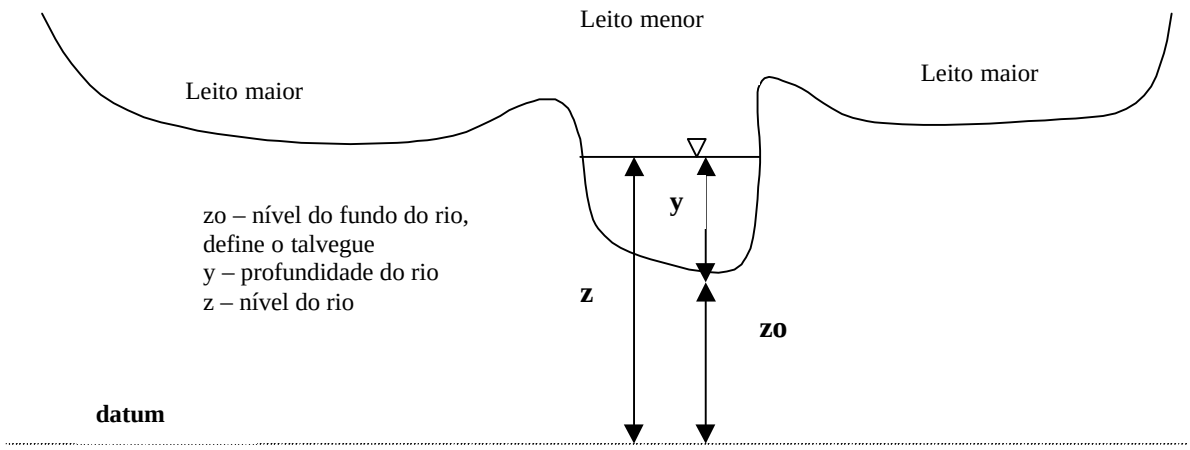

Figura 2.9 seção do rio

O cálculo em regime *não-permanente*, permite conhecer os níveis e vazões ao longo do rio e no tempo, representando a situação real.

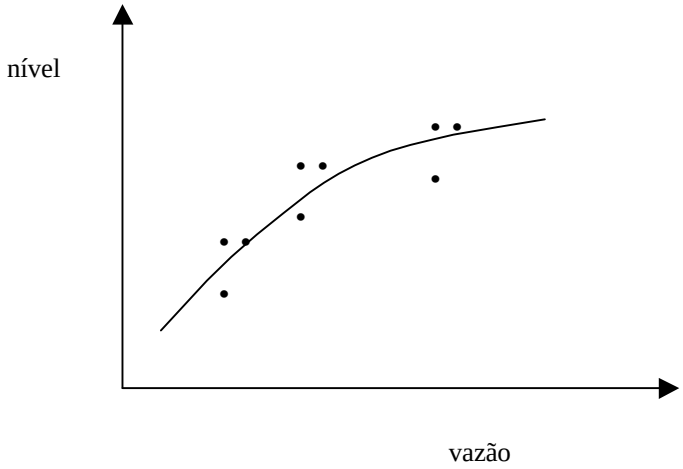

Figura 2.10 Curva - chave

O escoamento num rio depende de vários fatores que podem ser agregados em dois conjuntos:

1. *controles de jusante*: definem a declividade da linha de água. Os controles de jusante podem ser estrangulamentos do rio devido a pontes, aterros, mudança de seção, reservatórios, oceano. Esses controles reduzem a vazão de um rio independentemente da capacidade local de escoamento;

2. *controles locais*: definem a capacidade de cada seção do rio de transportar uma quantidade de água. A capacidade local de escoamento depende da área da seção, da largura, do perímetro e da rugosidade das paredes. Quanto maior a capacidade de escoamento, menor o nível de água.

Para exemplificar esse processo, pode-se usar uma analogia com o tráfego de uma avenida, que as pessoas em geral conhecem bem. A capacidade de tráfego de automóveis de uma avenida, numa determinada velocidade, depende da sua largura e número de faixas. Quando o número de automóveis e superior a sua capacidade o tráfego torna-se lento e ocorre congestionamento. Num rio, a medida que chega um volume de água superior a sua vazão normal, o nível sobe e inunda as áreas ribeirinhas. Portanto, o sistema está limitado nesse caso à capacidade local de transporte de água (ou de automóveis).

Considere, por exemplo o caso de uma avenida que tem uma largura com duas faixas num sentido, mas existe um trecho que as duas faixas se transformam em apenas uma. Existe um trecho de transição, antes de chegar na mudança de faixa que reduz a velocidade de todos os carros, criando um congestionamento, não pela capacidade da avenida naquele ponto, mas pelo o que ocorre no trecho posterior. Nesse caso, a capacidade está limitada pela transição de faixas (que ocorre a jusante) e não pela capacidade local da avenida. Da mesma forma, num rio, se existe uma ponte, aterro ou outra obstrução, a vazão de montante é reduzida pelo represamento de jusante e não pela sua capacidade local. Com a redução da vazão, ocorre aumento dos níveis. Esse efeito é muitas vezes denominado de ***remanso***.

O trecho de transição, que sofre efeito de jusante depende de fatores que variam com o nível, declividade do escoamento e capacidade do escoamento ao longo de todo o trecho.

Hidrograma: é a variação da vazão na seção de saída da bacia hidrográfica, como resposta da bacia hidrográfica, ao longo do tempo devido a precipitação sobre a bacia hidrográfica. Na figura abaixo pode-se observar as características do hidrograma. No período chuvoso o escoamento superficial representa a maior parte do escoamento durante o período chuvoso, esgotando-se rapidamente depois do final da precipitação. O escoamento subterrâneo é o que garante da vazão no rio durante o período de estiagem.

O hidrograma a integração de todos os processos do ciclo hidrológico entre a precipitação e vazão na bacia hidrográfica.

Previsão da Vazão

A previsão das vazões num determinado local pode ser realizada a **curto prazo** (tempo real) ou a **longo prazo.**

A *previsão a curto prazo envolve o acompanhamento da enchente quando a precipitação é conhecida ou prevista*. Nesse processo é utilizado um modelo matemático que calcula a vazão ou nível no rio com base na precipitação conhecida ou prevista.

A previsão da precipitação ainda apresenta grandes erros, mas pode ajudar na determinação da vazão. Essa previsão é realizada com poucas horas ou dias de antecedência, que depende do tempo que leva a água, depois de precipitada, para escoar pela bacia hidrográfica até a seção do rio, onde se deseja a informação.

Como a previsão meteorológica não permite uma determinação da precipitação e da vazão com muita antecedência, a previsão de longo prazo num determinado lugar é estatística, ou seja, é determinada a probabilidade de que ocorra um nível ou vazão com base em dados históricos registrados anteriormente naquele local.

2.5 Comportamento do reservatório e regularização da vazão

O reservatório modifica o escoamento do rio através do

- aumento do nível do rio;

- redução da declividade da linha de água;
- redução da velocidade do escoamento;
- aumento do volume de armazenamento no rio.

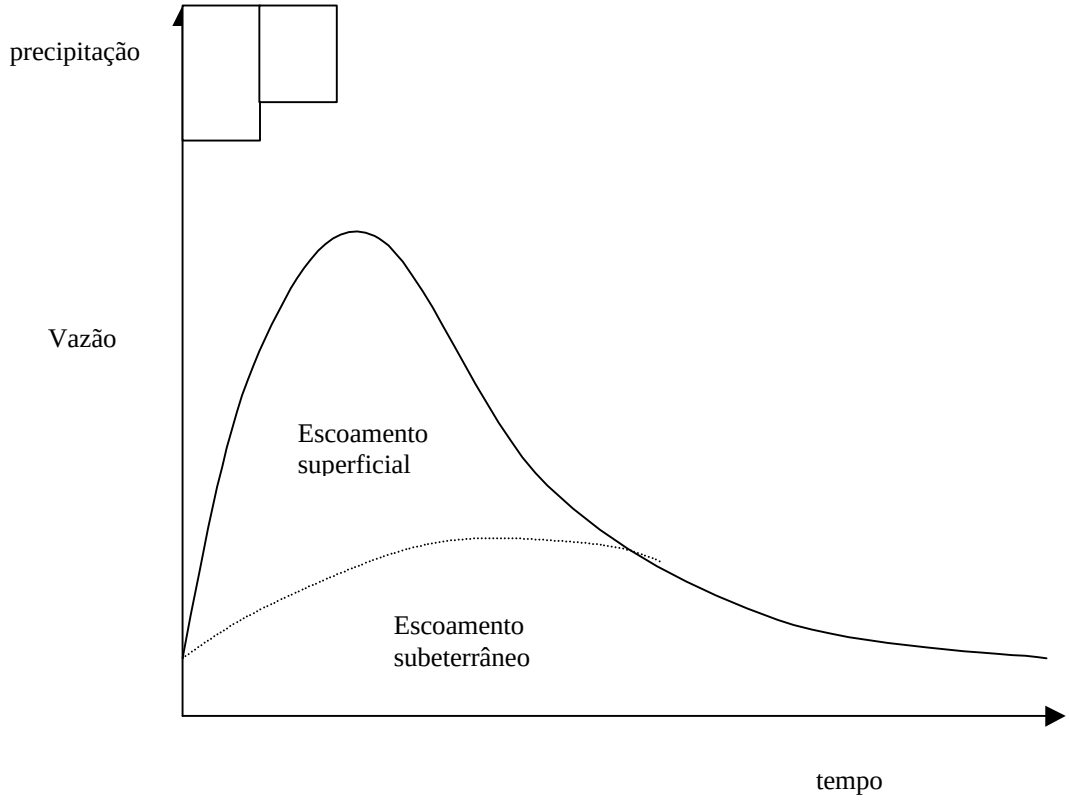

Figura 2.11 Hidrograma

Na figura abaixo pode-se observar o efeito do reservatório no escoamento de um rio. O hidrograma é amortecido e o pico do hidrograma passa a cair sobre a recessão do hidrograma de entrada do reservatório (ou pré-existente). A área da figura existente entre os dois hidrogramas é o volume que o reservatório deve possuir para amortecer o hidrograma. Estas características do hidrograma depende também do dispositivo de saída do mesmo.

Um reservatório geralmente dispõe de dois dispositivos um de *retirada contínua* que geralmente ocorre em cota inferior como as turbinas de produção de energia ou descarga de fundo para atendimento do abastecimento de água, irrigação, manutenção do escoamento a jusante. O outro é um dispositivo de segurança, que é o vertedor da barragem, utilizado para o escoamento das enchentes e garantir que a barragem não será derrubada por níveis de escoamento superiores a o seu paramento.

O vertedor é dimensionado para as maiores inundações prováveis de acordo com o rio e a bacia hidrográfica local. Na figura abaixo pode-se observar o perfil do reservatório e os volumes útil e volume morto. O volume útil é o volume do reservatório que poderá ser utilizado para amortecimento e para atendimento do seu uso. O volume morto é aquele que será enchido com sedimentos da bacia hidrográfica ao longo do tempo e não terá uso.

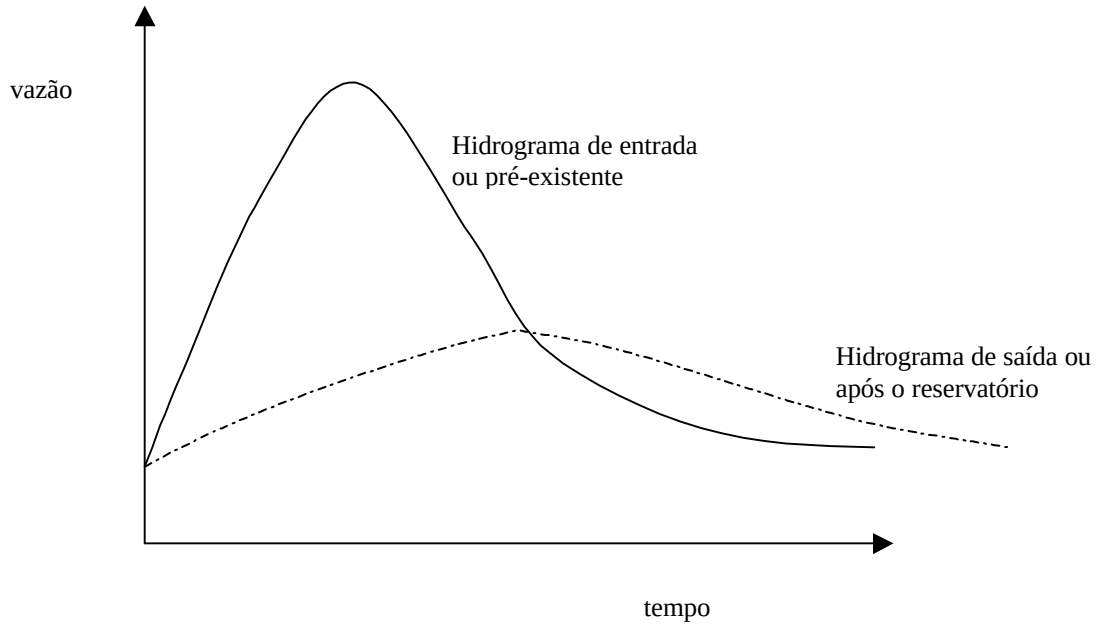

Figura 2. 12 Hidrogramas do reservatório

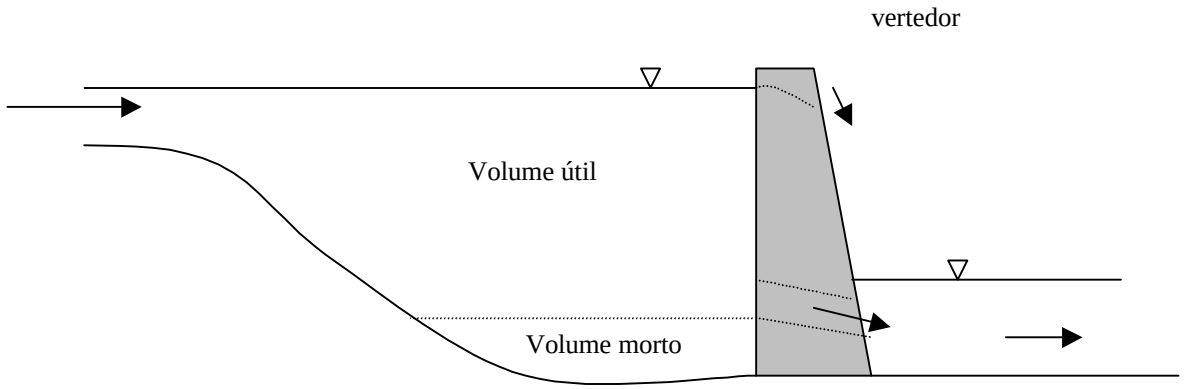

Figura 2.13 Características do reservatório

O reservatório pode ser utilizado para o seguinte:

- regularização da vazão ao longo do tempo para atendimento do abastecimento de água para a população e para irrigação de áreas agrícolas, que são usos consuntivos da água;
- regularização do nível de água para navegação de um rio;
- para regularização da vazão para produção de energia elétrica;
- regularização da vazão para diluição de poluentes e conservação ambiental de um rio
- para o controle de inundações de um rio, reduzindo as inundações.

O controle de inundações geralmente é conflitante com relação aos outros usos porque necessita que o reservatório fique com o nível o baixo possível, enquanto que os

outros usos devem procurar manter o nível o mais alto possível para garantir o atendimento da demanda.

O uso múltiplo de um reservatório para enchentes e para outros usos envolve a definição de um volume de espera. O volume de espera é o volume rebaixado do reservatório para atendimento do amortecimento das enchentes. O restante do volume é utilizado para atendimento do outro uso (abastecimento, energia, etc).

3. Impactos no ciclo hidrológico

A alteração da superfície da bacia tem impactos significativos sobre o escoamento. Esse impacto normalmente é caracterizado quanto ao efeito que provoca no comportamento das enchentes, nas vazões mínimas e na vazão média, além das condições ambientais locais e a jusante.

As alterações sobre o uso e manejo do solo da bacia podem ser classificados quanto ao

- tipo de mudança;
- ao tipo uso da superfície
- a forma de desmatamento.

Na tabela 2.1 são apresentadas as principais classificações. O desmatamento tende a aumentar a vazão média em função da diminuição da evapotranspiração, com aumento das vazões máximas e diminuição das mínimas (existem situações singulares diversas destas). O reflorestamento tende a recuperar as condições atuais existente na superfície e a impermeabilização que está associada a urbanização, além de retirar a superfície altera a capacidade de infiltração da bacia.

Neste capítulo são tratados impactos relativos ao desmatamento e uso agrícola e no capítulo seguinte os impactos devido a urbanização.

Tabela 3.1 Classificação sobre a mudança e uso do solo

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	• desmatamento • reflorestamento • impermeabilização
O uso da superfície	• Urbanização • reflorestamento para exploração sistemática • desmatamento : extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas permanentes
Método de alteração	• queimada • manual • equipamentos

3.1 Desmatamento

O desmatamento é um termo geral para diferentes mudanças de cobertura. Segundo Bruijnzeel (1990) é necessário definir o desmatamento de acordo com o nível de alteração que ocorre na área. Jordan (1985) definiu em pequeno, intermediário e alto, de acordo com o impacto que produz na mata natural. Os principais elementos do desmatamento são: o

tipo de cobertura no qual a floresta é substituída e o procedimento utilizado para o desmatamento.

3.2 Uso da Superfície

Extração seletiva de madeira: A extração de madeira envolve a construção de estrada e retirada por equipamentos de árvores ao longo da floresta natural ou reflorestada. O maior impacto sobre esse sistema envolve a construção de estradas, devido a área envolvida e a capacidade erosiva gerada pela superfície desprotegida.

O plantio de subsistência (*Shifting Cultivation*) esse tipo de uso do solo representa cerca de 35 % de todo o desmatamento de floresta na América Latina (Bruijnzeel, 1990). O desmatamento é realizado manualmente seguido por queimada antes do período chuvoso e depois o plantio sobre as cinzas. Após alguns anos, a produtividade diminui, a área é abandonada e o agricultor se desloca para outra área.

Quando ocorre o desmatamento sobre uma determinada área, que a seguir tende a recuperar a sua cobertura, o impacto sobre o balanço hídrico da área apresenta um comportamento como o apresentado na figura 3.1. Num primeiro estágio ocorre aumento na vazão média, com redução da evapotranspiração, devido a retirada da cobertura. Com o crescimento da vegetação (figura 3.1 chega a cerca de 20 anos) o balanço tende a voltar as condições iniciais devido as recuperação das suas condições prévias.

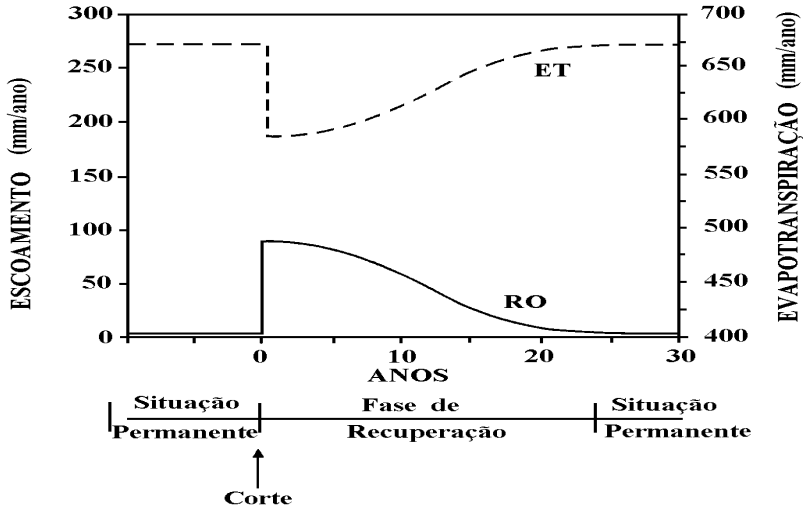

Figura 3.1 Modificações no escoamento e evapotranspiração devido ao desmatamento numa bacia no Sul da África (Vörösmarty et al,1991)

Culturas permanentes: As culturas permanentes são plantações que não sofrem alterações freqüentes na sua estrutura principal, como plantações de café, fruticultura, pasto, entre outros.

Durante o processo de transformação da cobertura, o impacto sobre o escoamento pode ser importante. Após o seu desenvolvimento o balanço hídrico depende do comportamento da cultura e o balanço hídrico tende a se estabelecer num outro patamar.

Os desmatamentos mencionados podem ser considerados de intensidade pequena ou intermediária, de acordo com as condições de alteração de cada caso. No entanto, o impacto é grande quando o desmatamento dá origem a culturas anuais. De acordo, com a figura 3.1 pode-se esperar que o impacto do desmatamento é reduzido com o tempo e volta

para as condições preexistentes, o que não é o caso da alteração para culturas anuais (Bruijnzeel, 1990).

Culturas anuais: As culturas anuais envolvem a mudança da cobertura anualmente ou sazonalmente com diferentes plantios. Esse processo envolve a preparação do solo (aragem) em determinadas épocas do ano, resultando na falta de proteção do solo em épocas que podem ser chuvosas. Normalmente o preparo do solo é realizado antes do período chuvoso, no entanto como o clima da região Sul do Brasil não apresenta uma sazonalidade bem definida, podendo num determinado mês ter uma grande precipitação ou um período seco, o solo pode estar sujeito a energia do impacto de chuvas intensas que tendem a produzir erosão e modificar as condições de infiltração do solo.

O uso do solo para plantio anual, após o desmatamento, depende muito do preparo do solo e dos cuidados com o escoamento gerado. O plantio sem nenhum cuidado com a conservação do solo tende a aumentar consideravelmente a erosão, com grande aumento no escoamento com relação as condições prévias de floresta. Adicionalmente, as estradas e as divisas de propriedades são geradores de alterações do solo devido a erosão e a compactação que se forma.

Atualmente, as práticas geralmente recomendadas para plantio são:

(Conservacionista, que utiliza o terraceamento, que acompanha as curvas de nível, para direcionar o escoamento e evitar a erosão e o dano as culturas. Esse tipo de plantio tende a criar melhores condições para a infiltração, nas chuvas de baixa ou média intensidade, mas quando ocorre o rompimento do terraço nas cheias maiores a água pode provocar ravinamento na direção da maior declividade do escoamento. Essa prática tem sido acompanhada pelo planejamento de microbacia, que retira as divisas das propriedades, organizando o uso do solo de acordo com microbacias e planeja as estradas vicinais.

O **plantio direto** tem sido incentivado. Esse tipo de plantio não revolve a terra e, é realizado diretamente sobre o que restou do plantio anterior. A tendência é de que praticamente toda a água se infiltre, e o escoamento ocorre predominantemente na camada sub-superficial. Esse tipo de plantio pode gerar problemas em áreas com grande declividade, pois o escoamento sub-superficial, ao brotar na superfície, pode gerar erosão regressiva (como o *piping).* Em declividades mais suaves a erosão é reduzido já que o escoamento superficial é mínimo.

O plantio direto produz uma maior regularização sobre o fluxo de estiagem e tende a apresentar também aumento de escoamento médio, se comparado com a floresta, devido a redução da evapotranspiração e interceptação. A tendência é que a substituição da floresta por plantio com prática conservacionista, também apresente aumento do escoamento médio, mas podendo reduzir o escoamento durante as estiagens, dependendo das características do solo e aqüífero.

3.3 Método de Desmatamento

A forma como o desmatamento é realizado influencia as condições de escoamento futuro da bacia. Dias e Nortcliff (1985) encontraram uma importante correlação entre o número de tratores utilizados no desmatamento e o grau de compactação do solo após o desmatamento.

O desmatamento manual é o procedimento mais dispendioso, mas provoca o menor impacto. Lal (1981) mostrou que o aumento do escoamento superficial, utilizando desmatamento manual, uso de tratores de arraste e tratores com lâminas para arado são,

respectivamente, 1%, 6,5% e 12% da precipitação. O efeito da compactação do solo limita-se a profundidades de cerca de 20 cm (Dias e Nortcliff, 1985).

3.4 Métodos de avaliação do Impacto do desmatamento

Segundo McCulloch e Robinson (1993) os estudos experimentais em bacias utilizados para avaliar o impacto das suas modificações físicas podem ser classificado em três grupos principais:

1. **Estudos de correlação**: análise de correlação entre bacias de diferentes características de clima, cobertura, solo e morfologia. Este tipo de procedimento nem sempre permite uma clara estimativa dos processos envolvidos;

2. **Estudos de uma única bacia:** para uma bacia experimental busca-se estabelecer as condições prévias da relação entre a climatologia e o comportamento da bacia. Após a alteração da cobertura e uso do solo, são examinadas nas relações hidrológicas. A maior dificuldade desse procedimento reside na variabilidade climática entre os dois períodos (antes e depois da alteração da cobertura). Um período pode ser seco e o outro úmido, o que dificulta a comparação. No entanto, é possível planejar experimentos sobre os efeitos de desmatamento de modo a eliminar estas diferenças, mas a complexidade aumenta muito;

3. **Estudos experimentais com pares de bacias**: Selecionando duas bacias de características similares. Uma é submetida a alteração do uso do solo, denominada de *experimental* e outra é mantida preservada denominada de bacia de *controle.*

Os primeiros estudos experimentais sobre alteração do uso do solo ocorreram nos Estados Unidos na década de 10. As medidas começaram em 1911 e se desenvolveram por 15 anos, numa bacia onde a maioria da precipitação era devido a neve (Bates e Henry, 1928, apud McCulloch e Robinson, 1993). Depois desse período foram elaborados vários experimentos em diferentes partes do mundo e existem algumas publicações que reuniram de forma sistemática os mesmos. Uma das primeiras foi devido a Hibbert (1967) (apud Bosch e Hewlett,1982), complementado por Bosch e Hewlett (1982). Mais recentemente Bruijnzeel (1990) e Sahin e Hall (1996) atualizaram os artigos anteriores. Esses resultados englobam o efeito dos diferentes tipos de alteração e seus resultados. No entanto, como os objetivos desse trabalho são o de avaliar o impacto sobre o escoamento, os elementos aqui descritos se resumem a esse aspecto.

3.5 Alterações da precipitação devido ao desmatamento

Com a retirada da floresta, os fluxos envolvidos no ciclo hidrológico se alteram, ocorrendo o seguinte:

- aumento do albedo. A floresta absorve maior radiação de onda curta e reflete menos;
- maiores flutuações da temperatura e déficit de tensão de vapor das superfícies das áreas desmatadas,
- o volume evaporado é menor devido a redução da interceptação vegetal pela retirada da vegetação das árvores;

- menor variabilidade da umidade das camadas profundas do solo, já que a floresta pode retirar umidade de profundidades superiores a 3,6 m, enquanto que a vegetação rasteira como pasto age sobre profundidades de cerca de 20 cm.

Com a redução da evaporação, pode-se esperar a um efeito na precipitação, mas o sistema climatológico local depende muito pouco da evaporação da superfície da área. Quando a precipitação local é dependente principalmente dos movimentos de massas de ar globais, o efeito da alteração da cobertura é mínimo. Mooley e Parthasarathy (1983) examinaram a tendência de valores acima ou abaixo da precipitação média, entre os anos 1871 e 1980, para 306 estações na Índia, e não encontraram nenhuma evidência estatística de alteração de tendência, apesar das áreas cobertas pelos postos, terem sofrido grande desmatamento ao longo dos anos mencionados.

Vários ensaios com modelos GCM (Global Climate Models) tem sido realizados sobre o comportamento da Amazônia. Esses modelos tem estudado a hipótese de retirada total da floresta e substituída pelo pasto. Os resultados com esses modelos têm previsto redução de até 50% na evapotranspiração e 20% na precipitação. Isso se deve a grande dependência que a região pode ter do ciclo interno de evaporação e precipitação (Dickinson e Henderson-Sellers, 1988) e também devido as grandes incertezas na modelagem. Segundo Shuttleworth et al (1990) esses resultados devem ser vistos com muito cuidado, ou seja são especulações sobre o comportamento dessa região.

Bruijnzeel (1996) cita a revisão realizada por Meher-Homji(1989) em que menciona vários artigos que buscam mostrar evidências circunstanciais de redução de precipitação associada ao desmatamento. No entanto o autor menciona que nesses estudos não foram realizados estudos estatísticos consistentes. Segundo McCulloch e Robinson (1993) não existe nenhuma evidência de que plantando ou retirando uma floresta afete a precipitação.

3.6 Impacto do desmatamento sobre o escoamento

O efeito do desmatamento sobre o escoamento deve ser separado de acordo com o efeito sobre a : (i) vazão média; (ii) vazão mínima e; (iii) vazões máximas.
Antes de analisar o impacto em cada um das estatísticas do escoamento, é necessário caracterizar os principais aspectos que influenciam as alterações no escoamento, que são os seguintes:

Diferenças de estado de umidade do solo: Na condição em que a bacia está com floresta, a disponibilidade de atendimento da evapotranspiração, depende essencialmente da umidade da solo. Hodnett et al (1995) mostraram que na Amazônia, a variação sazonal da umidade do solo em profundidades superiores a 2 m, é mais acentuada na floresta porque as árvores retiram umidade a profundidades superiores a 3,6 m.

Na figura 3.2, é apresentada a variabilidade de umidade do solo para uma área coberta de floresta e para área desmatada, coberta por vegetação rasteira. Pode-se observar, que a umidade do solo depleciona muito mais quando existe floresta, devido a capacidade da mesma em retirar umidade do solo em profundidades maiores e pela transpiração das plantas.

Climatologia sazonal: A distribuição da precipitação ao longo do ano e sua intensidade, permitem estabelecer se existirá disponibilidade de água para evapotranspirar. Numa região com precipitações concentradas numa parte do ano, por exemplo no período mais frio, tende a evapotranspirar menos porque a evapotranspiração potencial é menor e as diferenças de desmatamento serão menos acentuadas. No entanto, numa região com precipitações distribuídas ao longo do ano e concentradas no verão, a retirada da floresta tende a produzir maior impacto no escoamento, já que no período de maior

evapotranspiração potencial, existe disponibilidade de água tanto na interceptação da vegetação como no solo, que é o caso na bacia incremental do rio Paraná, no estado do Paraná.

Diferenças de elevação: A elevação afeta a evaporação pelas características de incidência solar e velocidade do vento;

Profundidade do solo e declividade do solo: Solos com pequena profundidade, influenciam menos no processo devido a sua pequena capacidade. A declividade maior produz maior drenagem da água, fazendo com que a umidade do solo seja pouco utilizada na regulação dos volumes de evapotranspiração da vegetação. Quando a profundidade do solo é pequena e a declividade grande, a tendência é de que, as diferenças entre um estágio e outro, da cobertura, seja menor.

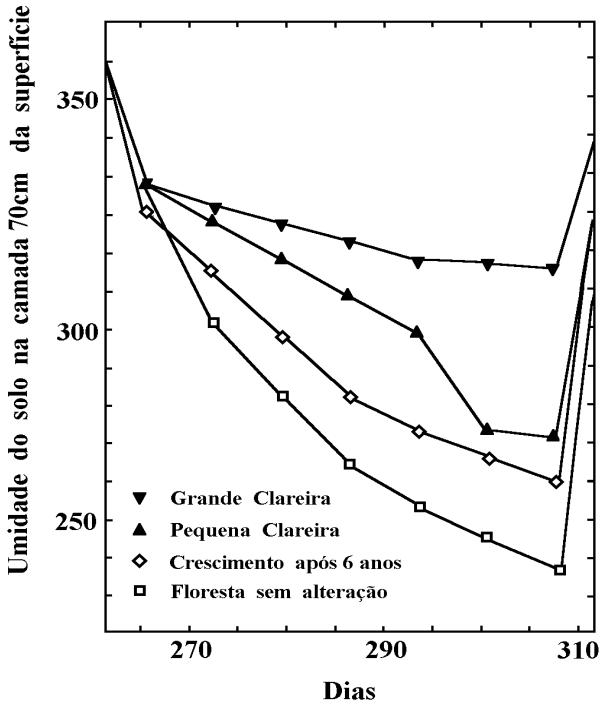

Figura 3.2 Umidade do solo (mm / 70cm) numa floresta sem alterações, com crescimento de 6 anos em clareiras estreitas ou largas durante a temporada seca na Costa Rica (Parker,1985, apud Bruijnzeel, 1996)

Grau de alteração devido ao método de desmatamento: O grau de alteração do solo devido ao método de desmatamento afeta as condições do solo, resultando em maior ou menor escoamento superficial (veja comentários no item 3.1).

O grau de desmatamento da bacia: A área de desmatamento com relação a seção principal e a percentagem de desmatamento, são fatores que obviamente influenciam o escoamento. Quanto mais próximo da seção principal, maior é o efeito observado no escoamento.

A cobertura que substitui a floresta ou a vegetação natural: Quando a vegetação se recupera, após vários anos o escoamento tende a retornar as condições anteriores, no entanto se as mudanças são permanentes para, por exemplo, culturas anuais, o efeito do desmatamento se mantém.

3.6.1 Vazões médias

Inicialmente Hibbert (1967), apud Bosch e Hewlett (1982) avaliaram o resultado de 39 bacias experimentais existentes no mundo e concluíram o seguinte:

- a redução da cobertura de floresta aumenta a vazão média;
- o estabelecimento de cobertura florestal em áreas de vegetação esparsa diminui a vazão média;
- a resposta a mudança é muito variável e, na maioria das vezes, não é possível prever.

Bosch e Hewlett (1982) atualizaram o estudo anterior utilizando 94 bacias, adicionando dados de 55 bacias experimentais. O tamanho médio das bacias experimentais utilizadas para verificar a alteração da vazão média foi de 80 ha, variando entre 1 ha e 2.500 ha. Os autores classificaram os dados em:

- bacias experimentais tratadas em pares (ver item 3 de 3.2) como os que podem produzir melhores resultados já que tem o mesmo tipo de clima na comparação e;
- grupo onde as bacias que não possuem o controle climático, ou seja a comparação não é realizada sobre o mesmo período hidrológico; bacias em que foi observado desmatamento e analisado o seu impacto ou; bacias grandes com experimentos pouco controlados.

Os resultados da análise principalmente do primeiro grupo de dados são resumidos a seguir:

(a) foram confirmadas as duas primeiras conclusões de Hibbert, mas os elementos existentes permitem estimar somente a ordem de magnitude das alterações com base no tipo de vegetação e na precipitação (figura 3.2);

(b) não é possível detectar influência na vazão média quando o desmatamento é menor que 20%;

(c) a retirada de cobertura de coníferas ou eucaliptos causa aumento de cerca de 40 mm na vazão anual para cada 10% de alteração de cobertura, enquanto que a retirada da rasteira produz aumento de 25 e 10 mm na vazão média, respectivamente, para cada 10% de alteração de cobertura. Esses valores são aproximados e devem ser utilizados como indicadores.

Bruijnzeel (1990) atualizou o estudo de Busch e Hewlett acrescentando os dados até a data da publicação. As principais conclusões do autor foram as seguintes:

(a) Confirma as conclusões de Bosch e Hewlett que a retirada da floresta natural resulta em considerável aumento inicial de vazão média (até 800 mm/ano), função da precipitação;

(b) A vazão média, após o crescimento da nova vegetação, pode ficar acima das condições de pré-desmatamento no caso de culturas anuais, vegetação rasteira e

plantação de chá e retornar as condições naturais para pinos e reduzir a vazão para eucaliptos.

O autor comenta o pequeno número de experimentos que mostre a conversão de floresta em culturas anuais, que é o de maior impacto quanto a substituição da cobertura natural. Esse também é o caso mais freqüente da bacia incremental de Itaipu.

Edwards (1979) apresenta os resultados de duas pequenas bacias na Tanzânia, uma com floresta e outra convertida para agricultura tradicional um pouco antes do início das observações. O autor observou um consistente aumento de 400 mm/ano durante os dez anos de observações. As principais características do experimento são: iniciado em 1958; floresta de montanha a 2.500 m; 1 metro de profundidade de solo vulcânico; precipitação de 1.925 mm, 6 meses com precipitação menor que 60 mm; a bacia com floresta tem 16,3 ha de área de drenagem e a bacia agrícola tem 20,2 ha; essa última é uma bacia agrícola com 50% de cultivo e 50% de vegetação rasteira.

Lal (1981) e Lawson et al (1981) apresentaram o resultado de duas bacias experimentais, uma delas subdividida em 12 áreas com diferentes tipos de desmatamento e a outra mantida sem modificação. Essas bacias estão localizadas em Ibadan na Nigéria. Na tabela 3.2 são apresentadas as características das precipitações e as condições de interceptação da bacia florestada. Antes do desmatamento, a bacia produziu, durante 1974 a 1978 apenas 2,5% de escoamento, com relação a precipitação total. Em 1979, com os desmatamentos ocorridos na bacia de 34 ha, o escoamento passou para 23% da precipitação (deve-se considerar a diferença de precipitação entre os anos, que não foi informado nos artigos). Lal (1983) atualizou os resultados apresentados anteriormente, incluindo os dados de 1979 a 1981. Na tabela 3.3 são apresentados os resultados do ano de 1979 e para o período 1979-1981 para as pequenas áreas com diferentes tipos de tratamento do uso do solo, dentro da referida bacia. Pode-se observar que na área que foi mantida com floresta, praticamente não foi registrado escoamento. No entanto, de acordo com o sistema de desmatamento e preparo do solo, a produção de escoamento foi muito maior.

Hsia e Koh (1983) apresentaram os resultados da comparação entre duas bacias experimentais no Taiwan. A bacia mantida desmatada tem 5,86 ha e a bacia mantida nas condições naturais tem 8,39 ha. As mesmas têm cerca de 40% de declividade, com precipitação anual de 2.100 mm (1.100 a 3.400mm). As bacias foram calibradas durante 7 anos. Na figura 3.3 é apresentada a relação de dupla massa entre os valores de escoamento das duas bacias, mostrando claramente o aumento de escoamento e mudança de tendência após o desmatamento. Os autores analisaram o aumento da vazão média sobre dois anos após o desmatamento.

No primeiro ano a precipitação foi de 2.070 mm e no segundo, foi um ano seco com cerca de 1.500 mm. Os aumentos de vazão foram de 450 mm (58%) e 200 mm (51%) respectivamente para os dois anos. Considerando os períodos secos e úmidos o aumento foi de 108% e 193% para a estiagem dos dois anos, enquanto que no período úmido os aumentos foram de 55% e 47%. Na figura 3.4 pode-se observar a comparação entre as duas bacias para os períodos úmido e seco.

Tabela 3.2 Variáveis da área florestada para o ano de 1979 em Ibadan Nigéria (Lawson et al, 1981)

Variáveis	Resultados
Número de cheias	30
Total precipitado (mm)	645,1
Precipitação que atravessou a floresta (mm)	473,0
Água pelos troncos (stemflow) (mm)	64,4
Interceptação (mm)	107,7

Tabela 3.3 Comparação de escoamento anual para diferentes tipos de práticas agrícolas (adaptado de Lal, 1981)

Tipo de desmatamento	Preparo ou tipo de plantio	Área das bacias ha	Escoamento anual mm / ano 1979	1979-1981
floresta sem alteração		16	0	
desmatamento tradicional	plantio direto	2,6	3,0	6,6
limpeza manual	sem preparo do solo	3,1	16,0	16,1
limpeza manual	preparo convencional	3,2	54,0	79,7
trator com lâminas	sem preparo	2,7	86,0	104,8
trator *tree-pusher*	sem preparo	3,2	153,0	170,0
trator *tree-pusher*	preparo convencional	4,0	250,0	330,6

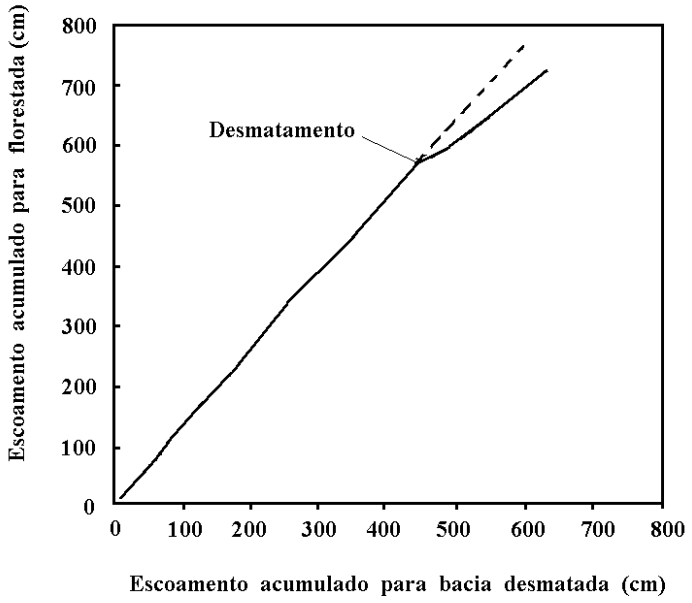

Figura 3.3 Identificação do desmatamento na relação de dupla massa (Hsia e Koh, 1983)

Cornish(1993) apresentou o resultado de aumento da vazão média de 150 a 250 mm no primeiro ano após o desmatamento de eucaliptos de algumas bacias da Austrália. Hornbeck et al (1993) apresentou os resultados de onze bacias no oeste americano, onde o desmatamento de florestas resultou em aumento de 110-250 mm no escoamento no primeiro após o desmatamento. Bruijnzeel (1996) agregou os dados desses experimentos e de outros em diferentes partes do mundo e relacionou com a percentagem de desmatamento (figuras 3.5 e 3.6). A dispersão encontrada indica que outros fatores devem ser levados em conta, além da percentagem de desmatamento, no entanto os resultados são unânimes em mostrar que sempre ocorre aumento da vazão.

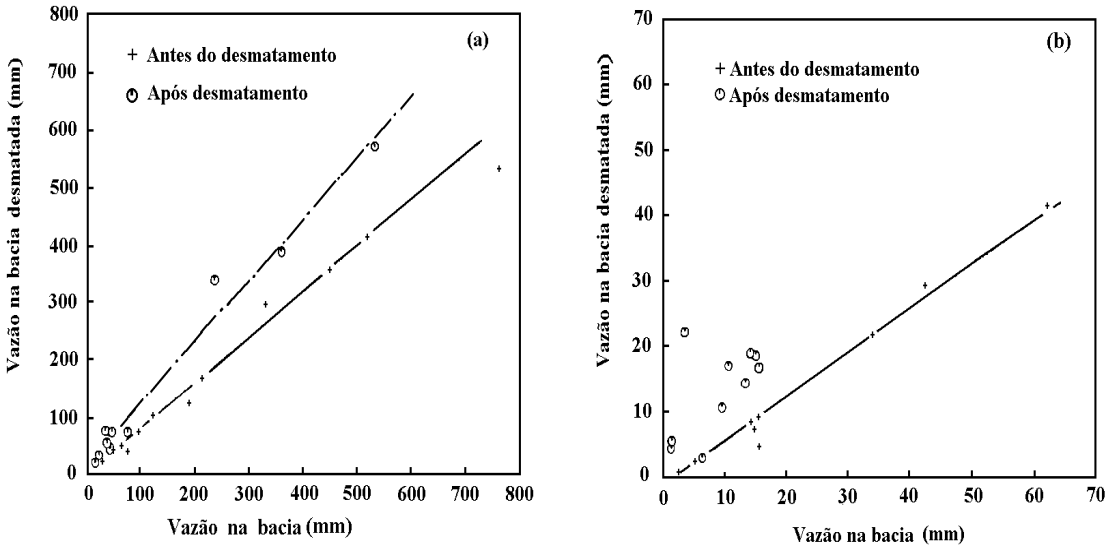

Figura 3.4 Relações entre as vazões na bacia desmatada e na bacia preservada em Taiwan (Hsia e Koh, 1983)

O artigo mais recente de Sahin e Hall (1996) analisaram estatisticamente todos os experimentos disponíveis e resumiu os principais elementos, reproduzidos na tabela 3.4. No anexo A é transcrito o anexo do referido artigo, onde os autores apresentam os principais experimentos (mais consistentes) com todas as suas características. Dos resultados médios, pode-se observar que o desmatamento de florestas com precipitação menor que 1.500 mm tem como conseqüência um aumento médio de 169 mm para retirada de 100% da área, enquanto que para valores maiores que 1.500 mm de precipitação o efeito é de 201 mm.

Na tabela 3.5 são apresentados os aumentos de escoamento permanentes, após o desmatamento de florestas tropicais, de acordo com a cultura mantida.

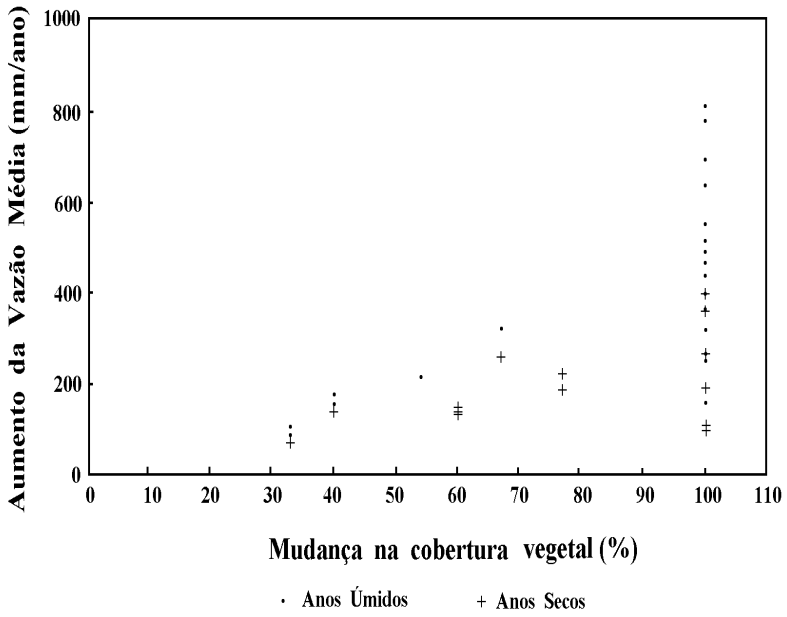

Figura 3.5 Aumento da vazão média (mm/ano) durante os primeiros três anos após o desmatamento versus a percentagem da área desmatada (Bruijnzeel, 1996)

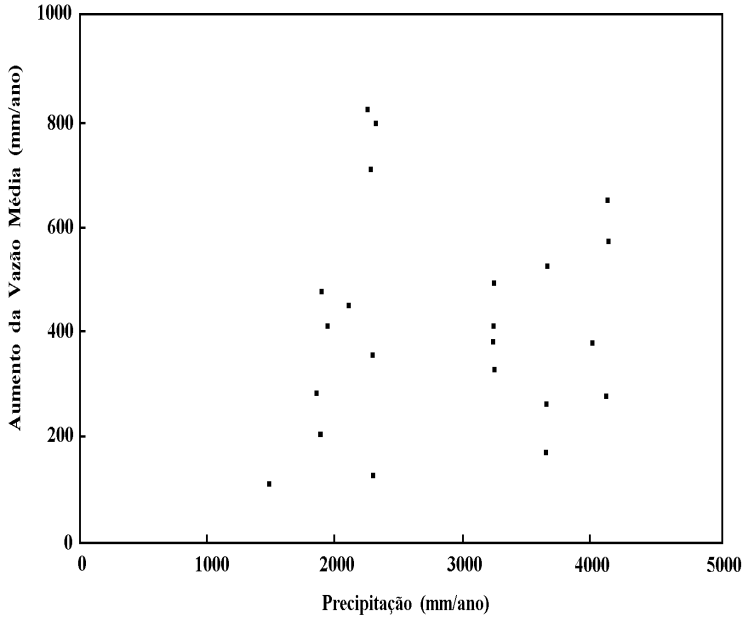

Figura 3.6 Aumento da vazão média versus a precipitação anual (Bruijnzeel, 1996)

Tabela 3.4 Alterações no escoamento devido ao desmatamento (Sahin e Hall, 1996)

Tipo de cobertura	Mudança para 100% de remoção mm	Mudança para cada 10% de retirada mm
conífera	330	23
eucaliptos	178	6
hardwood-conifer	201	22
floresta tropical	213	10
hardwood (< 1500mm)	201	19
hardwood (> 1500 mm)	169	17
Savana	92	9

Tabela 3.5 Valores médios de alteração da vazão de florestas tropicais, devido ao desmatamento em função da nova cobertura (Bruijnzeel, 1996).

Cultura mantida após o desmatamento	Aumento da vazão média mm / ano
Cultura anual	300-450
Vegetação rateira	200-400
Plantações de chá, borracha, cacau	200-300

Bruijnzeel (1996) cita que praticamente todas os resultados existentes se referem a bacias pequenas, o que dificulta o prognóstico sobre bacias grandes. Isto se deve a grande variabilidade temporal e espacial da: precipitação, solo, cobertura, tipo de tratamento do solo e prática agrícola, entre outros. No entanto, o autor cita que Madduma et al (1988) identificou grande aumento na vazão de uma bacia de 1.108 km2 no Sri Lanka no período de 1944-1981, apesar da precipitação apresentar tendência de redução no período. Esse aumento, segundo o autor, foi devido a conversão de plantações de chá para culturas anuais e jardins residenciais sem o uso de medidas de conservação do solo.

3.6.2 Vazão Mínima

É possível encontrar na literatura experimentos que mostram aumento ou diminuição da vazão mínima depois do desmatamento. O que pode caracterizar um caso ou outro depende das características do solo após o desmatamento. Quando as condições de infiltração após o desmatamento ficam deterioradas, por exemplo o solo fica compactado pela energia da chuva, a capacidade de infiltração pode ficar reduzida e aumentar o escoamento superficial, com redução da alimentação do aqüífero. De outro lado, se a água que não é perdida pela floresta, atinge o solo e infiltra, o aqüífero tem uma maior recarga, aumentando as vazões mínimas (veja figura 3.4).

3.6.3 Comportamento dos hidrogramas

Burch et al (1987) apresentaram os resultados da comparação entre duas pequenas bacias de 5 ha e 7,8 ha com floresta e vegetação rasteira(grassland), respectivamente, localizadas na Austrália. Nas figuras 3.7 e 3.8 são apresentados dois hidrogramas comparativos das duas áreas. Na primeira, um evento rápido com baixa umidade inicial e o outro, uma seqüência de três eventos durante um período maior. Na primeira (figura 3.7), o escoamento da bacia florestada foi de 0,02 mm e da bacia com vegetação rasteira foi de 16,8 mm. Na segunda (figura 3.8), as diferenças relativas foram menores 21,8 mm para 63,6 mm.

Isto demonstra que o efeito da cobertura vegetal foi muito maior no período mais seco, com eventos de pequena e média intensidade de precipitação. No período de chuvas seqüenciais de grande intensidade a diferença diminuiu.

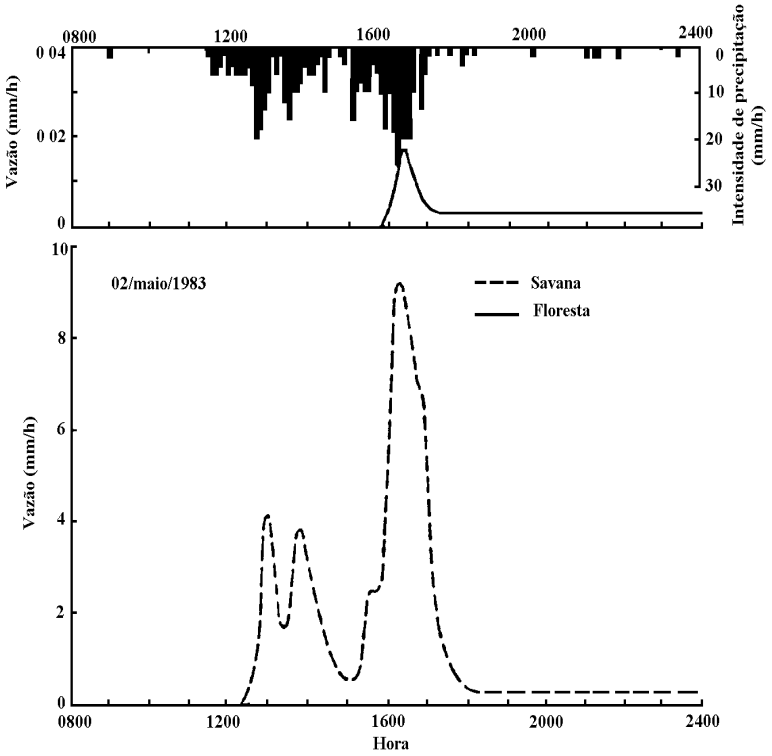

Figura 3.7 Evento num período de estiagem em duas bacias experimentais na Austrália (Burch et al, 1987)

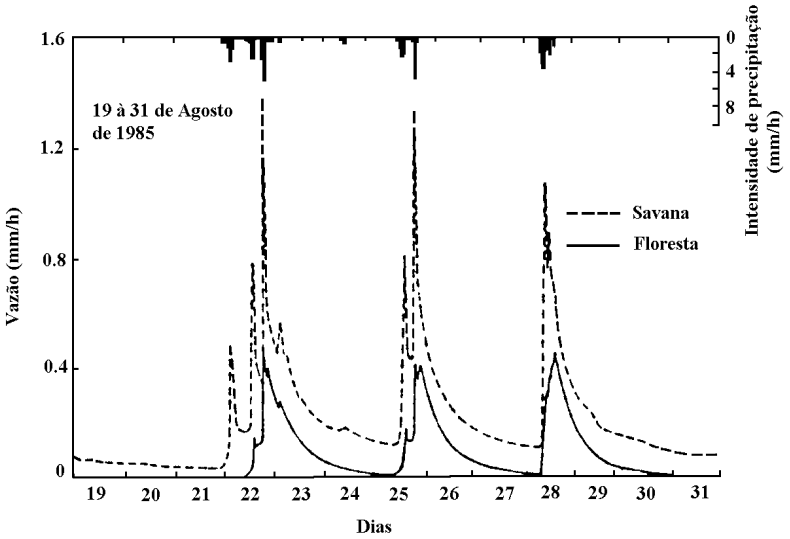

Figura 3.8 Hidrogramas de duas bacias experimentais na Austrália durante o período chuvoso (Burch et al 1987)

Em bacias com floresta e vegetação fechada, as precipitações de baixa intensidade normalmente não geram escoamento. No entanto, após um período chuvoso de grande intensidade, quando a capacidade de interceptação da bacia é atingida, o escoamento aparece e as diferenças com relação ao volume escoado em bacias desmatadas são menores. Portanto, a cheia de pequeno e médio tempo de retorno tende a aumentar, quando ocorre o desmatamento, enquanto que nas cheias de maior magnitude, as diferenças diminuem.

4.Água no meio urbano

O ciclo hidrológico natural é constituído por diferentes processos físicos, químicos e biológicos. Quando o homem entra dentro deste sistema e se concentra no espaço, produz grandes alterações que alteram dramaticamente este ciclo e trazem consigo impactos significativo (muitas vezes de forma irreversível) no próprio homem e na natureza.

Este processo necessita de diferentes ações preventivas de planejamento urbano e ambiental visando minimizar os impactos e buscar o desejável desenvolvimento sustentável.

A queda de qualidade de vida nas cidades de países em desenvolvimento e, mesmo em países desenvolvidos é um processo dominante no final do século vinte e início do século vinte e um. Nos aspectos da água no meio urbano este impacto são, principalmente:

- contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos com os efluentes urbanos como o esgoto cloacal, pluvial e os resíduos sólidos;
- disposição inadequada dos esgotos cloacais, pluviais e resíduos sólidos nas cidades;
- inundações nas áreas urbanas devido a urbanização;
- erosão e sedimentação gerando áreas degradadas;
- ocupação de áreas ribeirinhas com risco de inundações e de grandes inclinações como morros urbanos sujeitos a deslizamento após período chuvoso.

Grande parte dos problemas destacados acima foram gerados por um ou mais dos aspectos destacados a seguir:

- *falta de conhecimento generalizado sobre o assunto*: a população e os profissionais de diferentes áreas não possuem informações adequadas sobre os problemas e suas causas e geralmente se movem da tomada de decisão para custos altos onde algumas empresas se apoiam para aumentar seus lucros. Por exemplo, o uso de canalização para drenagem é uma prática generalizada no Brasil, mesmo representando custos muito altos e geralmente tendem a aumentar o problema que pretendiam resolver. A própria população, quando possui algum problema de inundação a primeira solicitação que faz é de um canal, porque é a solução que tem observado;
- *concepção inadequada dos profissionais de engenharia para o planejamento e controle dos sistemas*: Uma parcela importante dos engenheiros que atuam no meio urbano estão desatualizados quanto a visão ambiental e geralmente buscam soluções estruturais que sempre buscam a alteração do ambiente com excesso de áreas impermeáveis que resultam em aumento de temperatura, inundações, poluição, entre outros;
- *visão setorizada do planejamento urbano*: O planejamento e o desenvolvimento das áreas urbanas é realizado sem incorporar os aspectos relacionados com os diferentes componentes da infra-estrutura de água (que não é somente abastecimento e saneamento);

- *falta de capacidade gerencial:* os municípios não possuem estrutura para o planejamento e gerenciamento adequado dos diferentes aspectos da água no meio urbano.

A maioria destes problemas é conseqüência de uma visão distorcida do controle por parte da comunidade de engenharia que ainda prioriza as medidas estruturais, que os países ricos (desenvolvidos) já abandonaram devido a falta de viabilidade econômica. O paradoxo é que países em desenvolvimento e mais pobres, priorizam ações insustentáveis economicamente como as medidas estruturais.

4.1 Desenvolvimento urbano

O crescimento urbano ocorrido em países em desenvolvimento como o Brasil tem sido significativo desde a década de 70. Na figura 1.1 pode-se observar o crescimento urbano dos países desenvolvidos e, em desenvolvimento, além da sua projeção para o futuro. Pode-se observar que enquanto nos países desenvolvidos o crescimento da população estacionou nos países em desenvolvimento isto somente ocorrerá em 2150.

Em 1900 apenas 15% da população mundial era urbana, na virada do século mais da metade da população é urbana. Na Ásia e na África a população urbana ainda não é significativa, enquanto na América Latina, Europa e Estados Unidos a população urbana fica acima de 75%. No Brasil esta proporção já está em 82% e, em alguns Estados como São Paulo, acima de 90%.

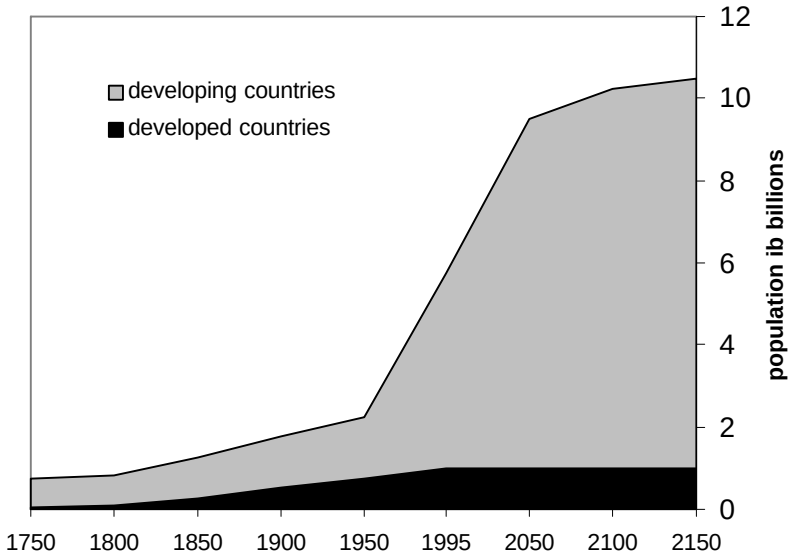

Figura 4.1 Crescimento da população

A previsão é de que cerca de 2010 existirão 60 cidades acima de 5 milhões, sendo a maioria em países em desenvolvimento. Na tabela 4.1 pode-se observar as cidades mais populosas do mundo e na figura 1.2 a distribuição das grandes metrópoles.

O processo de urbanização observado nos países em desenvolvimento apresenta grande concentração populacional em pequenas áreas com deficiências no sistema de transporte, falta de abastecimento e saneamento, ar e água poluído, além das inundações. Estas condições ambientais inadequadas reduzem as condições de saúde, qualidade de vida da população, impactos ambientais e são os principais limitações ao seu desenvolvimento.

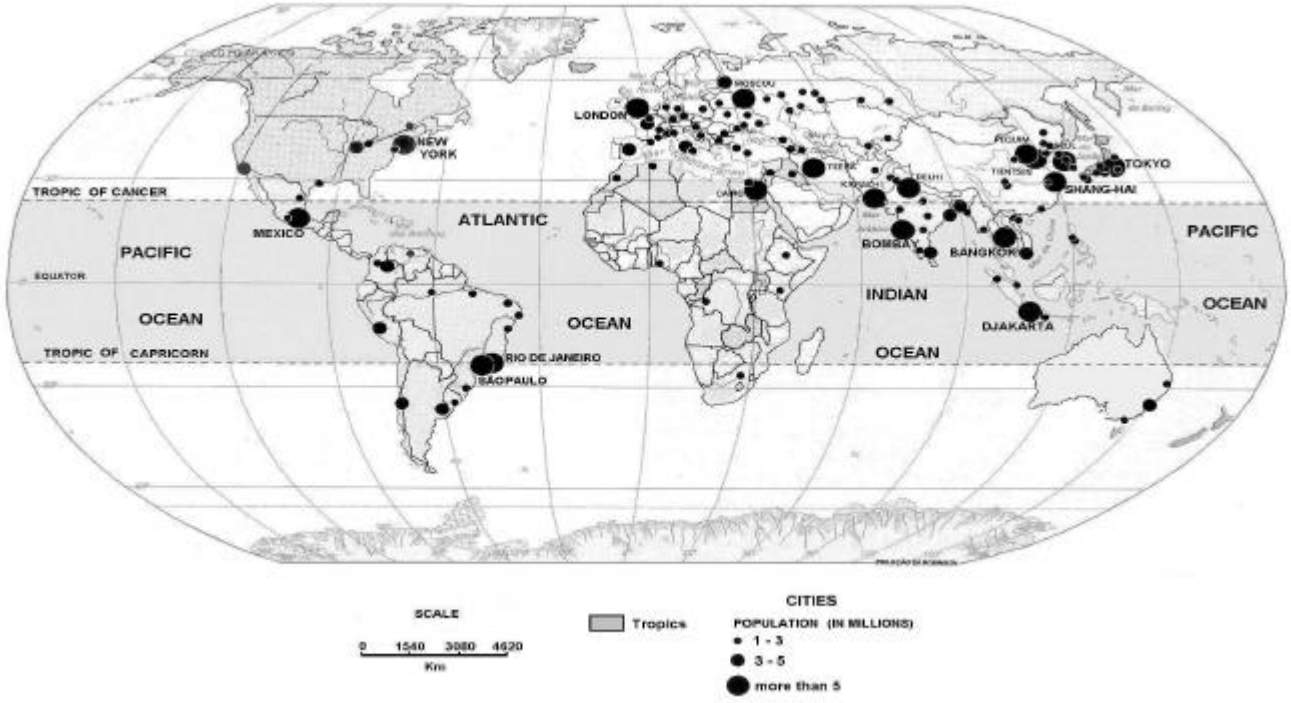

Figura 1.2 Principais centros urbanos

Parte importante da população vivem em algum tipo de favela. Caracas tem cerca de 50% da população em bairros deste tipo e Nova Deli 20%. Geralmente as favelas ocupam áreas de riscos, como áreas de grande declividade em morros ou de inundação, geralmente sem a infra-estrutura básica de água, saneamento e drenagem.

No Brasil o crescimento da população urbana foi acelerado nas últimas décadas (tabela 4.1). Este crescimento gerou grandes metrópoles na capital dos Estados brasileiros formado por um núcleo principal e várias cidades circunvizinhas resultado da expansão deste crescimento.

Tabela 4.1 Maiores cidades

Cidade	População Milhões
Toquio	27,8
Bombaim	18,0
São Paulo	17,8
Xangai	17,0
Nova York	16,6
Cidade do México	16,3
Pequim	14,2
Jakarta	14,0
Lagos	13,5
Los Angeles	13,0
Calcuta	12,6
Tianjin	12,0
Karachi	12,0

A tendência dos últimos anos tem sido de redução do crescimento populacional do país, com baixo crescimento populacional da cidade núcleo na região metropolitana (RM) (tabela 4.2) e aumento da sua periferia e, em cidades que são pólos regionais de crescimento. Cidades acima de 1 milhão crescem a uma taxa média de 0,9% anual, enquanto os núcleos regionais como cidades entre 100 e 500 mil, crescem a taxa de 4,8%. Portanto, todos os processos inadequados de urbanização e impacto ambiental que se observou nas RM estão se reproduzindo nestas cidades de médio porte.

Este crescimento urbano tem sido caracterizado por expansão irregular de periferia com pouca obediência da regulamentação urbana relacionada com o Plano Diretor e normas específicas de loteamentos, além da ocupação irregular de áreas publicas por população de baixa renda. Este processo dificulta o ordenamento das ações não-estruturais do controle ambiental urbano.

Esta tendência tem sido decorrência do seguinte:

- pequena renda econômica por parte importante da sociedade nos períodos de crise econômica e desemprego significativo;
- Falta de planejamento e investimento público no direcionamento da expansão urbana: O preço da infra-estrutura exigida para o lote é inferior ao seu valor de mercado, já que na periferia a maioria dos empreendimentos são de baixa renda. Desta forma, o processo ocorre sem controle, ficando futuramente para o poder público o ônus da regularização e implementação da infra-estrutura;
- Medidas restritivas incompatíveis com a realidade brasileira. A proteção de mananciais gerou legislações restritivas que condicionaram a desobediência. Estas leis impedem o uso das áreas mananciais sem que o poder público compre a propriedade. O proprietário é penalizado por possuir esta área, já que na maioria das vezes deve continuar pagando

imposto e ainda preservar a área quase intacta. A desobediência acaba ocorrendo devido ao aumento do valor econômico das áreas circunvizinhas. Observou-se em algumas cidades a invasão destas áreas por população de baixa renda até por convite dos proprietários, como um meio de negociar com o poder público.

Tabela 4.2 Crescimento da população brasileira e a taxa de urbanização (IBGE, 1996, apud FGV, 1998)

Ano	População Milhões de habitantes	Parcela da população urbana %
1970	93,1	55,9
1980	118,0	68,2
1991	146,8	75,6
1996	157,1	78,4
2005	175,1	79,0
2015	192,7	80,0

Tabela 4.3 População e crescimento das principais cidades brasileiras (IBGE, 1996)

Cidade	População em 1996 Milhões	Aumento do núcleo entre 91 e 96 %	Aumento da periferia entre 91 e 96 %
S. Paulo	16,667	2	16,3
R. de Janeiro	10,532	1,3	7,1
B. Horizonte	3,829	3,5	20,9
P. Alegre	3,292	2,0	9,4
Recife	3,258	3,7	7,4
Salvador	2,776	6,6	18,1
Fortaleza	2,639	11,1	14,7
Curitiba	2,349	12,3	28,2
Belém	1,629	-8,1	157,9

Portanto, observa-se uma cidade legal e uma cidade ilegal que necessita de ordenamento e controle.

4.2 Histórico

Até parte do século vinte as condições higiênicas inadequadas das concentrações urbanas era motivo de grande propagação das pestes com grande mortalidade da população. No século 14, a peste negra matou 1/3 da população da Europa devido a condições higiênicas inadequada, onde se propagavam de forma rápida e impiedosa as doenças de veiculação hídrica (NRC, 1991). Nesta época o esgoto escoava pelas ruas, a largura das ruas era estreita, com pequeno espaço para radiação solar e grande contaminação das fontes de água pelo próprio esgoto.

Neste estágio o principal aspecto relacionado com o controle envolvia obter água para consumo humano seguro e retirar da fonte o esgoto produzido pela população. Este é o período *higienista.* O cenário brasileiro, mostra que as cidades encontram-se ainda neste estágio. O conceito higienista visa principalmente evitar contaminações na fonte dos esgotos, remetendo-o para jusante. No entanto, com a grande densificação da população urbana em

países em desenvolvimento este tipo de conceito apenas tem transferido as cargas de um local para outro dentro da cidade e gerando novamente condições higiênicas inadequadas.

A tendência de *controle ambiental* que nos países desenvolvidos iniciou no final dos anos 60 e início dos 70, tinha como o objetivo não somente permitir garantir a saúde da população como também do meio ambiente. Era, de certa forma, o início do desenvolvimento sustentável das cidades. Nos Estados Unidos o marco deste processo é o *Clean Water Act* que criou os mecanismos institucionais para o investimento no tratamento de esgoto das cidades. Na França os comitê de bacias trataram deste processo com grande investimento público.

Neste processo, também mudou a concepção da drenagem das cidades que tinha como objetivo também a transferência do escoamento para jusante o mais rápido possível. Nestes países houve mudança desta concepção para o controle na fonte da drenagem com recuperação das condições de infiltração, armazenamento do volume excedente , definidos através de medidas institucionais. No Brasil este processo está tendo um início somente no novo século 21 e existe muito a ser realizado, o que motivou a elaboração deste livro.

De outro lado, nas áreas ribeirinhas as soluções no início do século eram estruturais, enquanto que também nos 60 houve uma mudança de tendência e as medidas não-estruturais tem sido predominante, com exceção do Japão onde as culturas históricas, o estatismo do gerenciamento do problema e a falta de espaço ainda predominam as soluções estruturais.

A mudança do estágio higienista para o ambiental no Brasil e, em países em desenvolvimento envolve em grande parte a solução do problemas institucionais, educação e participação pública.

4.3 Sistemas hídricos urbanos

Os principais sistemas relacionados com água no meio ambiente urbano são:

- Mananciais de águas;
- Abastecimento de água;
- Saneamento de efluentes cloacais;
- Controle da drenagem urbana;
- Controle da inundações ribeirinhas.

Os mananciais de água urbana são as fontes de água para abastecimento humano, animal e industrial. Estas fontes podem ser superficiais e subterrâneas. Os mananciais superficiais são os rios próximos as comunidades. Este sistema varia ao longo do tempo a quantidade de água disponível e, para atender a demanda muitas vezes é necessário construir um reservatório para garantir a disponibilidade hídrica da comunidade ao longo do tempo. Os mananciais subterrâneos são os aqüíferos que armazenam água no sub-solo e permitem o atendimento da demanda através do bombeamento desta água. Geralmente o atendimento da disponibilidade realizado através de água subterrânea depende da capacidade do aqüífero e da demanda. A água subterrânea geralmente é utilizada mais para cidades pequenas e médias, pois depende da vazão de bombeamento que ao aqüífero permite retirar sem comprometer seu balanço de entrada e saída de água.

O abastecimento de água envolve a utilização da água disponível no manancial que é transportada até a estação de tratamento de água (ETA) e depois distribuída a população por uma rede. Este sistema envolve importantes investimentos, geralmente públicos para garantir a água em quantidade e qualidade adequada.

O saneamento de efluentes cloacais é o sistema de coleta de dos efluentes residenciais, comerciais e industriais o transporte deste volume seu tratamento numa ETE Estação de tratamento de esgoto e despejo da água tratada de volta ao sistema hídrico.

A drenagem urbana envolve a rede de coleta de água (e resíduos sólidos) devido a precipitação sobre as superfícies urbanas, o seu tratamento e o retorno aos rios.

O controle da inundações ribeirinhas envolve evitar com que a população seja atingida pelas inundações naturais. Os rios nos períodos chuvosos saem do seu leito menor e ocupam o leito maior, dentro de um processo natural. Como isto ocorre de forma irregular ao longo do tempo, a população tende a ocupar o leito maior, ficando sujeita ao impacto das inundações. O controle deste processo envolvem vários elementos técnicos e institucionais, discutidos no capítulo xx.

4.4 Os impactos

Todos estes elementos estão fortemente interrelacionados devido a forma como são gerenciados dentro do ambiente urbano. Os principais problemas relacionados com estes sistemas são apresentados a seguir, excetuando os devido as enchentes, abordados no capítulo seguinte:

4.4.1Contaminação dos mananciais

O desenvolvimento urbano tem produzido um ciclo de contaminação gerado pelos efluentes da população urbana que são o esgoto doméstico/industrial e o esgotos pluviais (veja figura 1.xx o ciclo da contaminação).
Este processo ocorre devido:

- a falta de investimentos nos sistemas sanitários e, mesmo quando ocorrem são implantados de forma deficiente (veja comentários abaixo);
- falta total de controle da qualidade da água dos efluentes pluviais, que é a poluição difusa;
- legislação de uso do solo totalmente equivoca (veja item 1.1).

Desta forma, com o tempo, locais que possuem abastecimento tendem a reduzir a qualidade da sua água ou exigir um maior tratamento químico da água de abastecimento. Portanto, mesmo existindo hoje uma boa cobertura do abastecimento de água a mesma pode ficar comprometida a medida que medidas de controle do ciclo de contaminação não ocorram.

4.4.2 Cobertura de Abastecimento de água e saneamento

O acesso a água e ao saneamento reduz, em média, 55% da mortalidade infantil (WRI, 1992). O desenvolvimento adequado da infra-estrutura de abastecimento e saneamento é essencial para um adequado desenvolvimento urbano.

Em 1990 para países em desenvolvimento abastecimento de água cobria cerca de 80% da população e apenas 10% do saneamento. Mesmo com a cobertura de 80% existia um bilhão de pessoas que não tinham acesso a água limpa. Nesta 453 milhões não tinham acesso a saneamento (entendido aqui como apenas coleta e não coleta e tratamento) representando cerca de 33% da população. Em quatro anos 70 milhões receberam saneamento, mas a população cresceu em velocidade maior, aumentando a proporção de pessoas sem acesso para 37% (Wright, 1997).

O desenvolvimento das cidades no Brasil tem sido realizado com baixa cobertura de redes de coleta de esgoto, além da quase total falta de tratamento de esgoto. Inicialmente, quando a cidade tem pequena densidade, é utilizada a fossa séptica para disposição do esgoto. A medida que a cidade cresce e o poder público não investe no sistema, a saída do esgoto das

propriedades são ligadas a rede de esgotamento pluvial sem nenhum tratamento. Este escoamento converge para os rios urbanos e o sistema fluvial de jusante gerando os conhecidos impactos na qualidade da água.

As empresas de saneamento nos últimos anos têm investido em redes de coleta de esgoto e estações de tratamento, mas parcela do volume gerado pelas cidades que efetivamente é tratado antes de chegar ao rio é ainda muito pequena. Algumas das questões são as seguintes:

- Quando as redes de esgoto são implementadas ou projetadas não tem sido prevista a ligação da saída das habitações ou condomínios às redes. Desta forma as redes não coletam o esgoto projetado e as estações não recebem o esgoto para o qual têm a capacidade. Neste caso, ou o projeto foi elaborado de forma inadequada ou não foi executado como deveria. Como o esgoto continua escoando pelo pluvial para os sistema fluvial, o impacto ambiental continua alto. A conclusão é que os investimentos públicos são realizados de forma inadequada, atendendo apenas as empresas de engenharia (obras) e não a sociedade que aporta os recursos;

- Como uma parte importante das empresas cobra pelo serviço de coleta e tratamento, mesmo sem que o tratamento seja realizado, qual será o interesse das mesmas em completar a cobertura de coleta e tratamento do esgoto?

- Quando for implementado o sistema de cobrança pela poluição quem irá pagar as penas previstas para a poluição gerada? Será novamente a população?

- Existe atualmente um impasse sobre a concessão dos serviços de água e esgoto que tem imobilizado o financiamento e a privatização do setor. A constituição federal previu que a concessão dos serviços de água e esgoto pertence aos municípios, enquanto que as empresas de água e saneamento geralmente são estaduais. Como as mesmas não detêm a concessão o seu valor econômico fica reduzido no mercado de privatização. Recentemente o governo federal noticiou o envio de projeto de lei ao Congresso Nacional sobre a matéria, reacendendo a polêmica que decorre de enormes conflitos de interesse.

4.4.3 Doenças de Veiculação hídrica

As doenças de veiculação hídrica podem ocorrer devido:

- a falta de água segura de abastecimento da população, que envolve o abastecimento de água. Neste caso a diarréia é a doença mais freqüente (veja tabela 3);
- as doenças que dependem da higiene das pessoas, relacionado com a sua educação;
- as doenças relacionadas com o ambiente e a disposição da água, como a malária, dengue e esquistossomose, entre outros;
- doenças relacionadas com as inundações como a leptospirose, que é a contaminação da urina do rato na água de inundação.

Todos estes processos se desenvolvem quando o gerenciamento da água no ambiente urbano é inadequado.

Na tabela 3 são apresentados valores de mortalidade do Brasil em dois períodos e por faixa etária. Na tabela 4 são apresentadas as alterações dos serviços de água e esgoto, mostrando a correspondência de redução dos indicadores com o aumento da cobertura dos serviços, apesar do aumento da população no período. Observa-se na tabela 4 que a cobertura aumenta com a

classe de renda da população, um indicativo que a população mais pobre possui um índice de cobertura ainda menor que a média do país.

Tabela 3 Mortalidade devido a doenças de veiculação hídrica no Brasil (Mota e Rezende, 1999)

Idade	Infecção Intestinal		Outras(*)	
	1981	1989	1981	1989
< 1 ano	28.606	13.508	87	19
1 e 14 anos	3.908	1.963	44	21
> 14 anos	2.439	3.330	793	608

*cólera, febre tifóide, poliomielite, dissentiria, esquistossomose, etc

Tabela 4 Proporção da cobertura de serviços, por grupos de renda do Brasil em % (Mota e Rezende, 1999)

Domicílios SM	Água tratada		Coleta de esgoto		Tratamento de Esgoto	
	1981	1989	1981	1989	1981	1989
0 - 2	59,3	76,0	15	24,2	0,6	4,7
2 – 5	76,3	87,8	29,7	39,7	1,3	8,2
> 5	90,7	95,2	54,8	61,2	2,5	13,1
Todos	78,4	89,4	36,7	47,8	1,6	10,1

SM = salário mínimo

4.4.4 Impacto devido ao resíduo sólido

No desenvolvimento urbano são observados alguns estágios distintos da produção de material sólido na drenagem urbana, que são os seguintes:

No estágio inicial quando ocorre modificação da cobertura da bacia pela retirada da sua proteção natural, o solo fica desprotegido e a erosão aumenta no período chuvoso, aumentando também a produção de sedimentos. Exemplos desta situação são: enquanto um loteamento é implementado o solo fica desprotegido; da mesma forma na construção de grandes áreas ou quando o loteamento os lotes são construídos ocorre também grande movimentação de terra, que é transportada pela precipitação. Nesta fase existe predominância do sedimentos e pequena produção de lixo;

- *No estágio intermediário:* parte da população está estabelecida, ainda existe importante movimentação de terra devido a novas construções e a produção de lixo da população se soma ao processo de produção de sedimentos;

- *No estágio final:* nesta fase praticamente todas as superfícies urbanas estão consolidadas e apenas resulta produção de lixo urbano, com menor parcela de sedimentos de algumas áreas de construção ou sem cobertura consolidada.

Neste último caso, os sólidos totais são devido ao seguinte:

- Freqüência e cobertura da coleta de lixo;
- Freqüência da limpeza das ruas;
- Forma de disposição do lixo pela população;
- Freqüência da precipitação.

A produção de lixo no Brasil é da ordem de 0,5 a 0,8 kg/pessoa/dia, mas não existem informações sobre a quantidade de lixo que fica retido na drenagem, mesmo a nível internacional as informações são reduzidas. Considerando que o valor citado se refere a quantidade coletada, mas não existem informações do volume que deixa de ser coletado. Em San José, Califórnia o lixo que chega na drenagem foi estimado em 4 lb /pessoa/ano, resultando 1,8 lb/pessoa/ano em condutos e ruas.(Larger et al, 1977). Para o Brasil este volume deve ser maior, considerando que muitas vezes a drenagem é utilizada para depósito de lixo.

Na última década houve um visível incremento de lixo urbano devido as embalagens plásticas que possuem baixa reciclagem. Os rios e todo o sistema de drenagem ficam cheios de garrafas tipo *pet* de refrigerante, além das embalagens de plásticos de todo o tipo.

REFERÊNCIAS

CLARKE, R.T.,1973. *Mathematical models in hydrology*. Rome: FAO. 282p. (Irrigation and Drainage Paper, 19).

CHOW, V.T., 1959. *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill. Paginação irregular.

DOOGE, J.C., 1988. Hydrology in perspective. *Hydrological Sciences Journal*, Oxford, v.33, n.1, p.61-85, Feb.

EAGLESON, P.,1990. Opportunities in hydrological sciences. *Newsletters*. IAHS, n.40, Set.

NRC, 1991. *Opportunities in the hydrologic sciences*. Washington: National Academy Press. 348p.

ROCKWOOD, D.M., 1958. *Columbia Basin streamflow routing by computer*. Journal of the Waterways and Harbors Division. American Society of Civil Engineers, New York, v.84, n.5, Dec.