



Fórum Brasileiro de
Mudanças Climáticas

Câmara Temática sobre Recursos Hídricos



Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos

Carlos E. M. Tucci



Agência Nacional de Águas - ANA

www.ana.gov.br



Fórum Brasileiro de
Mudanças Climáticas

Câmara Temática sobre Recursos Hídricos

IMPACTOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E USO DO SOLO SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS

Prof. Carlos E. M. Tucci



Agência Nacional de Águas - ANA

www.ana.gov.br

Estudo preparado como contribuição da ANA – Agência Nacional de Águas para a
Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas

Maio de 2002

Apresentação

O Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas foi criado pelo presidente Fernando Henrique Cardoso em 2000 visando aumentar o conhecimento sobre mudanças climáticas e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil. Foram criadas sete Câmaras temáticas dentro do Fórum, sendo uma delas a de Recursos Hídricos.

Este estudo é um dos primeiros elaborados para servir apoiar o conhecimento sobre o assunto dentro âmbito brasileiro e uma contribuição da ANA - Agência Nacional da Água a Câmara Temática de Recursos Hídricos.

Este documento representa uma avaliação dos diferentes aspectos que relacionam clima e uso do solo e seus impactos no comportamento hidrológicos e nos setores de desenvolvimento econômico relacionado com os recursos hídricos, com ênfase na bacia hidrográfica brasileira do rio da Prata que envolvem os rios Paraguai, Paraná e Uruguai.

As análises realizada representam um diagnóstico e propostas de ações de desenvolvimento técnico e científico sobre clima e recursos hídricos, temas estratégicos para o desenvolvimento do país, seu planejamento, gerenciamento e atuação em parcerias e negociações internacionais onde os impactos climáticos e o desenvolvimento sustentáveis são princípios básicos para o crescimento do país.

O relatório apresenta um sumário executivo que sintetiza o conjunto deste estudo, para uma leitura resumida sobre o seu conteúdo. No primeiro capítulo é apresentada uma síntese dos condicionantes naturais e antrópicos sobre recursos hídricos. É um capítulo básico para o entendimento dos processos hidrológicos, sua avaliação e o impacto das ações humanas nos sistemas hídricos. No segundo capítulo são sintetizadas as informações existentes sobre a variabilidade e modificação climática, com maior ênfase neste último em face dos últimos resultados do IPCC. No terceiro capítulo são analisadas as variabilidades hidrológicas encontradas nas bacias brasileiras do rio da Prata e a inter-relação entre estas variabilidades e o uso do solo. O capítulo quarto destaca a capacidade de previsão das vazões e alguns exemplos destas previsões, caracterizando seus benefícios em diferentes cenários de recursos hídricos. O quinto capítulo identifica a relação entre os usos e conservação dos recursos hídricos e os impactos potenciais, apresentando um estudo de caso. No sexto capítulo são apresentadas alguns estudos estratégicos propostos para o cenário brasileiro.

Brasília maio de 2002

Dr. Benedito Braga Jr.
Diretor da Agência Nacional de Águas

“Uma teoria física é sempre provisória, no sentido de que é apenas uma hipótese, nunca será provada. Não importa quantos resultados de experimentos justificam a teoria, você nunca estará certo de que numa outra vez o resultado não contrariará a teoria”

Stephen Hawking

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO	7
1. PROCESSOS HIDROLÓGICOS NATURAIS E ANTRÓPICOS	30
1.1 Ciclo Hidrológico Global e seus Componentes	30
1.2 Descrição dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica	30
1.3 Ações antrópicas sobre os sistemas hídricos	34
1.3.1 Desmatamento	34
1.3.2 Uso da Superfície	35
1.3.3 Método de Desmatamento	36
1.3.4 Métodos de avaliação do Impacto do desmatamento	37
1.3.5 Alterações da precipitação devido ao desmatamento	37
1.3.6 Impacto do desmatamento sobre o escoamento	38
1.3.7 Impacto da urbanização	46
1.4 As escalas dos processos hidroclimáticos	50
1.4.1 Variabilidade temporal.....	51
1.4.2 Variabilidade espacial	52
1.4.3 Análise do comportamento da transição de micro para a meso escala	53
1.4.4 Extrapolação entre escalas	53
2. VARIABILIDADE E MODIFICAÇÃO CLIMÁTICA.....	57
2.1 Terminologia	57
2.2 Efeito Estufa	57
2.3 Efeito sobre o clima	58
2.4 Evidências da alteração climáticas	60
2.5 Modelos globais climáticos	63
2.6 Prognóstico dos modelos	64
2.7 Impacto sobre o meio ambiente e a sociedade	66
2.8 Ações internacionais para mitigação dos impactos.....	69
2.8.1 Acordos	69
2.8.2 Mecanismos	69
2.9 Variabilidade climática	70
3. VARIABILIDADE HIDROLÓGICA	72
3.1 Relação entre variáveis hidrológicas	72
3.2 Efeito das variabilidade climática e uso do solo sobre o escoamento	74
3.3 Variabilidade observada em algumas bacias brasileiras	77
3.3.1 Bacia do rio Paraná	77
3.3.2 Rio Paraguai.....	90
3.3.3 Rio Uruguai	93
3.3.4 Análise Comparativa	98
4. PREVISÃO HIDROLÓGICA	102
4.1 Previsão de curto prazo	102

4.1.1 Conceitos	102
4.1.2 Modelos de Previsão	104
4.1.3 O uso da previsão de curto prazo	106
4.2 Previsão de longo prazo	110
4.2.1 Médio prazo	110
4.2.2 Predição do impacto climático	114
5. IMPACTOS DA VARIABILIDADE NOS SISTEMAS HÍDRICOS	122
5.1 Características	122
5.1.1 Variabilidade e representatividade	122
5.1.2 Efeitos Antrópicos	123
5.2 Impactos sobre os diferentes setores dos recursos hídricos	124
5.2.1 Abastecimento urbano.....	124
5.2.2 Irrigação	125
5.2.3 Energia	127
5.2.4 Navegação	131
5.2.5 Qualidade da água e meio ambiente	131
5.2.6 Inundação	132
5.3 Estudo de caso	135
6. ESTUDOS ESTRATÉGICOS PARA O CENÁRIO BRASILEIRO.....	143

SUMÁRIO EXECUTIVO

Antecedentes e Objetivos

O desenvolvimento econômico e social do Brasil está essencialmente ligado aos condicionantes climáticos. O Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, estabelecido pelo presidente Fernando Henrique Cardoso em junho de 2000 tem como objetivo promover a conscientização e mobilização da sociedade para a discussão e tomada de posição sobre os problemas decorrentes da mudança do clima por gases de efeito estufa, bem como sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). As Câmaras temáticas visam permitir agilidade ao Fórum nas discussões técnicas e na produção de conhecimento em suas respectivas áreas de atuação. Foram criadas sete câmaras técnicas, uma das quais a Câmara Temática de Recursos Hídricos.

As Câmaras Técnicas devem apoiar o Fórum desenvolvendo trabalhos a partir de enfoques multidisciplinares, contemplando todas as dimensões do desenvolvimento sustentável e as especificidades do tema das mudanças climáticas.

A condição singular do Brasil como nação com grande riqueza hídrica, sempre nos levou a um acomodamento quanto dos riscos dos efeitos das variações naturais sobre o desenvolvimento da sociedade. A sofisticação do cenário nacional e internacional atual exige um maior conhecimento técnico-científico sobre a variabilidade climática e os impactos sobre os recursos hídricos considerando o seguinte:

- na medida que esta sociedade se sofisticava, exigindo muito mais dos recursos naturais os efeitos desta pressão se faz sentir nos recursos naturais como os recursos hídricos e de alguma forma sobre o clima;
- o governo está envolvido em freqüentes decisões internacionais sobre a modificação climática como detentor de grandes reservas naturais;
- a estratégia de desenvolvimento em diferentes setores sócio-econômicos dependem essencialmente dos recursos hídricos. A sua variabilidade de curto, médio e longo prazo pode comprometer este desenvolvimento.

Infelizmente o investimento na avaliação da climatologia, dos recursos hídricos e das condições naturais de ocupação e uso do solo no Brasil é muito recente. Considerando a magnitude do espaço do território brasileiro onde existem vários biomas um dos maiores limitantes para uma adequada análise do problema é a falta de dados quantitativos dos diferentes sistemas naturais e seus componentes.

Este documento foi preparado com o objetivo de reunir as informações existentes e analisar, os potenciais impactos para os recursos hídricos do país e para a sociedade, da variabilidade climática natural e antrópica. Não tem a pretensão de esgotar o assunto, mas fornecer uma visão de conjunto e indicando ações objetivas no sentido de orientar os investimentos para o aumento do conhecimento e tomada de decisão no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Este documento está dividido em seis capítulos: *Processos hidrológicos e o uso do solo* que caracteriza os principais elementos sobre os citados processos e as interferências antrópicas através do uso do solo. Este capítulo tem como objetivo atualizar o conhecimento existente na literatura sobre o assunto; *Variabilidade e modificação climática* descreve principalmente os resultados do IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) visando apresentar a

consolidação internacional sobre estes impactos e o cenário internacional dos acordos e mecanismos de mitigação em andamento; *Variabilidade hidrológica* - caracteriza como as mudanças hidrológicas ocorrem, destacando resultados de três grandes bacias brasileiras: Paraná Paraguai e Uruguai e discutindo a composição da variabilidade das vazões em função do clima e do uso do solo; *Previsão de Vazão* este capítulo foi introduzido para caracterizar como é possível se antecipar na identificação destes processos com as informação disponíveis; *Impacto da variabilidade nos sistemas hídricos brasileiros* trata de identificar as fragilidades e necessidades dos recursos hídricos em face das variabilidades climáticas; *Estudos estratégicos para o cenário brasileiro*: são identificados os estudos potenciais que podem ser realizados visando ampliar o conhecimento e a prevenção para cenários atuais e futuros de uso do solo, variabilidade climática e participação internacional de discussão destes temas.

Processos hidrológicos e o uso do solo

Foi preparada uma revisão consolidada sobre os processos hidrológicos e os impactos antrópicos na bacia hidrográfica. Os resultados mostraram que a ação do homem sobre o uso do solo pode produzir alterações substanciais nos processos hidrológicos terrestres como : redução ou aumento da vazão média, máxima e mínima de uma bacia hidrográfica e; alteração da qualidade da água. As principais conclusões são:

- O desmatamento para culturas anuais aumenta o escoamento médio de uma bacia pela redução da evapotranspiração. O impacto que isto tem sobre a vegetação e os sistemas hídricos dependem dos efeitos de escalas nas bacias de maior porte. Na literatura existe pouca comprovação sobre o efeito do uso do solo sobre o escoamento em grandes bacias;
- A maioria do conhecimento hidrológico tem sido observado em pequenas bacias, a nível internacional e no Brasil o conhecimento do comportamento ecohidrológico dos biomas nacionais é muito reduzido devido a falta de monitoramento;
- O impacto do desenvolvimento urbano também apresenta um dos efeitos significativos sobre o ambiente criando condições extremamente desfavoráveis sobre os rios na vizinhança dos centros urbanos, além das inundações geradas por projetos de drenagem totalmente inadequados em quase todas as cidades brasileiras;

Variabilidade e modificação climática

As definições utilizadas são as seguintes: *Variabilidade climática*: são as variações de clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações; *Modificação climática*: são as alterações da variabilidade climática devido as atividades humanas.

A avaliação dos processos hidrológicos em diferentes estudos de recursos hídricos baseia-se na homogeneidade das séries hidrológicas, ou seja as estatísticas da série hidrológica não se alteram com o tempo. Não é esta a dinâmica observada na realidade, a não-homogeneidade das séries tem aparecido devido a causas isoladas e combinadas como:

- modificação climática, como definido acima;
- falta de representatividade das séries históricas para identificar a variabilidade natural dos processos climáticos;

- alterações nas características físicas/químicas e biológicas da bacia hidrográfica devido a efeitos naturais e antrópicos;

A potencial alteração climática é caracterizada em função da emissão de gases e o aumento do efeito estufa. Para entender melhor esta questão algumas definições são necessárias Quadro 1.

Quadro 1 – Efeito Estufa e seus impactos

A radiação solar de onda curta penetra a atmosfera, aquecendo a superfície da terra. Parte desta radiação é absorvida e parte é refletida de volta para a atmosfera (albedo). A parcela absorvida produz aquecimento na superfície que emite radiação de onda longa (radiação térmica) que pode ser absorvida pelos gases encontrados na atmosfera, como o Vapor d'água e o dióxido de carbono (CO₂). A absorção desta radiação de onda longa aquece a atmosfera, aumentando a temperatura da superfície. Este é o denominado *efeito estufa*.

O efeito estufa é um processo natural no globo produzido principalmente pelo vapor de água, além de outros gases. Se não houvesse este efeito na atmosfera da Terra, a temperatura da superfície resultante do balanço de energia seria 33° C mais fria.

A potencial modificação climática é resultante do aquecimento adicional da atmosfera devido ao aumento de gases na atmosfera produzido pelas atividades humana e animal na Terra, além dos processos naturais já existentes.

Os principais gases que contribuem para este processo são : o dióxido de carbono CO₂, metano (CH₄) , óxido de nitrogênio e CFC (clorofluor-carbono). O CO₂ é produzido pela queima de combustíveis fósseis e produção de biomassa. Existem registros que indicam aumento da concentração de CO₂ de 315 ppm para 342 na atmosfera entre 1958 e 1983.

O painel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2001b), grupo de apoio das Nações Unidas sobre assuntos da atmosfera apresentou relatório elaborado por um grupo de economistas, cientistas políticos e cientistas de diferentes áreas concluindo sobre o seguinte:

- Na análise de dados indiretos, é *provável* que o aumento da temperatura do hemisfério Norte no século vinte foi o maior de 1.000 anos. Da mesma forma é provável que a década 90 e o ano de 1998 tenham sido os mais quentes deste período;
- De acordo com cenários previsto pelo painel, a temperatura média do globo poderá aumentar de 1,4 a 5,8 °C para 2100 com relação a 1990 e globalmente o nível do mar poderá aumentar de 0,09 a 0,88 m para a mesma data.
- Dados de maré tem mostrado que a média global do nível do mar aumentou cerca de 0,1 a 0,2 m durante o século vinte;

As principais avaliações obtidas através dos modelos climáticos para a variabilidade do passado são as seguintes (IPCC,2001b):

- O aquecimento ocorrido nos últimos 100 anos é *muito improvável* que seja devido apenas a variabilidade climática de origem natural;
- Considerando as incertezas o aumento de temperatura dos últimos 50 anos é *provável* que seja devido ao aumento dos gases do efeito estufa.

IPCC apresentou um relatório especial sobre emissão de gases (SRES) onde desenvolveu vários cenários futuros. Estes cenários não consideram os objetivos do protocolo de

Quioto, mas tendências atuais, condicionantes econômicos e sociais dos países. Um resumo das projeções obtidas são as seguintes:

- A projeção para o CO₂ na atmosfera para 2100 pelos modelos é entre 540 e 970 ppm (diferentes cenários), aumento de 90 a 250% sobre a concentração de 1750 e 59 a 158% com relação a concentração de 1983.
- Caso o carbono emitido por alterações no uso do solo pudesse ser recuperado através de reflorestamento a concentração de dióxido de carbono na atmosfera poderia se reduzir de 40 a 70 ppm;
- Para estabilizar a concentração de CO₂ em 450, 650 e 1000 ppm em poucas décadas, cerca de um século e cerca de dois séculos, respectivamente é necessário reduzir a emissão aos níveis de 1990;
- A temperatura média da superfície é projetada para aumentar entre 1,4 a 5,8° C entre 1990 e 2100. Este é o resultado de 35 cenários baseado em vários modelos climáticos;

Acordos Internacionais

Em 1990, a Assembléia Geral das Nações Unidas criou o Comitê Intergovernamental de Negociação para uma Convenção – Quadro sobre Mudança do Clima (INC). O INC preparou um texto chamado de *Convenção sobre Mudança Climática*. Este documento foi assinado em maio de 1992 nas Nações Unidas e aberto para assinaturas dos países em junho de 1992 na Cúpula sobre Meio Ambiente no Rio de Janeiro. Esta convenção foi ratificada ou aderida por 175 países até 1999, comprometendo-se com seus termos (Nações Unidas, 1999). A Convenção estabeleceu que os países desenvolvidos deveriam reduzir suas emissões de gases do efeito Estufa (GEE) para o ano 2000 em níveis anteriores a 1990. A Conferência das Partes (COP), órgão supremo da Convenção, reuniu-se inicialmente em 1995 em Berlim e concluiu que os compromissos eram inadequados e elaborou o chamado Mandato de Berlim que abriu a discussão por dois anos para definição dos compromissos para a primeira década do novo milênio. Esta fase concluiu com a terceira Conferência das Partes em Quioto no Japão em 1997 onde foram definidos que os países desenvolvidos deveriam reduzir em pelo menos 5% (com relação aos níveis de 1990) a emissão dos gases do efeito estufa até o período de 2008 a 2012.

Os gases do efeito estufa, como já mencionado nos itens anteriores, foram considerados no protocolo de Quioto como sendo: Dióxido de Carbono, Metano, óxido nitroso, hexafluoreto de enxofre e as famílias perfluorcarbonos.

A redução da emissão envolve na realidade a variação líquida de emissões, que é resultado da diferença entre a emissão e a absorção ou remoções como a absorção de CO₂ pelas plantas na fotossíntese.

Os compromissos assumidos na época pelos países europeus foram de reduzir em 8% os níveis de 90, os Estados Unidos mencionava 7%, Japão, Canadá, Polônia e Coréia em 6%. Outros países acordaram em manter os níveis de 90 como a Rússia e Ucrânia.

O acordo de Quioto entraria em vigor em 90 dias após a sua ratificação por pelo menos 55 países, incluindo países desenvolvidos responsáveis por 55% do total das emissões. Como Estados Unidos e Federação Russa juntos produzem atualmente cerca de 51,7% praticamente condicionam a ratificação do protocolo de Quioto. Em 1997 o Senado americano definiu que o país não deveria ratificar o protocolo se os países em desenvolvimento como Brasil, China, México e Índia (que ficaram fora dos compromisso) não tivessem o mesmo compromisso para o mesmo período.

Mecanismos

Em face das dificuldades de implementação do protocolo e o impacto econômico que estas medidas podem produzir nos países foram discutidos em várias conferências depois de Quioto três mecanismos para atuar no processo de redução das emissões:

- Implementação conjunta de projetos;
- Comércio de emissões;
- Mecanismos de desenvolvimento limpo (CDM ou MDL).

Os dois primeiros a serem implementados principalmente nos países desenvolvidos onde existem as restrições ao crescimento das emissões. A implementação de projetos conjuntos (Joint Implementation) é a transferência e aquisição de unidades de redução de emissões resultante de projeto de mitigação de mudanças climáticas. O Comércio de Emissões (Emissions trading) objetiva o comércio de emissões com o objetivo de mitigação das mudanças climáticas. O terceiro, que partiu de idéia brasileira, visa promover o desenvolvimento sustentável em países fora da classificação adotada (que possuem compromissos de redução de emissão). O desenvolvimento de projetos MDL em países em desenvolvimento pode gerar uma certificação de emissão reduzida (CER) que pode ser negociada com os países desenvolvidos.

As conferências internacionais e os estudos em desenvolvimento têm buscado mecanismos técnicos para a implementação destes elementos no cenário internacional. No entanto, após a posse do governo Bush existe uma mudança muito forte dos rumos da política americana evitando o atendimento do protocolo de Quioto, mas apresentaram recentemente uma alternativa ao cumprimento das metas anteriores.

Variabilidade hidrológica

A variabilidade hidrológica é entendida com as alterações que possam ocorrer na entrada e saídas dos sistemas hidrológicos. As principais entradas são a precipitação e a evapotranspiração (que depende de outras variáveis climáticas), enquanto que a principal variável de saída são o nível e a vazão de um rio.

Os principais efeitos da variabilidade hidrológico estão relacionados com:

- Variabilidade natural dos processos climáticos;
- Impacto da modificação climática;
- Efeitos do uso da terra e alteração dos sistemas hídricas.

A relação entre as variáveis de entrada e saída dos sistemas hidrológicos apresentam um comportamento não-linear. A alteração da precipitação apresenta impacto relativo diferenciado sobre a vazão da bacia hidrográfica. Observa-se nos dados que nos anos com valores extremos (inundações e secas) a resposta da bacia se amplifica com relação a variação adimensional da precipitação. Esta condição ocorre devido a proporcionalidade como os valores de precipitação se relacionam com os de vazão. Nos anos mais úmidos o aumento de precipitação produz maior aumento da vazão já que a infiltração aumenta

pouco e a evapotranspiração potencial diminui pelo aumento da chuva, o que aumenta o proporcionalmente mais o escoamento. No sentido contrário, nos anos secos, a redução de precipitação, aumento da evapotranspiração reduz em maior magnitude a vazão. Portanto, a anomalia da vazão (resposta da bacia hidrográfica) amplifica os efeitos na precipitação, se considerarmos apenas o efeito da anomalia da precipitação (figura 1).

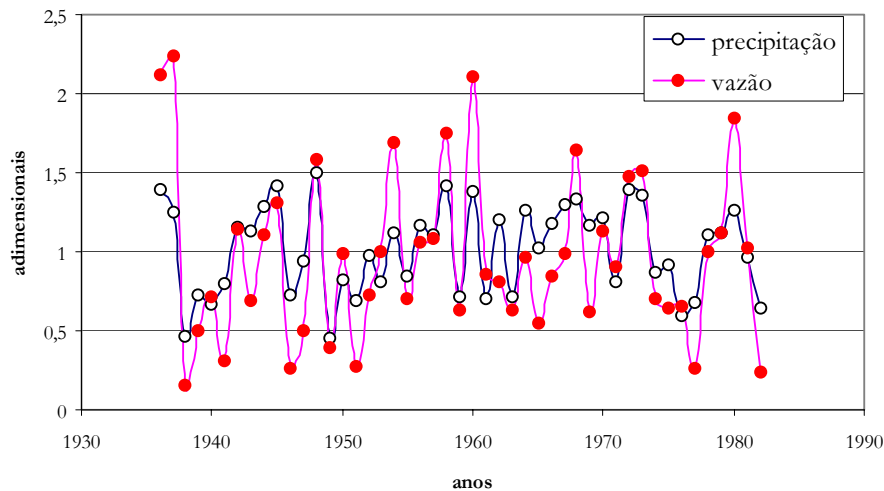


Figura 1 Precipitação e vazão no rio Verde Pequeno (vazões obtidas por modelo hidrológico)

Variabilidade das séries de vazões no rio Paraná

As séries de vazões na bacia do rio Paraná apresentam uma importante não estacionariedade entre os períodos antes e depois da década de 70. Na tabela 1 são apresentadas as estatísticas destes valores para várias seções do rio Paraná. Pode-se observar que o incremento de vazão varia na vizinhança de 30%. Este processo também é observado em várias sub-bacias do rio Paraná em território brasileiro. As perguntas que naturalmente são feitas são: *Esta variação de vazão é resultado de aumento de precipitação ou da alteração do uso do solo? Caso tenha sido devido ao aumento de precipitação, será devido a modificação climática ou variabilidade natural do clima?*

Tabela 1 Vazão média anual $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Local	Antes de 1970	1970-1990	Aumento %
Rio Parana em Jupiá	5,852 ⁽⁺⁾	6,969	19,1
R. Paranapanema em Rosana	1,057 ⁽⁺⁾	1,545	46,2
R. Paraná em São José	6,900 ⁽⁺⁾	8,520	23,3
R. Paraná em Guaira	8,620 ⁽⁺⁾	11,560	34,1
R. Paraná em Posadas	11,600 ^(*)	14,255	22,9
R. Paraná em Corrientes	15,265	19,510	27,8

+ series de 1930-1970; * series de 1901-1970

As causas potenciais desse aumento de vazão são as seguintes:

- aumento da precipitação no período devido a modificação climática ou condições amostrais;
- modificação do uso do solo por desmatamento;
- variabilidade amostral da vazão, em conjunto com a precipitação.

Na tabela 2 pode-se observar o aumento de precipitação ocorrido entre os dois períodos nas bacias incrementais do rio Paraná e os aumentos da vazão, que proporcionalmente são maiores. A questão passa a ser se na variabilidade de vazão está incorporada a variação devido ao uso do solo?

Tabela 2 Vazões dos períodos anteriores e posteriores a 1970 nas sub-bacias do rio Paraná (Muller et, 1998).

Bacia	$P_2 - P_1$ mm	$Q_2 - Q_1$ Mm	Q_1/P_1	Q_2/P_2	P_2/P_1	Q_2/Q_1
Grande	228	90	0,33	0,34	1,17	1,18
Tietê	193	101	0,24	0,28	1,15	1,34
Paranapanema ¹	183	153	0,25	0,32	1,16	1,45
Incremental ¹	127	199	0,29	0,39	1,10	1,44

¹ 1931-1994; incremental se refere a bacia contribuinte do rio Paraná a seção da barragem de Itaipu;

P_1 é a precipitação até 1970, com séries que variaram de 30 a 40 até 70; P_2 precipitações de 1970 até 1990 ou 1994; Q_1 vazão correspondente ao período anterior a 1970 e Q_2 vazões correspondentes ao período posterior a 1970.

A literatura é unânime em experimentos, demonstrando que ***o desmatamento produz aumento de escoamento médio***. Com relação as estiagens, o desmatamento pode provocar uma diminuição ou aumento do escoamento mínimo, de acordo com as condições do solo e com o tipo de tratamento usado no desmatamento e uso do solo, após o desmatamento.

Essas conclusões, no entanto, se referem principalmente a bacias de pequena escala, onde o experimento pode ser controlado. Para bacias maiores a literatura é pobre sobre o assunto porque a variabilidade espacial dos diferentes fatores que interferem no escoamento é muito grande.

No entanto, deve-se observar alguns indícios importantes na bacia incremental em estudo:

- o desmatamento inicial (até 1970) na bacia incremental foi utilizado para a implantação do café na região Norte do estado do Paraná. O café tem características semelhantes a uma área com mata, no que se refere ao efeito sobre o escoamento já que o solo é protegido e a cobertura é mantida;
- na década de 70 iniciaram os seguintes processos: (a) forte incremento de culturas anuais como o soja, milho e trigo, que geram maior escoamento e se mantém ao longo dos anos; (b) aumento da mecanização, que aumenta ainda mais o escoamento médio, devido a compactação do solo; (c) incremento do desmatamento no oeste do Paraná. Esse tipo de uso do solo tem condições de provocar um aumento mais importante na vazão média, como a literatura tem mostrado;
- no final da década de 70 iniciou um forte processo de conservação do uso do solo no Paraná. O processo de conservação do solo induz a um aumento da infiltração, o que pode permitir um aumento das vazões mínimas.
- a literatura mostra, também, que o desmatamento seguido de ocupação do solo com culturas anuais, a bacia não recupera o balanço hídrico, como acontece quando ocorre o crescimento da floresta natural.

Esses indícios levam a crer que parte do aumento das vazões sejam devido ao desmatamento da bacia incremental. A maior dificuldade é conhecer o real impacto do desmatamento sobre bacias do porte da bacia incremental do rio Paraná em Itaipu, um dilema da hidrologia de escala. As dúvidas principais do problema são as seguintes:

- O aumento do escoamento numa pequena bacia (de alguns hectares) devido ao desmatamento, pode ter seu efeito reduzido se, para a água se deslocar sobre a bacia, sejam criadas condições hidrológicas de evapotranspiração do escoamento excedente, que restitua, numa escala maior, as condições anteriores com florestas ou minimizem seus efeitos;
- Potencialmente as principais condições podem ser as seguintes:
 - (a) Maior extravasamento das vazões durante as cheias e como as cheias ocorrem no período de maior evaporação potencial, o excesso poderia ser restituído a atmosfera;
 - (b) a água no seu transporte pelos rios e no sub-solo, ao longo da bacia, permite que os volumes, antes interceptados e evaporados. Esses efeitos podem ser maiores ao longo de uma bacia grande.

Dessa análise observa-se que existem várias incertezas que dificultam uma identificação cabal, quantitativa de quais são as causas. Existem, na realidade, vários indícios. Portanto, a pergunta principal seria : *As alterações de vazões são permanentes ou transitórias?*

Essa pergunta é óbvia porque o aumento da disponibilidade hídrica influi em vários setores dos recursos hídricos como o de energia, abastecimento, irrigação, etc.. Sendo assim, reunindo os elementos até aqui tratados podemos concluir com o seguinte:

- Os indícios com os elementos até agora existentes mostram que o resultado do aumento (se não amostral) das vazões pode ser devido a composição de dois efeitos:
 - (a) aumento da precipitação no período; (b) modificação do uso do solo;
- O aumento da precipitação tem maior probabilidade de ser amostral, portanto não tem garantida a sua permanência, podendo passar no futuro por ciclos de menores precipitações;
- o aumento devido as modificações do uso solo devem ser permanentes;

Uma análise quantitativa aproximada com macro valores foi realizada considerando o seguinte:

- o aumento de vazão é menor nas bacias do Estado de São Paulo onde o desmatamento já tinha ocorrido muito antes de 1970, portanto é de esperar que as vazões analisadas possam, refletir apenas a variabilidade climática. Na tabela 2 observa-se que o aumento do coeficiente de escoamento entre os dois períodos não foi muito alto para as bacias do Grande e do rio Tietê. Analisando a relação entre precipitação e coeficiente de escoamento, verifica-se que os mesmos são compatíveis com o aumento de precipitação. Utilizando uma equação que trata este tipo de relação, obtém-se cerca de 20,9 e 34,6% de aumento de vazão, respectivamente. Na tabela 2 os valores são 18% e 34%. Isto indica que o aumento do coeficiente de escoamento e das vazões estão diretamente relacionado com o aumento de precipitação;
- nas bacias do Paranapanema e Incremental, onde o desmatamento ocorreu na década de 60 e a mudança de tipo de plantio depois de 1970 (veja itens anteriores),

observou-se aumento significativo no coeficiente de escoamento entre os dois cenários que não se justificam apenas pelo aumento da precipitação. Neste caso, utilizou-se a tendência entre C e P para determinar C_2 a partir de P_2 . Com C_2 , C_1 e $P/\Delta P$ estimou-se o aumento de vazão correspondente apenas devido a precipitação e obteve-se 35% e 20%, respectivamente. Na tabela 2 observa-se que estes valores são 45 e 44%. Numa avaliação simplista pode-se concluir que a diferença entre os valores 10% e 24% corresponderiam ao efeito do uso do solo nas duas bacias. Estes valores representam 25% e 55% da variação total no período, respectivamente;

Estas conclusões foram obtidas sobre dados macros e algumas simplificações, mas pode ser considerada uma estimativa inicial dos impactos observados nesta região.

Variabilidade das séries no rio Paraguai

A bacia do rio Paraguai mostrou ao longo do século vinte, significativa variabilidade hidrológica. Na figura 2 são apresentados os níveis máximos anuais em Ladário para o todo o período de registro. Pode-se observar que entre 1900 e 1960 os níveis máximos ficaram, em média da ordem de 4,00 m, enquanto que entre 1960 e 1972 da ordem de 2,00 m. Já entre 1973 e 1995 variou em cerca de 5,0 m.

Considerando que os leitos são móveis e a erosão e sedimentação são significativas as primeiras questões que foram investigadas são as seguintes: (a) a mudança do leito pode explicar as variações nível observadas na década de 60? ; (b) a escala de Ladário poderia ter mudado de posição ou local durante o período? (c) estas variações podem ser explicadas pela variação do uso do solo a montante? (d) estas variações podem ser explicada pela variabilidade climática ou modificação climática?

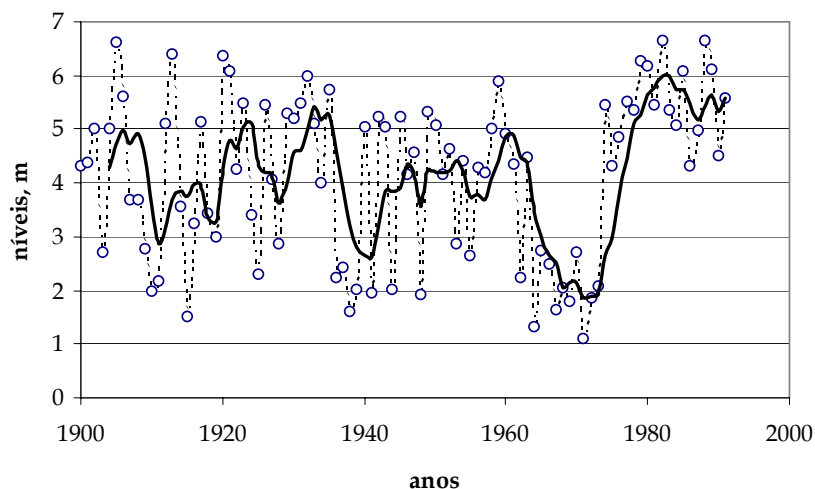


Figura 2 níveis máximos em Ladário e média móvel de 5 anos.

As duas primeiras questões podem ser descartadas, pois doutras bacias apresentam comportamento semelhante. Considerando as duas últimas questões, a resposta é mais complexa.

Na década de 70 ocorreram dois fatores importantes, o primeiro foi uma maior migração da população para o Planalto e a introdução do plantio de culturas anuais (como o soja) e aumento do rebanho de gado, principalmente no Planalto do rio Taquari. As culturas

anuais produzem dois efeitos fundamentais no ciclo hidrológico: aumento do escoamento médio pelo desmatamento e contínua alteração no solo e produção de sedimentos. O solo do Planalto do Alto Paraguai é muito frágil e a expansão do gado e soja geraram aumento significativo na produção de sedimentos. No entanto, a área ocupada pela soja é insignificante se compara com a área de gado (figura 3). Além disso, o solo onde o gado ocupa é pouco produtivo e frágil. Esta fragilidade facilita a erosão principalmente nos caminhos formado pela deslocamento dos rebanhos.

O segundo fator importante foi o aumento da precipitação que levou ao aumento da capacidade erosiva e da vazão média de enchente. Os resultados mostraram que no período da década de 60 as precipitações estiveram abaixo da média de longo período, da ordem de 15% (na média do período), durante todos os anos.

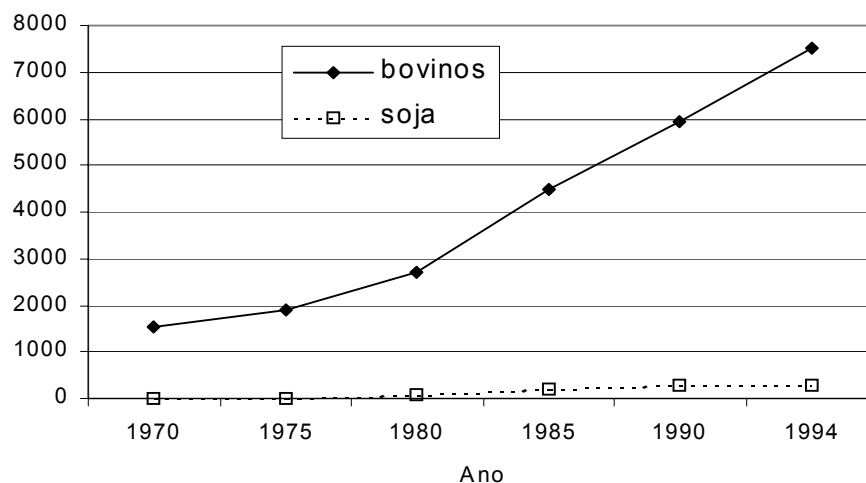


Figura 3 Área ocupada em (ha) (Collishonn,2001)

Collishonn (2001) analisou o efeito do uso do solo e da variabilidade da precipitação através de um modelo hidrológico. O modelo foi ajustado para o período após 1973 e elaborado o prognóstico para o período anterior a 1973. O modelo superestima os resultados para o período antes de 73, indicando que os parâmetros não representam as condições físicas deste período existindo componentes do uso do solo que não foram retratados. O modelo foi ajustado para o período anterior a 1973 e verificado para o período posterior, mostrando que tende a subestimar as vazões, resultado da alteração do uso do solo e não somente da variabilidade climática. O citado autor estimou preliminarmente que da alteração total de 200 mm para 500 mm, entre os dois períodos, o uso do solo corresponderia a valores entre 74 e 100 mm, sendo da ordem de um terço do total de alteração da variação do escoamento.

Variabilidade das vazões do rio Uruguai

O rio Uruguai apresentou alteração do cobertura do solo ao longo da segunda metade do século vinte. Quando se analisa a série adimensional (anomalias) no trecho inferior do rio Uruguai (figura 4) observa-se que o período após 1970 se mantém acima de todo o período anterior, flutuando num outro patamar de vazão média.

A importância destes períodos pode ser observada com os dados de anomalias de precipitação em Passo Fundo no Alto Uruguai (figura 5). Observa-se que a variabilidade de

precipitação é marcante na década de 40 (42-52). Utilizando as séries de vazões com dados à partir de 40 para o dimensionamento de um reservatório na parte superior da bacia obtém-se um volume útil 100% maior que o obtido com as séries iniciando em 1953 (Tucci, 1991).

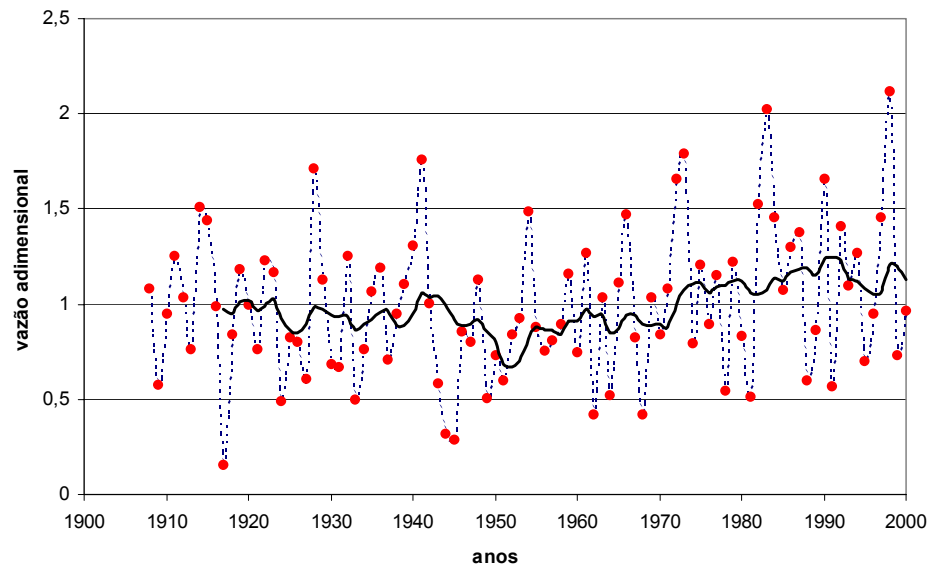


Figura 4 Média móvel de 10 anos das vazões no rio Uruguai em Paso de Los Libres.

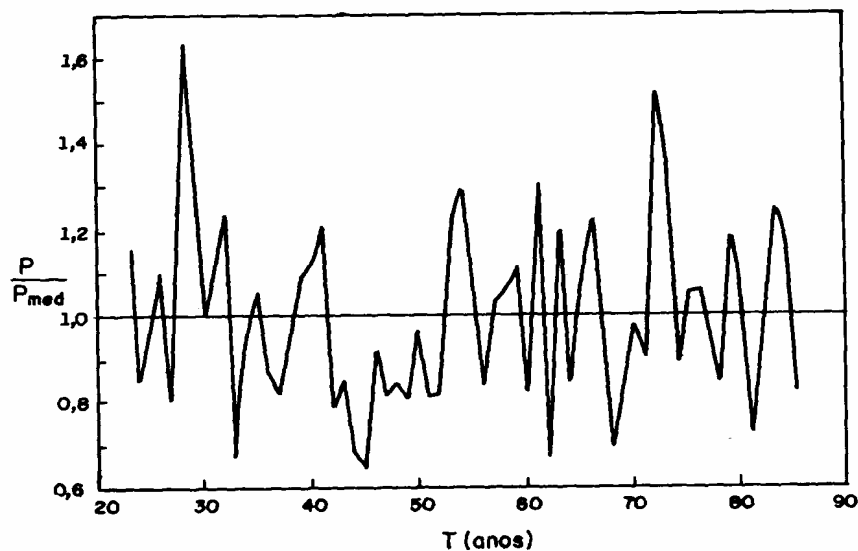


Figura 5. Precipitações anuais adimensionais em Passo Fundo no Alto Uruguai

Quanto ao uso do solo, a bacia do rio Uruguai apresentou significativas alterações no uso do solo depois dos anos 50 e mais recentemente depois dos anos 70 com o aumento das culturas de soja. Depois de 1994 houveram grandes alterações na prática agrícola, quando os agricultores passaram de plantio convencional para plantio direto. Este último tende a diminuir o escoamento superficial em detrimento do escoamento sub-superficial na cabeceira dos rios. Neste cenário se observa redução da erosão (quando os locais em que o sub-superficial é protegido), redução do escoamento superficial nas pequenas bacias, mas

nas maiores poderá existir a tendência de aumento da vazão em função do lençol freático se manter em níveis maiores (veja resultados no capítulo 1).

Collishonn (2001) apresentou resultados da avaliação do uso do solo para a bacia do rio Taquari, afluente do rio Jacuí no Rio Grande do Sul que é vizinha a cabeceira do rio Uruguai. O referido autor utilizou os parâmetros do modelo ajustado para a bacia do rio Taquari para estimar os resultados no rio Uruguai, com resultados bons, indicando que as duas bacias apresentam características semelhantes. Na tabela 3 são apresentados os resultados de simulação de alteração do uso do solo. O cenário atual apresenta aumento de escoamento de 9% em função do uso do solo. Transformando a bacia de floresta para culturas anuais o aumento do escoamento é de 14,4 %, para pasto é de 13,2 %. Portanto, o impacto atual do uso do solo já representa 69% do impacto máximo (pior cenário).

Este aumento de escoamento, apesar da conservação do solo também introduz outros efeitos de variabilidade ao longo do ano como o aumento da erosão e a poluição difusa apesar do controle das práticas agrícolas.

Tabela 3: Vazão média, lâmina escoada e aumento do escoamento em relação a situação hipotética 100 F (a coluna ΔQ indica a diferença de escoamento anual em relação a situação hipotética 100 F, em que a bacia está 100% coberta por florestas) (Collishonn,2001)

Situação simulada	Q M ³ .s ⁻¹	Q mm. ano ⁻¹	ΔQ mm.ano ⁻¹
ATUAL	653	765	62
100 F	600	703	0
90 F 10 P	607	712	9
90 F 10 L	608	713	10
100 P	679	796	93
100 L	686	804	101

L – culturas anuais P – pasto - F florestas

Análise Comparativa

Utilizando as séries mais longas dos rios Paraguai, Uruguai e Paraná no seu trecho inferior e obtendo a média móvel de 10 anos, obtém-se os resultados da figura 6. Pode-se observar que tanto o rio Paraná como Uruguai apresentam tendências semelhantes, mas o Uruguai apresenta maior variabilidade de curto prazo, características de uma bacia menor sem sazonalidade e memória (menor regularização natural). A bacia do rio Paraguai mostrou grande variabilidade entre a década de 60 e o período posterior, passando de um estado muito seco para um estado muito úmido.

As três séries mostram tendência semelhante quanto aos períodos úmidos e secos. Observe que as três curvas seguem uma tendência decrescente ao longo da primeira parte do século até cerca de 1970, quando todas três curvas começam aumentar e depois dos anos 80 ficam acima da média do período anterior.

Na figura 7 a relação de tendência entre a variação de pressão (padronizadas) entre o Tahiti e Darwin na Austrália, indicador das condições do Oceano Pacífico e as anomalias dos três rios.

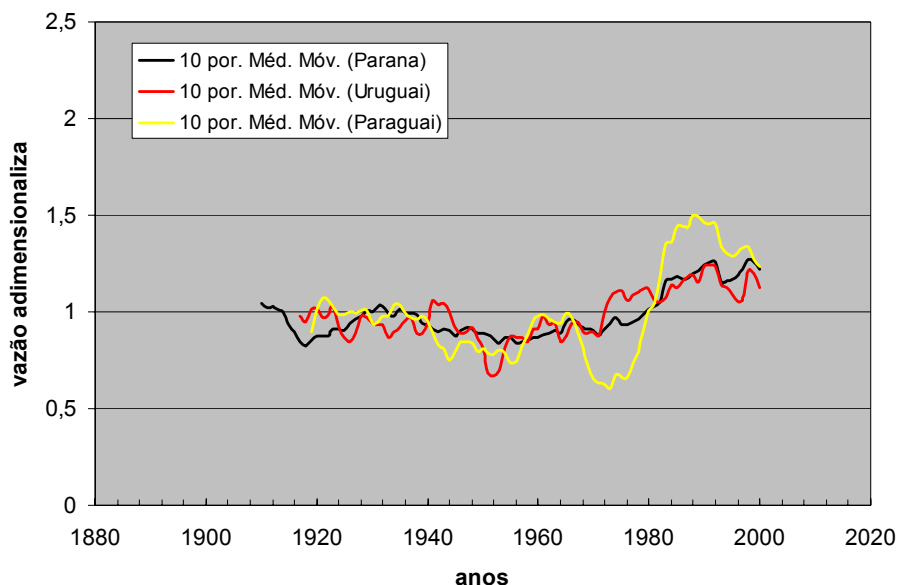


Figura 6 Média móvel de dez anos das vazões no rio Paraguai em Pilcomayo, Uruguai em Paso de Los Libres e Paraná em Posadas.

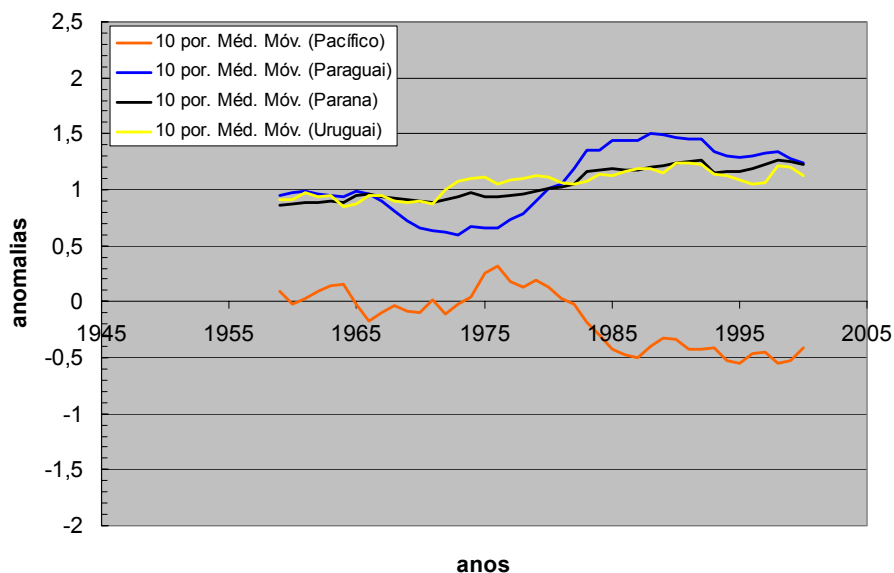


Figura 7 Comparação das anomalias de vazão com diferença de pressão do Tahiti e Austrália no Oceano Pacífico.

Observe a figura 8 onde se destacou a anomalia de pressão do Pacífico. Nesta figura os valores são negativos (temperaturas mais altas) ou com tendência decrescente, desde parte

da década de 70, oscilando nesta faixa até 2001. Este período coincide aproximadamente com o período de vazões acima da média das vazões observadas no rio Paraguai, Uruguai e Paraná. No período anterior existe também tendências inversas. O período de valores negativos indicam tendência de temperatura do mar mais alta do que quando estão positivos. Neste cenário existe maior evaporação do mar e maior umidade na atmosfera, potencializando maior quantidade de precipitação.

Estas relações podem ser utilizadas para previsão de longo prazo das tendências de aumento e diminuição da umidade nas bacias brasileiras do rio da Prata. Collishonn et al (2001) mostraram a complementaridade das séries de vazões entre a África e a América do Sul. Enquanto na África., desde de 1970 os períodos são muito secos, parte da América do Sul (bacia do Prata) passa por período úmido acima da média. Condições como estas levam a pergunta óbvia: será um comportamento da variabilidade natural ou impacto climático? Uma pergunta simples para um problema complexo que exige ainda muita avaliação detalhada e entendimento do que está ocorrendo.

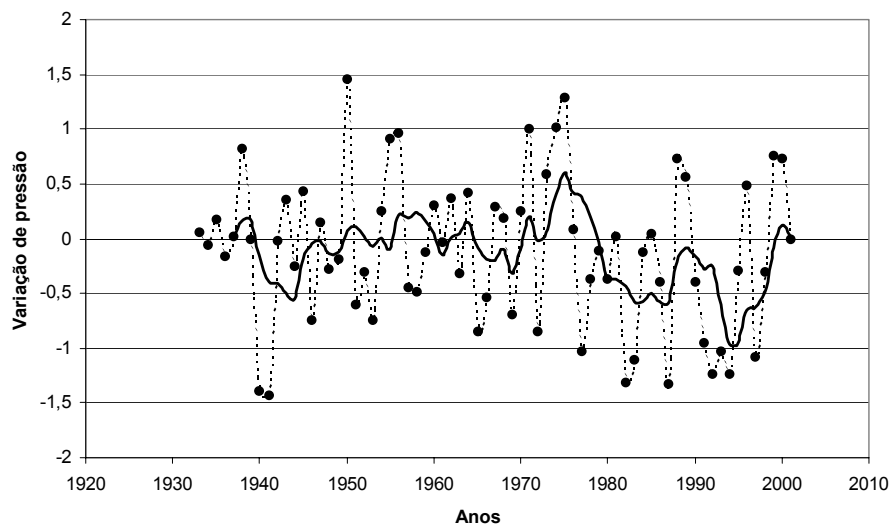


Figura 8 Anomalias da diferença de pressão entre Tahiti e Darwin no Oceano Pacífico e sua média móvel de 5 anos

Previsão de vazão

A *previsão* de vazão num sistema hídrico envolve a estimativa num determinado período de tempo desta variável. A *predição* é a estimativa da vazão sem relação com um período de tempo definido, como a vazão com um determinado nível de probabilidade de ocorrência num determinado local.

A previsão tem sido classificada em *curto prazo* ou tempo real ou previsão de *longo prazo*. A *previsão de curto prazo* ou previsão em tempo real (tradução mais fiel seria previsão em tempo atual) é realizada para antecedências de horas e dias em função do tempo de resposta das bacias hidrográficas e do conhecimento antecipado da precipitação, sua distribuição temporal e espacial. Este tipo de previsão é utilizada para o alerta das inundações ribeirinhas e da população, operação de obras hidráulicas como barragens, sistemas de comportas, entre outros.

Para caracterizar a previsão de longo prazo pode-se distinguir a antecedência de semanas, meses ou anos baseada em informações indiretas ou estatísticas locais (geralmente denominadas de predição). Recentemente, em função da ampliação da capacidade dos modelos climáticos pode-se distinguir a previsão de alguns meses com o uso interrelacionado de modelos climáticos e hidrológicos e a previsão de alguns anos que são mais uma predição do que uma previsão. A literatura internacional define longo prazo como a previsão de até 9 meses.

Este tipo de previsão é utilizada para o planejamento energético e formação de preço, para previsão de umidade do solo, condições básicas de navegação, inundações e secas em regiões críticas. Este tipo de previsão vem revolucionar a gestão dinâmica dos recursos hídricos.

A previsão com antecipação de vários anos, como a que vem sendo realizado sobre o impacto da modificação climática, tem a finalidade de analisar potenciais efeitos de variabilidade climática e modificação climática e seus efeitos sobre a sociedade. A análise de tendência de longo prazo são essenciais para preparar a sociedade para potenciais efeitos dos condicionantes climáticos. A história é pródiga em exemplos mostrando como as sociedades foram afetadas por períodos longos de secas ou inundações sobre a sua sustentabilidade e características (Diamond,1997). No capítulo seguinte são discutidos estes aspectos.

No capítulo anterior foram destacadas tendências que mostram a variabilidade da diferença de pressão do Pacífico com as vazões de três grandes rios da Bacia do Prata. A análise deste tipo de tendência é importante para buscar responder questões relacionados com as tendências de longo prazo.

Previsão de curto prazo: A previsão em tempo real praticamente não existe no Brasil, com raras exceções existem alguns sistemas funcionando em trechos de rios com previsão de pequena antecedência. Na década de 80 algumas empresas do setor elétrico implementaram sistemas de previsão como no caso da CESP em São Paulo, CEMIG em Minas Gerais e CHESF no São Francisco visando permitir gerenciar o volume de espera dos reservatórios hidrelétricos em face das exigências adotadas para compatibilizar inundações e produção de energia.

A previsão em tempo real é uma das principais medidas não-estruturais para controle de inundações e segurança de obras hidráulicas. No entanto, a prática brasileira tem sido de implementação de redes telemétrica, sem uma utilização desta informação associada a modelos matemáticos hidrológicos e climáticos, Centro de Previsão e Defesa Civil.

Neste documento são apresentados resultados de alguns usos da previsão em tempo real muito mais para caracterizar alguns aspectos que podem se interrelacionar com a previsão de longo prazo.

Previsão de longo prazo: A previsão de *longo prazo* pode ser realizada através de várias técnicas estatísticas, buscando similaridades com a relação a sazonalidade regional. Por exemplo, numa bacia onde o período chuvoso é bem definido, após o período chuvoso as vazões podem ser previstas para os próximos meses (secos) apenas pelo esvaziamento do aquífero através da equação de recessão (Villanueva, et al 1987). Da mesma forma, em regimes hidrológicos com grande capacidade de armazenamento e sazonalidade bem definida a magnitude das vazões pode ser estimadas com pequeno erro de variância entre anos. Em sistemas muito lentos as vazões máximas ou mesmo o hidrograma podem ser estimados com base no tempo de translado que pode levar alguns meses como rio Paraguai a jusante do Pantanal (Tucci e Genz, 1994). No entanto, na maioria dos sistemas hídricos que possuem memória de alguns dias e períodos chuvosos em grande parte do ano, as

técnicas usuais de previsão de médio prazo somente podem ser estatísticas quando não é possível prever a precipitação futura da bacia. Inicialmente foram utilizadas técnicas estatísticas para relacionar as anomalias de pressão e temperatura dos Oceanos com as vazões dos rios em algumas bacias como a do Pacífico e do rio Paraná. Os resultados, apesar de promissores ainda apresentam baixo grau de correlação para as práticas hidrológicas, no entanto, mostram que existem informações entre causa e efeito neste processo. Vários resultados na literatura mostram correlação entre as precipitações do Pacífico e o Sul do Brasil e recentemente com o Atlântico, mostrando que estes dois sistemas mostram sinais que poderiam explicar as vazões.

Com o uso de modelos climáticos para estimar as condições climáticas futuras foi introduzido recentemente a possibilidade de previsão de médio prazo através do uso da previsão da precipitação e evapotranspiração através do modelo climático e sua entrada no modelo hidrológico para previsão para alguns meses de antecipação. Desta forma, em resumo as alternativas de previsão aqui denominadas de *longo prazo* podem ser as seguintes:

- pela simples *estatística* sazonal das vazões num determinado local, prevendo-se sempre a sua média. Por exemplo, a média das vazões do mês de janeiro, fevereiro, março, etc seriam as previsões de vazões a serem utilizadas anualmente;
- por modelo *estocásticos* que consideram a sazonalidade, a interrelação temporal, os componentes aleatórios e mesmo variáveis de entrada como a precipitação para prever as vazões futuras;
- modelos *empíricos* que poderiam estar na classe anterior, mas que estabelecem relações entre variáveis climáticas indicativas, como temperatura ou diferença de pressão dos oceanos com a vazão dos rios;
- modelos determinísticos *climático* associados com modelos *hidrológicos*. O modelo climático estima as variáveis climáticas de entrada no modelo hidrológico que prevê as vazões.

Tucci et al (2002) utilizaram os quatro modelos citados acima comparando os resultados para a bacia do rio Uruguai. O modelo hidroclimático utilizado foi o da composição do modelo do CPTEC para previsão climática com seis meses de antecipação com o modelo hidrológico de grandes bacias (Collischonn e Tucci, 2001).

O rio Uruguai tem alto potencial hidrelétrico pequena memória e baixa sazonalidade, onde os métodos estocásticos pouco contribuem. O modelo climático apresentou previsão de precipitação com erro sistemático o que motivou a inclusão de alteração de uma correção estatística das precipitações geradas pelo modelo CPTEC.

A comparação foi realizada considerando o seguinte:

- precipitação conhecida (Mod 3): Esta situação permite identificar o componente do erro do modelo hidrológico na previsão e o patamar superior de redução do erro da estimativa do aprimoramento dos modelos climáticos;
- modelo CPTEC + modelo hidrológico (Modelo CH): situação da utilização das precipitações do modelo climático diretamente como entrada no modelo hidrológico e a simulação da vazão de saída;
- modelo CPTEC corrigido + modelo hidrológico (Modelo CHc): considerando que a maioria dos modelos climáticos tendem a subestimar a precipitação, foi adotada uma correção estatística, baseada em cada quadrícula do modelo hidrológico e para cada mês do ano. Esta técnica foi utilizada para um período e verificada para um período posterior.

Nas tabela 4 é apresentado o erro padrão da estimativa dos valores mensais de previsão para dois períodos e para a série total com os diferentes modelos. Pode-se observar que utilizando a média mensal dos valores históricos como base para comparação (coluna três), ou seja, modelo disponível e atualmente utilizado (os outros modelos não apresentaram contribuição ao erro padrão), o modelo climático –hidrológico (CH) (coluna 4) apresenta resultado pior para todas as séries. Isto indica que não existe ganho no uso direto destes dois modelos. Isto ocorre porque o modelo climático tende a subestimar a precipitação ocorrida. No entanto, para o modelo climático-hidrológico corrigido (CHc), que introduz a correção estatística na precipitação do modelo climático (coluna 5) observa-se redução do erro padrão da estimativa. Isto indica que como o erro da previsão de precipitação é sistemático é possível corrigir seu resultado e obter uma redução importante do erro padrão da estimativa. A última coluna, mostra que se conhecêssemos a precipitação (previsão perfeita pelo modelo climático) a redução máxima do erro padrão seria obtida. Observa-se que existe espaço para melhora tanto do modelo climático como para o modelo hidrológico.

Tabela 4 Resumo de comparação das previsões em termos de erro da previsão de vazão mensal (RMSE – m³/s) (Tucci et al, 2002)

Período	Observação	média mensal	CH	CH _c	Mod3
dez/1995 a dez/1998	período completo	2069	2178	1331	558
jun/1999 a out/2001	período completo	1299	1661	1198	–
	sem Itá e Machadinho	1369	1818	1087	–
dez/1995 a out/2001	período completo	1785	1976	1276	–
	sem Itá e Machadinho	1839	2051	1245	–

Predição climática dos modelos GCMs : A avaliação do impacto climático é realizada com base no uso de modelos GCMs (Modelos Globais Climáticos) entre cenários de aumento dos gases do efeito estufa na atmosfera. Estes estudos tem sido realizados para diferentes bacias a nível mundial. No Brasil, Damiani e Tucci (1994) apresentaram um estudo desta natureza para a bacia do rio Uruguai que é reproduzido a seguir nos seus aspectos mais importantes.

As predições utilizadas no estudo são dos modelos climáticos GISS (Goddard Institute for Space Studies), GFDL (Geophysical Fluid Dynamic Laboratory) e UKMO (United Kingdom Meteorological Office). Na discretização do Globo, apenas uma "caixa" representa a bacia do rio Uruguai nos dois primeiros modelos e no segundo duas "caixas", denominadas aqui de UKMO1 (Alto Uruguai) e UKMO2 (Médio e Baixo Uruguai). Estes modelos simularam dois cenários: 1x CO₂, que representa a quantidade de CO₂ existente na atmosfera nos anos sessenta e; 2xCO₂ a duplicação do CO₂ na atmosfera, previsto para a metade do próximo século. O modelo GISS apresentou também um cenário intermediário previsto para a primeira quarta parte do próximo século, chamado aqui de GISS-T. A duplicação do CO₂ inclui a adição de outros gases e, é baseada na permanência da atual tendência de emissão de gases. As saídas dos modelos climáticos foi utilizada num modelo hidrológico que foi ajustado para a bacia.

O resumo dos resultados mostrou o seguinte: o modelo GISS estima melhor tanto as temperatura observada como a precipitação para o cenário atual. Foi prevista redução da precipitação anual de 5% para o modelo GISS no cenário futuro. Na vazão média: a) o modelo GISS prevê uma redução de 9,62 a 14,14%; b) o modelo GISS-T apresenta uma redução de 6,9 a 14,1%; c) o modelo GFDL prevê aumento de 13,9 a 32,5% (principalmente devido ao aumento significativo da precipitação de outubro) e; d) UKMO prevê redução de 2,4 a 2,6 % para as bacias de montante e aumento de 4,8 a 21,2% para as bacias de jusante. Estes resultados apresentam conflitos de tendências quanto ao impacto; Quanto a vazão mínima todos os modelos prevêem redução de vazão, principalmente em dezembro.

Nas figura 9 é apresentada a precipitação e as curvas de vazões médias específicas para dois cenários para prognósticos dos modelo GISS. As principais observações sobre estes resultados são: a) O modelo GISS prevê redução de vazão de abril até o final do ano, o que significa a redução de vazão média do início da estação chuvosa até dezembro, quando já iniciou a estação seca. Isto pode deslocar o período crítico de estiagem para outubro-dezembro; b) a versão GISS-T prevê valores semelhantes aos da versão GISS, o que indica que as conseqüências climáticas poderão ocorrer antes do horizonte esperado;

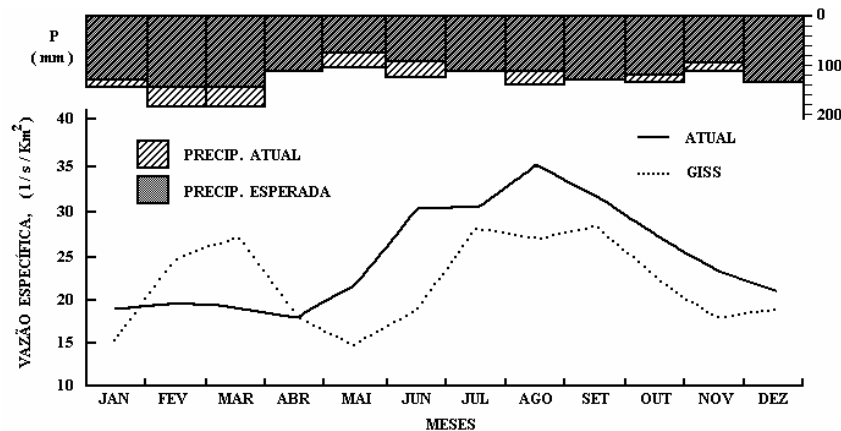


Figura 8 Cenário de alteração da vazão específica média do rio Uruguai com base nas previsões do GISS

Impactos variabilidade nos sistemas hídricos

O desenvolvimento dos recursos hídricos ao longo do século vinte foi baseado em técnicas desenvolvidas por engenheiros para o dimensionamento e planejamento de sistemas hídricos. A base de todas estas técnicas é a estatística da série histórica das vazões medidas nos rios. Portanto, admite-se de início os seguinte princípios básicos:

- As séries de vazões são homogêneas ou estacionárias, ou seja as suas estatísticas não variam com o tempo;
- as amostras utilizadas são representativas.

A série é estacionária quando as estatísticas da série não se alteram com o tempo. A não-estacionariedade pode ocorrer por um ou mais dos seguintes fatores:

- variabilidade climática no período de amostra;

- modificação climática;
- modificação do uso do solo.

A variabilidade climática e a representatividade da amostra são condicionantes semelhantes, já que a falta de representatividade de uma amostra de dados observados pode não mostrar todas as variabilidades da população estatística da série. Os dois últimos fatores representam efeitos antrópicos sobre o sistema.

O que se observa é que existem poucas séries com período superior a 80 anos e somente nas últimas décadas aumentaram em diferentes partes do globo o número de séries longas, evidenciando as características interdecadal dos processos climáticos e hidrológicos. Existem séries de variáveis climáticas como temperatura obtidas por correlação com amostras de gelo ou de precipitação estimadas com base nos anéis de árvores, no entanto são informações indiretas que permitem uma idéia do comportamento, mas se diferenciam dos valores efetivamente observados.

O conhecimento do comportamento climático tem sido avaliado com base em séries de dados, na maioria de 20 a 50 anos de dados hidrológicos. São raras as séries com tamanho próximas de 100 anos. Desta forma, grande parte das pesquisas da variabilidade e comportamento do clima se basearam em amostras de períodos curtos que podem ser tendenciosos.

Tucci e Clarke (1998) e Collischonn et al (2001) mostraram, que bacias de grande porte na América do Sul (rio Paraguai e Paraná) e na África apresentavam períodos longos com tendências diferentes. Enquanto na América do Sul apresentou aumento de precipitação e vazão após 1970, na África houve redução substancial. A questões que facilmente aparecem quanto as causas são: serão estas tendências de longo prazo que a ciência não conseguiu identificar devido aos períodos curtos das informações ? Este comportamento pode ter sido influenciado por condições antrópicas como o uso do solo ou o aquecimento devido ao efeito estufa? A respostas a estas questões requer um esforço importante de ciência dentro de uma visão integrada e global dos processos hidroclimático a nível global e de mesoescala. No capítulo 4 foi analisado este aspecto dentro da bacia do Prata, onde ficou evidente que ocorreram efeitos combinados do clima e do uso do solo, de difícil separação.

De outro lado, mesmo que não exista um entendimento completo e não seja possível prever com antecedência estes processos é necessário entender os impactos que a sociedade está sujeita devido a estas variabilidades para que sejam planejadas medidas mitigadoras.

A principal conclusão retirada desta análise é de que **é necessário revisar as práticas de projeto e planejamento baseada no conceito de séries estacionárias. As séries devem ser revistas e desenvolvidas práticas de tratamento de séries não-estacionárias.**

Impacto sobre os diferentes setores dos recursos hídricos

Na tabela 5 é apresentado um resumo das avaliações sobre cada um dos aspectos de recursos hídricos analisados e suas fragilidades frente as variabilidade hidrológica em face das informações existentes.

Tabela 5 Impactos Potenciais da variabilidade climática nos recursos hídricos

Recursos hídricos	Impactos potenciais
Abastecimento de água	<ul style="list-style-type: none"> • Regiões semi-áridas onde a disponibilidade é pequena, independentemente da regularização; • localidades abastecidas por rios de pequena bacia sem regularização, mesmo tendo uma vazão média alta. Nas cabeceiras do rio Uruguai é comum encontrar comunidades nestas condições que sofrem freqüentes racionamento por falta de regularização; • mananciais urbanos com demanda acima da capacidade da disponibilidade hídrica, como em parte da Região Metropolitana de São Paulo, onde a demanda retirada para abastecimento é superior a disponibilidade de alguns mananciais; • redução da disponibilidade pela poluição dos sistemas hídricos devido ao ciclo de contaminação urbano (Tucci, 2002).
Irrigação	<p>Com a implementação da regulamentação do uso da água e da cobrança, poderão ocorrer dois processos opostos na área rural: (a) redução da demanda da irrigação nos projetos existentes devido à cobrança e à racionalização do uso da água, criando melhores oportunidades para a sustentabilidade regional da atividade, com obediência aos acordos e às decisões dos comitês de bacia; (b) aumento de conflitos, com dificuldades na implementação das decisões dos comitês e de restrições de diferentes naturezas. Provavelmente, o País deverá registrar os dois tipos de processos, mas é esperado que o primeiro predomine.</p> <p>Fragilidades observadas: (a) No Semi-árido observa-se em algumas áreas tendência declinante da precipitação como agravamento da disponibilidade hídrica e aumento do conflito dos usos; (b) região Sudeste e Sul houve aumento da disponibilidade o que levou muitos agricultores a desprezarem a irrigação e assumir o risco, que num cenário decrescente poderiam produzir prejuízos; (c) No Sul aumento do conflito da irrigação e abastecimento na previsão de redução de disponibilidade</p>
Energia	<p>Capacidade : O sistema elétrico brasileiro, mesmo com o período de vazões altas atual, está no limite de atendimento da demanda (como citado acima). Condições climáticas mais desfavoráveis resultariam em condicionantes críticos ao desenvolvimento econômico brasileiro, mantidas as tendências de aumento da demanda e de reduzida ampliação da oferta. O risco de um sistema ajustado de demanda e oferta é o da externalidade climática de longo prazo, que pode comprometer o desenvolvimento econômico de um período, considerando a inércia de ajuste do sistema.</p> <p>Previsão e volume de espera: O mercado atacadista de energia, que entrará em funcionamento nos próximos anos, dependerá, de forma significativa, da previsão das condições climáticas de curto e médio prazo. Provavelmente haverá um importante desenvolvimento tecnológico neste setor, em função do prêmio do conhecimento prévio dos condicionantes que norteiam os preços. A previsão de curto prazo pode contribuir para redução do volume de espera permitindo: (a) maior segurança as barragens e aos trechos de jusante da mesma; (b) Melhorar a produtividade da Usina mantendo a mesma condição de risco para a barragem a jusante.</p>
Navegação	<p>O cenário do transporte do país está muito concentrado no rodoviário e a capacidade deste sistema está no limite. A tendência é de ampliação dos outros meios de transporte na medida que o país se sofisticava e cresce. O transporte hidroviário interior deverá se incrementar, principalmente em função das grandes áreas de produção agrícola no Centro-Oeste do país. O transporte hidroviário é fortemente dependente da variabilidade dos níveis dos rios e de sua previsão de curto e médio prazo, além das estatísticas destes níveis. A carga transportada por um barco depende do calado do rio. Como seu transporte pode demorar vários dias em rios como Paraná, Paraguai, Jacuí, Amazonas, entre outros é necessário prever com antecedência os níveis para estabelecer a carga a ser transportada. Da mesma forma em termos de condições médias futuras é possível avaliar os custos de transporte em função dos níveis de água e a capacidade de transporte das embarcações. Como a maioria dos rios não possuem regularização para navegação (com poucas exceções, como no Tietê e o Jacuí, ainda com conflitos com outros usos) o impacto de períodos longos acima ou abaixo dos conhecidos pode comprometer o preço e a viabilidade do transporte hidroviário.</p>

Tabela 5 (continuação)

Inundações	Os principais impactos sobre a população ocorrem devido a falta de: (a) conhecimento sobre a ocorrência dos níveis de inundações e; (b) do planejamento da ocupação do espaço de acordo com os riscos de ocorrência das inundações. O cenário comum de impacto é decorrência do seguinte: a população ocupa a várzea de inundação quando ocorre uma seqüência de anos de níveis anuais máximos pequenos, já que áreas planas são propícias ao assentamento. Quando retornam os anos com maiores inundações os prejuízos são significativos e a população exige dos governos uma ação no sentido de construir obras de controle como barragens, entre outros.
Qualidade da água e Meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> • Períodos mais secos como ocorreram antes de 70 podem representar um menor capacidade de diluição e, piora da qualidade da água dos rios; • de outro lado, intensificando as precipitações nos centros urbanos devido ao efeito de aquecimento das superfícies urbanas e processos convectivos, as cargas pluviais representarão custos maiores para melhoria da qualidade da água; • o desmatamento e a expansão das áreas agrícolas tenderão a ampliar a carga difusa rural sobre os sistemas hídricos, além de reduzir a capacidade de regularização natural das bacias. No entanto, a expansão do uso do plantio direto pode ser uma atenuante neste processo, apesar de ainda não se dispor de avaliação adequada das cargas de pesticidas e outros compostos.

Estudo de Caso do impacto devido a modificação climática

Os resultados apresentados a seguir são transcritos de Tucci e Damiani (1994) que analisaram o impacto das modificações climáticas na bacia do rio Uruguai. Em item anterior foram apresentados os resultados de estimativa das vazões e regionalização das funções hidrológicas para os dois cenários estudados: (a) cenário 1 xCO₂ representado pelo estado do final da década de 80; (b) cenário 2xCO₂ ou seja a duplicação da quantidade de Dióxido de Carbono na atmosfera esperado para metade do século atual.

O estudo analisou, através de amostragem, o impacto da modificação climática pelas estimativas dos dois cenários para os diferentes usos da água. Além da avaliação dos impacto foi também discutida as medidas mitigadoras. Na tabela 6 é apresentada uma síntese dos resultados.

Estudos estratégicos no cenário brasileiro

Foram destacados diferentes aspectos nos quais os recursos hídricos podem sofrer alterações e fragilizar o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental dentro cenário brasileiro relacionado com recursos hídricos. Neste capítulo são discutidos e apresentadas alternativas que podem ser desenvolvidas visando:

- melhor conhecer e entender os impactos potenciais das alterações climáticas e do uso do solo sobre os recursos hídricos, seus usos e conservação do ambiente;
- planejar potenciais medidas mitigadoras em associação com as ações existentes de gerenciamento dos recursos hídricos.

Para desenvolver estes objetivos são apresentados na tabela 7 estudos potenciais recomendados neste estudo.

Tabela 6 Síntese dos resultados do estudo de caso no rio Uruguai

Uso	Resultado
Energia	Resultados contraditórios foram obtidos de acordo com o modelo GCM. Aqueles obtidos com base no GISS estimam redução de produção de energia de 5%, o que significa redução de 1800 GWh/ano, equivalente a uma usina de 375 MW. Para recuperar esta energia o investimento ficaria da ordem de US\$ 560 milhões (1500 dólares/kW). O modelo UKMO estima redução de 2,5% e 468 GWh/ano ou uma usina de 97 MW. Já o modelo GFDL prevê aumento de 17,3%, que poderia aumentar a produção em 4900 GWh/ano. Estes números se referem aos aproveitamentos analisados e não à totalidade dos aproveitamentos da bacia
Inundação	<p>Pode-se observar destes resultados que o prognóstico dos modelos GISS e UKMO são benéficos já que é prevista uma redução das áreas ribeirinhas sujeitas a inundação mais freqüente. No entanto, o modelo GFDL prevê aumento significativo das áreas de inundações, principalmente devido ao aumento anômalo da precipitação de outubro. O prognóstico deste modelo provavelmente é uma distorção da simulação. Estes valores chegariam a representar aumento de nível da ordem de 4 metros nestas cidades para o mesmo risco, o que indicaria que as mesmas estariam quase todas cobertas por inundação para um risco de apenas 10 anos.</p> <p>Para analisar o impacto sobre grandes obras hidráulicas projetadas na região, como vertedouro de barragens, utilizou-se uma bacia hipotética de 15.000 km². O modelo GISS apresentou redução de vazão de 10%, o GFDL acréscimo de 57% e o UKMO redução de 1,7%.</p>
Abastecimento de água	A fonte de disponibilidade hídrica foi analisada considerando (a) regularização através de um reservatório; b) sem regularização. No caso a ocorre redução da demanda garantida para as diferentes faixas de vazão regularizada, cerca de 12-14% no cenário do GISS, 8-12%no cenário do GFDL e redução de 3 a aumento de 7% no caso do UKMO. Para o aproveitamento sem regularização observa-se 16,7% de redução da demanda no cenário GISS, 1,7 % para GFDL e aumento de 20% no caso do UKMO. Este último resultado pode ser tendencioso pois envolve a extrapolação inferior da curva de regularização.
Irrigação	o aumento da demanda de na irrigação com base no prognóstico do modelo GISS para soja/milho e arroz de 11%, aumento de 26% para as necessidades de irrigação média e para o ano crítico 9%. Para o arroz a previsão de aumento de demanda foi de 6,5%; o aumento das necessidades de irrigação média é de 2% e 9% para o ano crítico.
Qualidade da água	Agravamento da qualidade da água na estiagem devido a diminuição da vazão.

Tabela 7 Estudos estratégicos potenciais

Título	Objetivo
Estimar os cenários de modificação climática	estimar os cenários de modificação climática, de acordo com os cenários do IPCC e avaliar os efeitos sobre os usos dos recursos hídricos e medidas mitigadoras potenciais
Avaliação das tendências de longo prazo entre as séries hidroclimáticas	desenvolver o entendimento e a predibilidade da variabilidade inter-decadal do comportamento hidrológico de grandes bacias brasileiras
Planejamento do espaço de risco de inundação	analisar os condicionantes de riscos produzidos pelas séries hidrológicas e climáticas relacionados com a ocupação de espaço urbano e rural.
Impacto da variabilidade hidrológica e da modificação climática sobre os setor elétrico e sua adaptabilidade	Quantificar o impacto da variabilidade hidrológica e da modificação climática sobre o sistema hidrelétrico brasileiro e potenciais medidas mitigadoras
Previsão de Vazão	desenvolver a previsão de curto e longo prazo para minimizar o impacto dos eventos críticos e o planejamento de setores energético e agrícola
Avaliação do impacto do uso do solo sobre bacias e biomas brasileiros	avaliação do efeito do uso do solo nas bacias de grande porte em alguns biomas brasileiros
Avaliação do balanço de carbono dos sistemas naturais brasileiros	programa Quantificação de absorção e emissão de gases do efeito estufa dentro dos sistemas brasileiros

1. PROCESSOS HIDROCLIMÁTICOS NOS RECURSOS HÍDRICOS

1.1 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 $5,5 \cdot 10^5 \text{ km}^3$ de água é evaporada, utilizando 36% de toda a energia solar absorvida pela Terra, cerca de $1,4 \cdot 10^{24}$ 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 $5 \cdot 10^9 \text{ MW}$ 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 números médios aproximados desse ciclo podem ser observado na figura 1.1. 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 ($1.350 \cdot 10^5 \text{ m}^3$), as geleiras ($25 \cdot 10^5 \text{ m}^3$) e os aquíferos ($8,4 \cdot 10^5 \text{ m}^3$). Os rios e lagos, biosfera e atmosfera possuem volumes insignificantes se comparados com os acima.

1.2 Descrição dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica

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, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo, enquanto que o longitudinal pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo), observe a figura 1.2.

O balanço de volumes na bacia depende inicialmente dos **processos verticais**. Na figura 1.3 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.

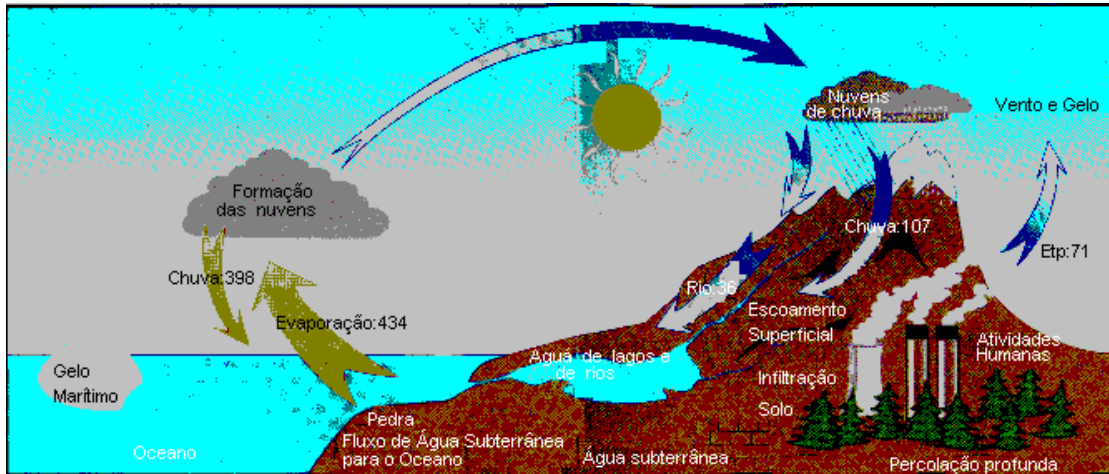


Figura 1.1 Ciclo Hidrológico Global (GRDC,1996)

A precipitação atinge o solo por (figura 1.4): (a) atravessando a vegetação da floresta (em média 85% da precipitação incidente) ou; (b) 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 aquífero 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 aquífero 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.

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 1.2, 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 1.5a 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 escoar até o rio. No entanto, existem áreas onde praticamente não ocorre escoamento superficial (figura 1.5b), 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.

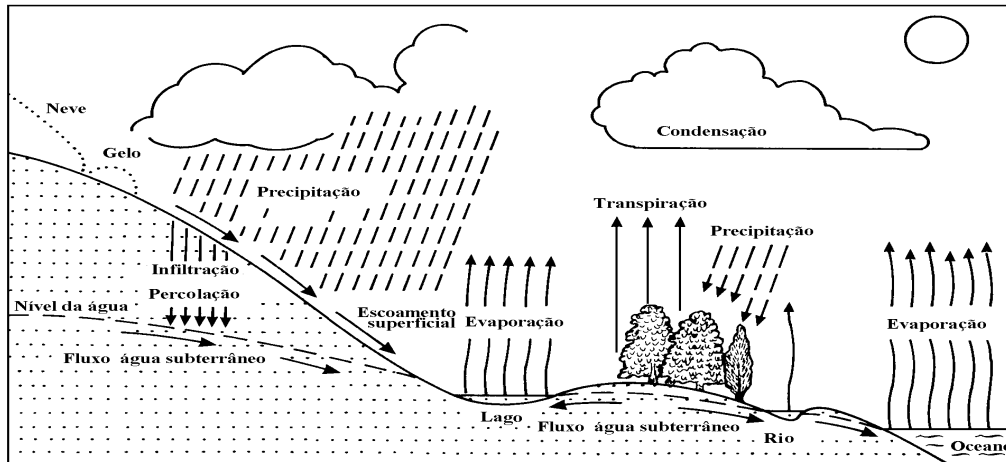


Figura 1.2 Ciclo hidrológico terrestre (IGBP, 1993)

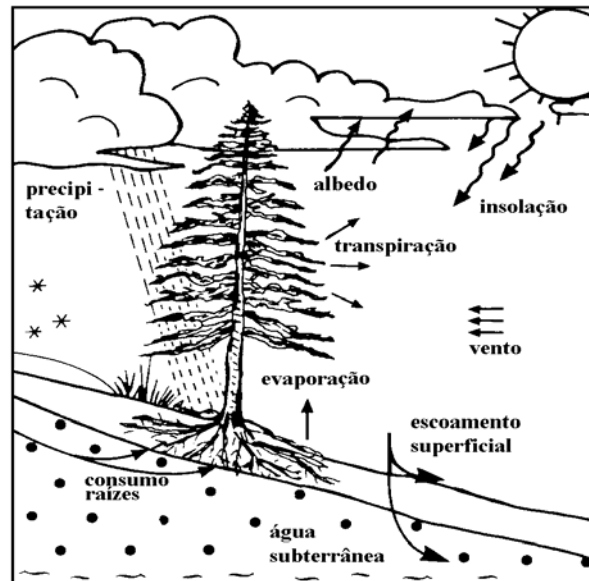


Figura 1.3 Processos na bacia (IGBP, 1993)

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 escoar na maior parte do ano e o leito maior (utilizado quando o rio transborda), 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 frequência das vazões. O tempo de retorno da cota

correspondente a definição do leito menor está entre 1,5 e 2 anos. O valor médio dos postos fluviométricos no rio Alto Paraguai é de 1,87 anos (Tucci e Genz, 1995).

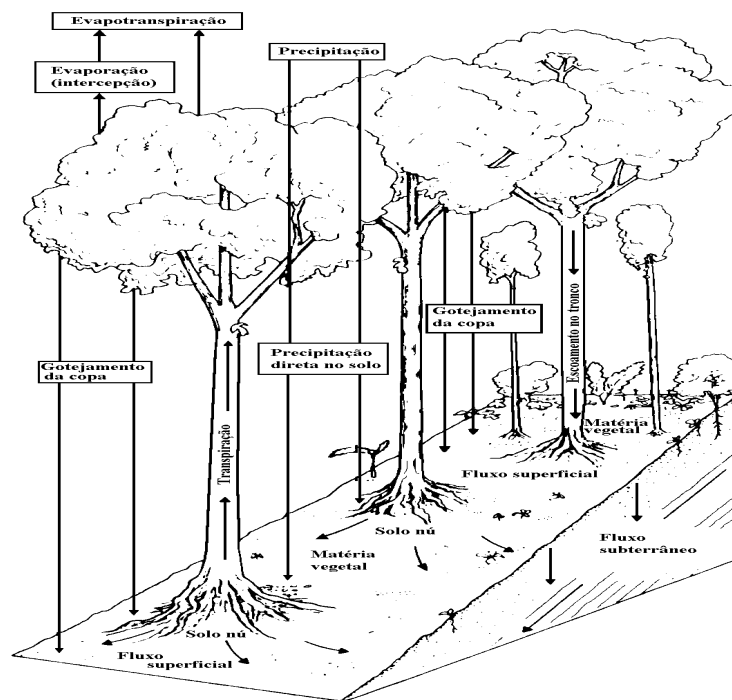


Figura 1.4 Processos de Interceptação vegetal na bacia (Bruijnzeel,1990).

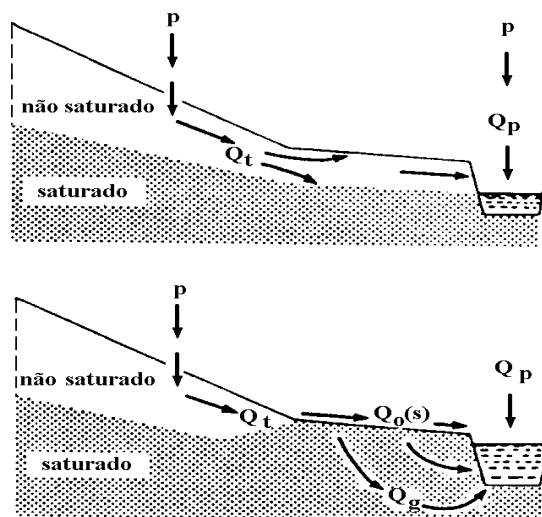


Figura 1.5 Escoamentos na bacia: (a) escoamento hortoniano; (b) áreas de saturação (Bruijnzeel,1990).

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 interferência 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.

1.3 Ações antrópicas sobre os sistemas hídricos

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 1.1 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.

Tabela 1.1 Classificação sobre a mudança e uso do solo

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	<ul style="list-style-type: none"> • desmatamento • reflorestamento • impermeabilização
O uso da superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Urbanização • reflorestamento para exploração sistemática • desmatamento : extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas permanentes
Método de alteração	<ul style="list-style-type: none"> • queimada • manual • equipamentos

1.3.1 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.

1.3.2 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 1.1. Num primeiro estágio ocorre aumento na vazão média, com redução da evapotranspiração, devido a retirada da cobertura. Com o crescimento da vegetação (figura 3.6 chega a cerca de 20 anos) o balanço tende a voltar as condições iniciais devido as recuperação das suas condições prévias.

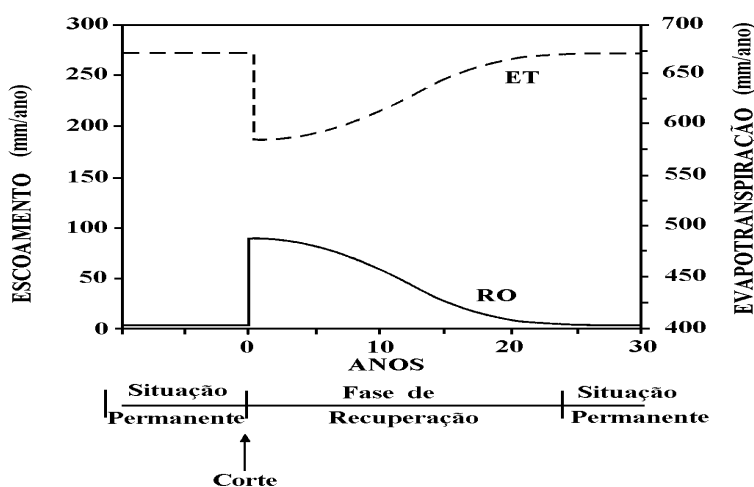


Figura 1.6 Modificações no escoamento e evapotranspiração devido ao desmatamento numa bacia no Sul da África (Vörösmarty et al,1991)

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 1.6 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 (aração) 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 por comprimentos (que dependem das características de relevo) até chegar ao sistema de drenagem natural. 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 aquífero. Silva (2001) mostra que o efeito do plantio direto depende da dimensão da bacia. Em bacias de 12ha a 1 km² o escoamento superficial diminui, mas para um bacia de 19 km² o escoamento superficial aumenta (vazão média de cheia). Nas bacias menores o escoamento ocorre como sub-superficial, na maior o conjunto da contribuição sub-superficial já encontrou a rede de drenagem natural e escoou como superficial.

1.3.3 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).

1.3.4 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 classificados em três grupos principais:

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;

- **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;
- **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.

1.3.5 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.

1.3.6 Impacto do desmatamento sobre o escoamento

O efeito do desmatamento sobre o escoamento deve ser separado de acordo com o efeito sobre a : (a) vazão média; (b) vazão mínima e; (c) 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 do 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 1.7, 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.

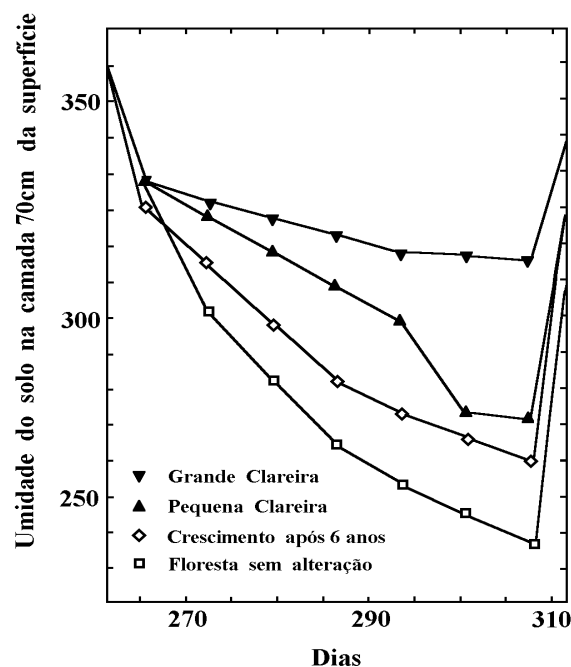


Figura 1.7 Umidade do solo (mm/70cm) numa floresta sem alterações, com crescimento de 6 anos em clareiras estreitas ou largas durante a temporada seca na Costa Rica (Parker, 1985, apud Bruijnzeel, 1996)

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 1.3.1).

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.

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 1.3.2) 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:

- 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 1.7);
- não é possível detectar influência na vazão média quando o desmatamento é menor que 20%;
- 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 Bosch e Hewlett acrescentando os dados até a data da publicação. As principais conclusões do autor foram as seguintes:

- 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;
- 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 1.2 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 1.3 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.

Tabela 1.2 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

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 1.8 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 1.9 pode-se observar a comparação entre as duas bacias para os períodos úmido e seco.

Tabela 1.3 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 limpeza manual	plantio direto	2,6	3,0	6,6
	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 <i>tree-pusher</i>	sem preparo	3,2	153,0	170,0
trator <i>tree-pusher</i>	preparo convencional	4,0	250,0	330,6

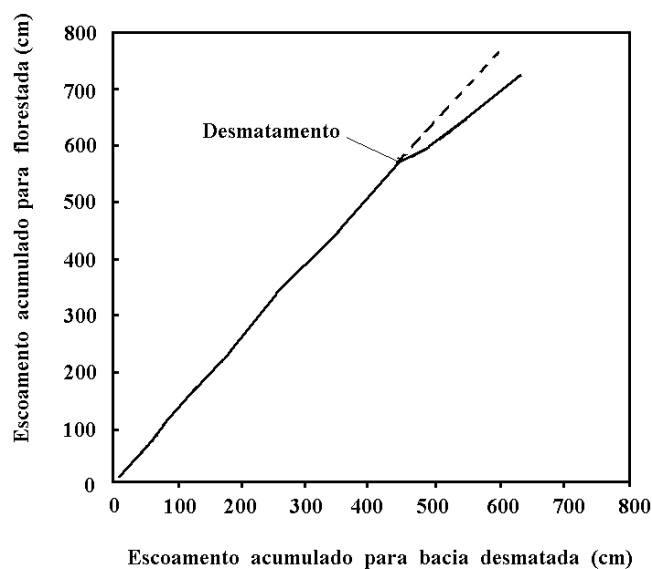


Figura 1.8 Identificação do desmatamento na relação de dupla massa (Hsia e Koh, 1983)

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 1.10 e 1.11). 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.

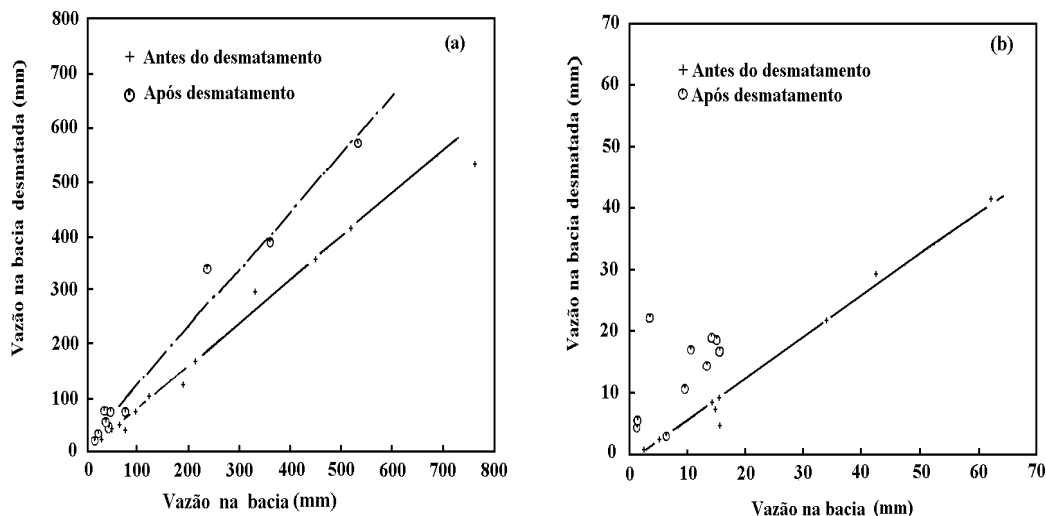


Figura 1.9 Relações entre as vazões na bacia desmatada e na bacia preservada em Taiwan (Hsia e Koh, 1983)

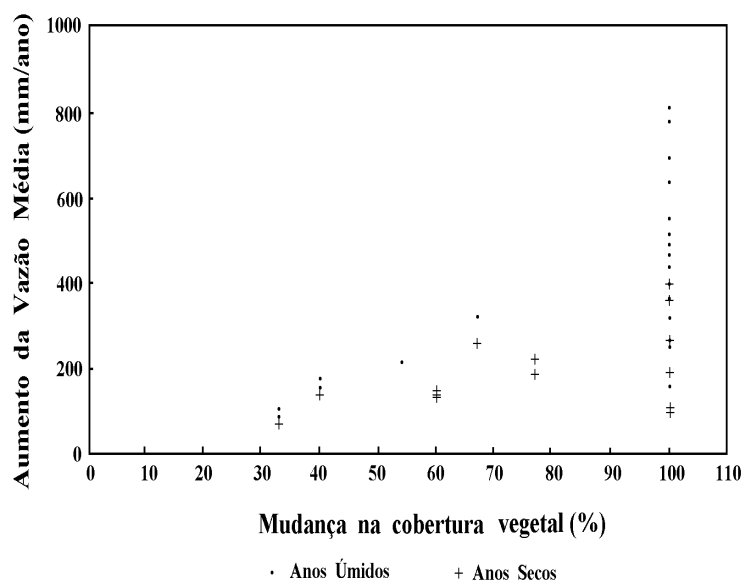


Figura 1.10 Aumento da vazão média (mm/ano) durante os primeiros três anos após o desmatamento versus a percentagem da área desmatada (Bruijnzeel, 1996).

O artigo mais recente de Sahin e Hall (1996) analisaram estatisticamente todos os experimentos disponíveis e resumiu os principais elementos, reproduzidos na tabela 1.4. Dos resultados médios, pode-se observar que o desmatamento de florestas com precipitação menor que 1.500 mm tem como consequência 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 1.5 são apresentados os aumentos de escoamento permanentes, após o desmatamento de florestas tropicais, de acordo com a cultura mantida.

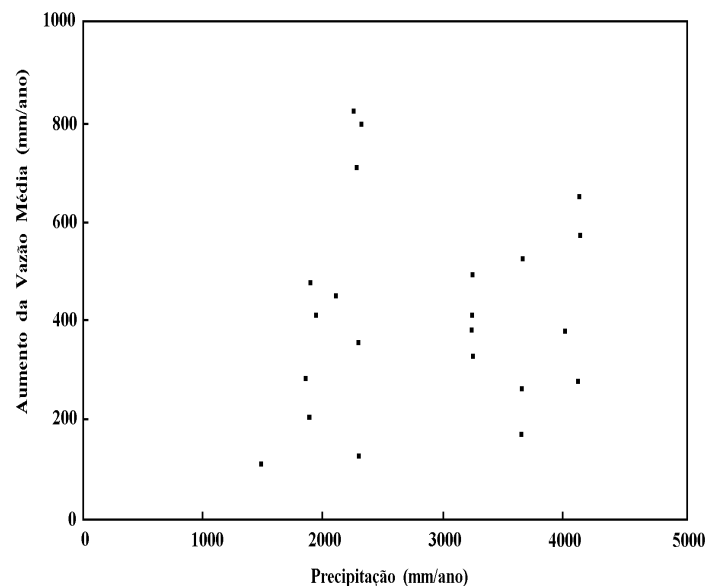


Figura 1.11 Aumento da vazão média versus a precipitação anual (Bruijnzeel, 1996)

Tabela 1.4 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
<i>Hardwood-conifer</i>	201	22
Floresta tropical	213	10
<i>Hardwood</i> (< 1500mm)	201	19
<i>Hardwood</i> (> 1500 mm)	169	17
Savana	92	9

Tabela 1.5 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 todos 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.

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 aquífero. De outro lado, se a água que não é perdida pela floresta, atinge o solo e infiltra, o aquífero tem uma maior recarga, aumentando as vazões mínimas (veja figura 1.10).

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 sequência de três eventos durante um período maior. Na primeira (figura 1.12), o escoamento da bacia florestada foi de 0,02 mm e da bacia com vegetação rasteira foi de 16,8 mm. Na segunda (figura 1.13), 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 sequenciais de grande intensidade a diferença diminuiu.

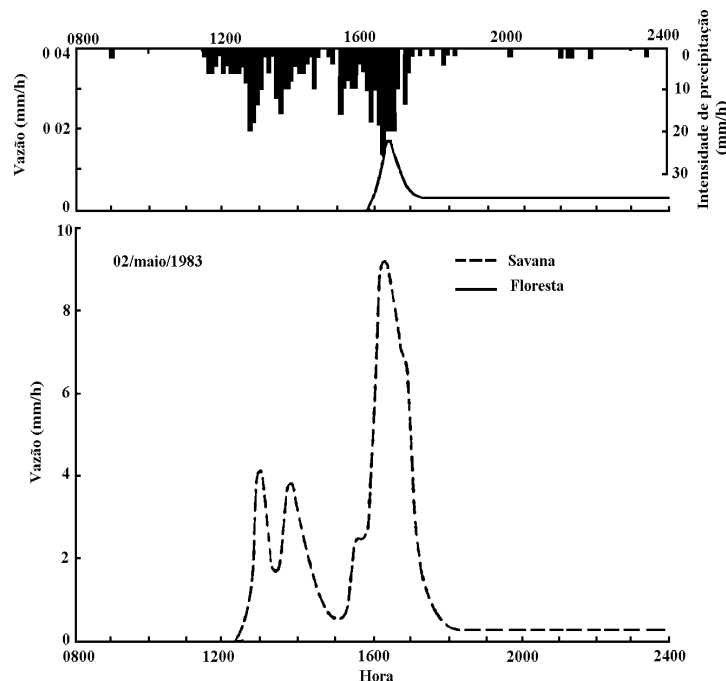


Figura 1.12 Evento num período de estiagem em duas bacias experimentais na Austrália (Burch et al, 1987)

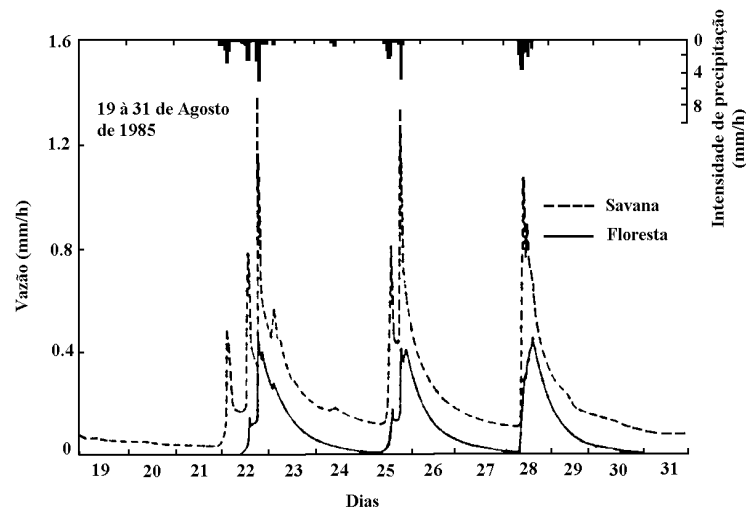


Figura 1.13 Hidrogramas de duas bacias experimentais na Austrália durante o período chuvoso (Burch et al 1987)

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.

1.3.7 Impactos da Urbanização

À medida que a cidade se urbaniza ocorrem, em geral, os seguintes impactos:

- aumento das vazões médias de cheia (em até 7 vezes, Leopold, 1968) devido ao aumento da capacidade de escoamento através de condutos e canais e impermeabilização das superfícies;
- aumento da produção de sedimentos devido à desproteção das superfícies e à produção de resíduos sólidos (lixo);
- deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, devido à lavagem das ruas, ao transporte de material sólido, às ligações clandestinas de esgoto cloacal e pluvial, e à contaminação direta de aquíferos;
- pela forma desorganizada como a infra-estrutura urbana é implantada como: (a) pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento; (b) redução de seção do escoamento aterros; (c) deposição e obstrução de rios, canais e condutos de lixos e sedimentos; (d) projetos e execução inadequados de obras de drenagem.

A seguir são apresentados os principais impactos da urbanização sobre o escoamento pluvial na bacia urbana, como forma de entendimento dos processos envolvidos.

Impacto do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico: O desenvolvimento urbano altera a cobertura vegetal provocando vários efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural (figura 1.14). Com a urbanização, a cobertura da bacia é em grande

parte impermeabilizada com edificações e pavimentos e são introduzidos condutos para escoamento pluvial, gerando as seguintes alterações:

- *Redução da infiltração* no solo;
- O volume que deixa de infiltrar fica na superfície, *aumentando o escoamento superficial*. Além disso, como foram construídos condutos pluviais para o escoamento superficial, tornando-o mais rápido, ocorre redução do tempo de deslocamento. Desta forma as vazões máximas também aumentam por isso, antecipando seus picos no tempo (figura 1.15);
- Com a redução da infiltração, o aquífero tende a diminuir o nível do lençol freático por falta de alimentação (principalmente quando a área urbana é muito extensa), *reduzindo o escoamento subterrâneo*. As redes de abastecimento, pluvial e cloacal possuem vazamentos que podem alimentar o aquíferos, tendo efeito inverso do mencionado;
- Devido a substituição da cobertura natural ocorre uma *redução da evapotranspiração*, já que a superfície urbana não retém água como a cobertura vegetal e não permite a evapotranspiração das folhagens e do solo;

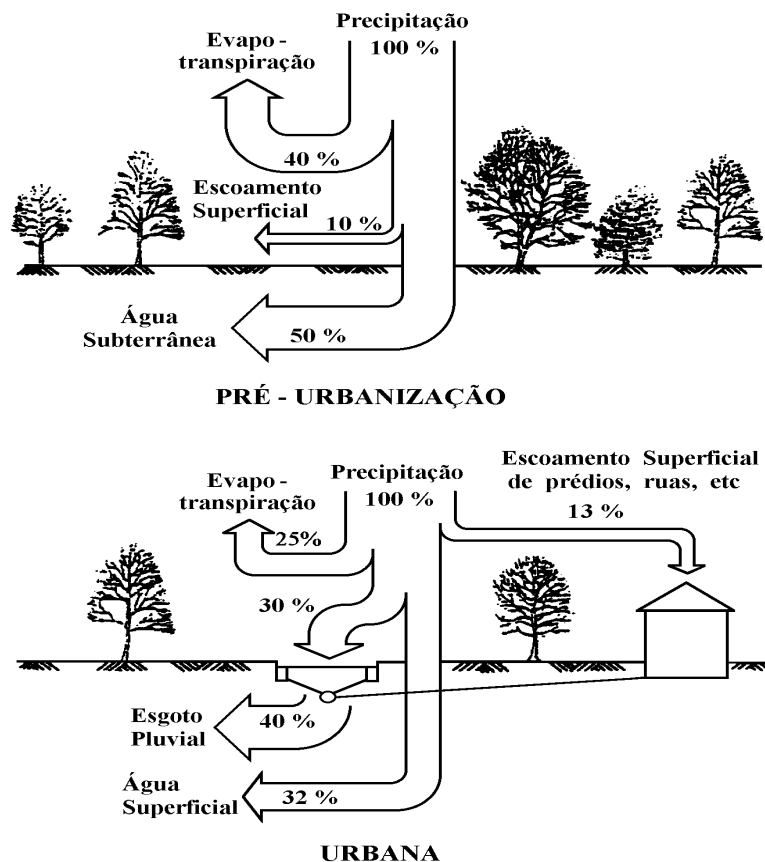


Figura 1.14 1 Características do balanço hídrico numa bacia urbana (OECD, 1986)

Na figura 1.15 são caracterizadas as alterações no uso do solo devido a urbanização e seu efeito sobre o hidrograma e nos níveis de inundação.

Impacto ambiental sobre o ecossistema hídrico: Alguns dos principais impactos ambientais produzidos pela urbanização são destacados a seguir:

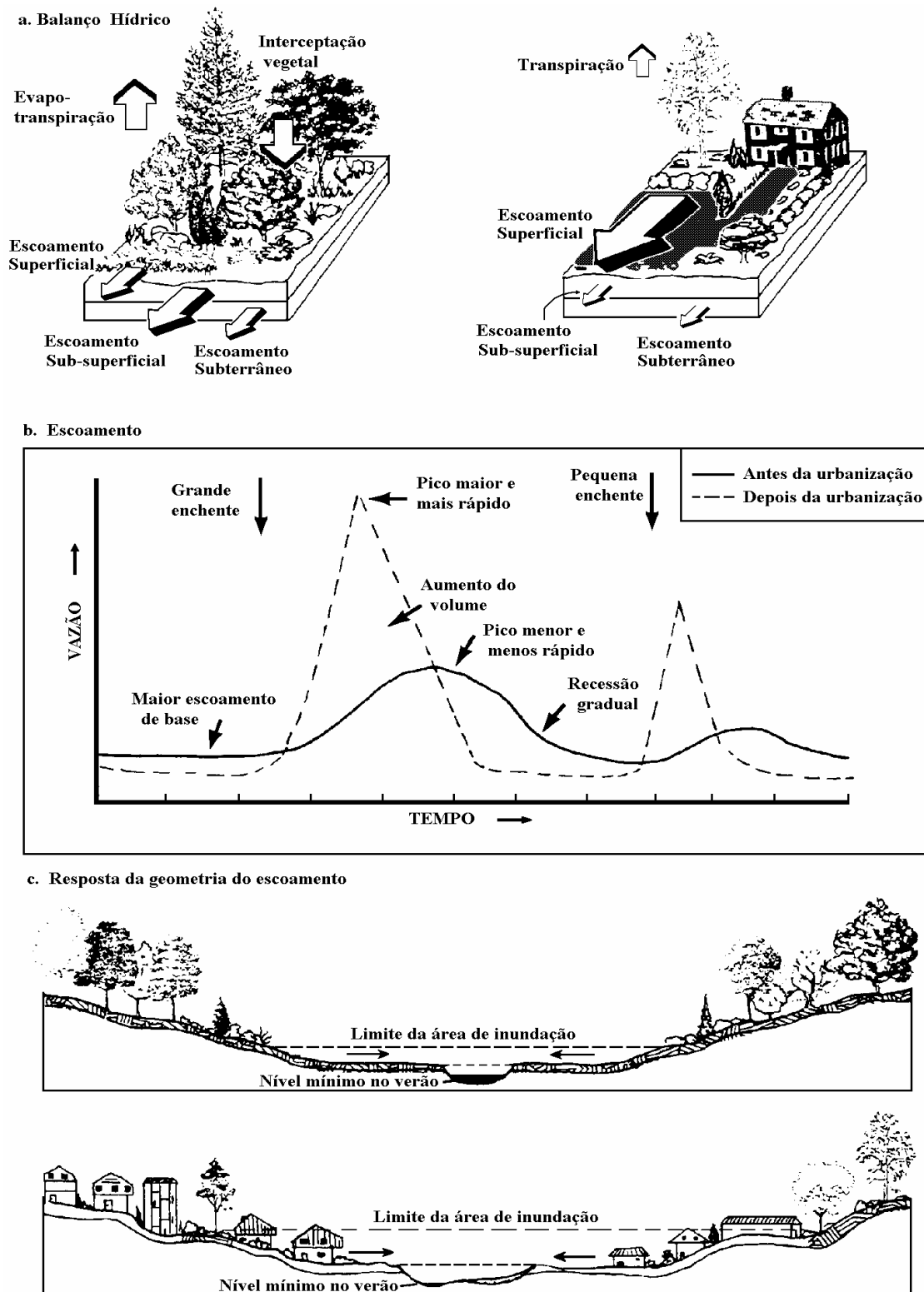


Figura 1.15 Características das alterações de uma área rural para urbana (Schueler, 1987).

Aumento da Temperatura: As superfícies impermeáveis absorvem parte da energia solar aumentando a temperatura ambiente, produzindo *ilhas de calor* na parte central dos centros

urbanos, onde predomina o concreto e o asfalto. O asfalto, devido a sua cor, absorve mais energia devido a radiação solar do que as superfícies naturais e o concreto, a medida que a sua superfície envelhece tende a escurecer e aumentar a absorção de radiação solar.

O aumento da absorção de radiação solar por parte da superfície aumenta a emissão de radiação térmica de volta para o ambiente, gerando o calor. O aumento de temperatura também cria condições de movimento de ar ascendente que pode redundar em aumento de precipitação. Silveira (1997) mostra que a parte central de Porto Alegre apresenta maior índice pluviométrico que a sua periferia, atribuindo essa tendência a urbanização. Como na área urbana as precipitações críticas são as mais intensas de baixa duração, estas condições contribuem para agravar as enchentes urbanas.

Aumento de Sedimentos e Material Sólido: Durante o desenvolvimento urbano, o aumento dos sedimentos produzidos pela bacia hidrográfica é significativo, devido às construções, limpeza de terrenos para novos loteamentos, construção de ruas, avenidas e rodovias entre outras causas. Na figura 1.16 pode-se observar a tendência de produção de sedimentos de uma bacia nos seus diferentes estágios de desenvolvimento.

As principais consequências ambientais da produção de sedimentos são as seguintes:

- assoreamento das seções da drenagem, com redução da capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos. A lagoa da Pampulha em Belo Horizonte é um exemplo de um lago urbano que tem sido assoreado. O arroio Dilúvio em Porto Alegre, devido à sua largura e pequena profundidade, durante as estiagens, tem depositado no canal a produção de sedimentos da bacia e criado vegetação, reduzindo a capacidade de escoamento durante as enchentes;
- transporte de poluente agregado ao sedimento, que contaminam as águas pluviais.

À medida que a bacia é urbanizada, e a densificação é consolidada, a produção de sedimentos pode reduzir (figura 1.3) , mas um outro problema aparece, que é a produção de lixo. O lixo obstrui ainda mais a drenagem e cria condições ambientais ainda piores. Esse problema somente é minimizado com adequada frequência da coleta, educação da população e penalidades para depósito e lançamento de lixo irregulares.

Qualidade da Água Pluvial: A qualidade da água do pluvial não é melhor que a do efluente de um tratamento secundário de esgoto cloacal. A quantidade de material suspenso na drenagem pluvial é superior à encontrada no esgoto cloacal *in natura*. Esse volume é mais significativo no início das enchentes.

Os esgotos podem ser combinados (cloacal e pluvial num mesmo conduto) ou separados (rede pluvial e cloacal separadas). No Brasil, a maioria das redes é do segundo tipo; somente em áreas antigas de algumas cidades existem sistemas combinados. Atualmente, devido à falta de capacidade financeira para ampliação da rede de cloacal, algumas prefeituras tem permitido o uso da rede pluvial para transporte do cloacal, o que pode ser uma solução inadequada à medida que esse esgoto não é tratado, além de inviabilizar algumas soluções de controle quantitativo do pluvial.

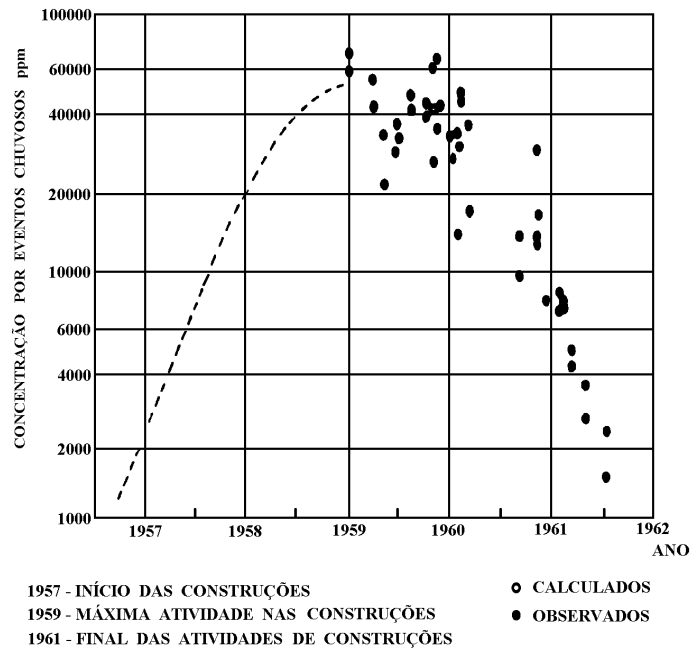


Figura 1.16 Variação da produção de sedimentos em decorrência do desenvolvimento urbano (Dawdy, 1967)

A qualidade da água da rede pluvial depende de vários fatores: da limpeza urbana e sua frequência, da intensidade da precipitação e sua distribuição temporal e espacial, da época do ano e do tipo de uso da área urbana. Os principais indicadores da qualidade da água são os parâmetros que caracterizam a poluição orgânica e a quantidade de metais.

Contaminação de aquíferos: As principais condições de contaminação dos aquíferos urbanos são devido ao seguinte:

- Aterros sanitários contaminam as águas subterrâneas pelo processo natural de precipitação e infiltração. Deve-se evitar que sejam construídos aterros sanitários em áreas de recarga e deve-se procurar escolher as áreas com baixa permeabilidade. Os efeitos da contaminação nas águas subterrâneas devem ser examinados quando da escolha do local do aterro;
- Grande parte das cidades brasileiras utilizam fossas sépticas como destino final do esgoto. Esse conjunto tende a contaminar a parte superior do aquífero. Esta contaminação pode comprometer o abastecimento de água urbana quando existe comunicação entre diferentes camadas dos aquíferos através de percolação e de perfuração inadequada dos poços artesianos;
- A rede de condutos de pluviais pode contaminar o solo através de perdas de volume no seu transporte e até por entupimento de trechos da rede que pressionam a água contaminada para fora do sistema de condutos.

1.4 Escalas dos processos hidroclimáticos

Os diferentes processos que atuam sobre o meio natural envolve diferentes escalas relacionadas com o tempo e o espaço. Estas duas escalas estão de alguma forma integradas.

Na figura 1.17 pode-se observar as escalas e os principais processos relacionados com o meio ambiente natural e antrópico.

1.4.1 A escala temporal

A escala temporal depende da ação antrópica e das condições de variabilidade climática. Estes efeitos podem ser observados dentro de uma escala de percepção humana ou apenas com base em medidas de sua ocorrência. Enquanto que a maioria dos processos dinâmicos que a nossa percepção tem capacidade de observar ocorre dentro da escala de tempo inferior a poucos anos, existem vários processos que atuam sobre as condições ambientais e desenvolvimento econômico que atuam dentro de uma escala de tempo maior.

As variabilidades ditas aqui de *curto prazo* são aquelas que ocorrem num *evento chuvoso* de minutos horas ou poucos dias, que caracteriza a inundação que afeta a população e os sistemas hídricos como reservatórios. A variabilidade temporal *sazonal* (dentro do ano) define o ciclo de ocorrência dos períodos úmidos e secos no qual a população e os usuários da água procuram conviver. Dentro deste âmbito está o ciclo de culturas agrícolas, alteração da paisagem e vegetação pela disponibilidade umidade, entre outros. Geralmente o controle deste processo envolve volume pequenos quando apenas a sazonalidade está em jogo.

A variabilidade interanual de curto prazo (poucos anos 2-3 anos) pode ser a condição crítica de vários sistemas hídricos sujeitos a disponibilidade hídrica como semi-árido brasileiro. Geralmente este tipo de período ainda está dentro da capacidade de percepção da população.

A variabilidade decadal (dezenas de anos) que atuam fortemente sobre as condições climáticas do globo e outros períodos mais longos. A importância deste cenário está relacionado com a capacidade que os sistemas hídricos têm para se alterar em função destas variabilidades e, em consequência como a sociedade e seu desenvolvimento pode suportar estas variações. Quando ocorre falta de água geram fortes restrições para o abastecimento, agricultura, produção de energia, entre outros. A adaptação da sociedade a estes novos cenários pode exigir tecnologia, ou como no passado, o deslocamento para regiões onde as restrições não ocorrem. Em algumas regiões do semi-árido brasileiro é surpreendente como podem ser encontradas pessoas habitando regiões com precipitação anual da ordem de 250 mm e evapotranspiração potencial acima de 2000 mm. Esta ocupação provavelmente ocorreu num período úmido em que permitia o homem cultivar a terra, com a variabilidade de longo prazo inviabilizou a sua sustentabilidade. Para superar este tipo de cenário é necessário desenvolver tecnologia para racionalizar o uso da água e sua conservação, que estas populações não tem educação suficiente para desenvolver.

Tucci (1998) mostrou que na bacia do rio Uruguai e grande parte do Rio Grande do Sul o período entre 1942 e 1948 foi o mais seco da série de 60 anos. Utilizando a série de 1950-2000, que são 51 anos, um reservatório estimará um volume de regularização 50% inferior ao obtido com a série a partir de 1942. Portanto, o planejamento da disponibilidade hídrica para aproveitamentos dos recursos hídricos na região pode estar severamente subdimensionado.

Geralmente o planejamento das atividades econômicas e dos recursos hídricos são realizados com base estacionariedade das variáveis hidrológicas (as estatísticas não variam com o tempo) obtidas com base em séries curtas (10 a 30 anos) que muitas vezes não são representativas do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. No entanto, será que o período da década de 40 é anômalo e não irá mais se repetir? É natural que venha a se

repetir, considerando que as condições de variabilidade climática de médio prazo se mantenham. Este tópico será discutido no capítulo seguinte.

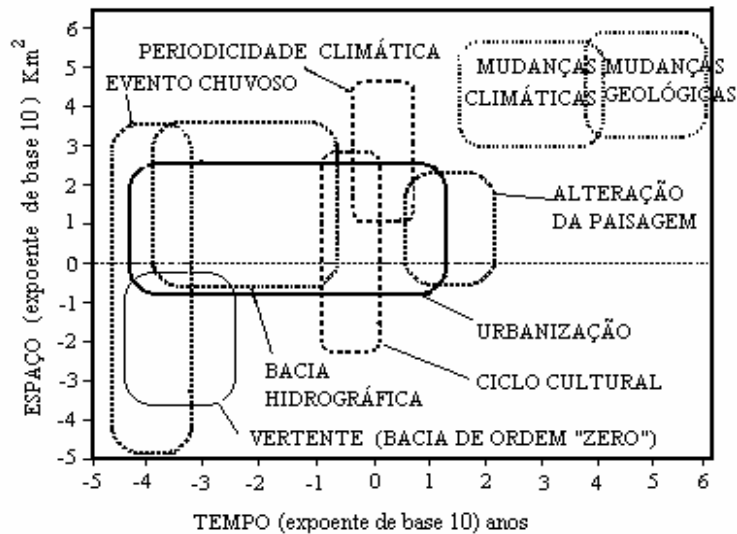


Figura 1.17 Escala dos processos hidroclimáticos (Mediondo e Tucci, 1997)

Dentro do âmbito das alterações antrópicas o impacto de modificações como o desmatamento produzem efeito imediato, mas a evolução do desmatamento sobre uma grande área ocorre mais lentamente e seu efeito na bacia de médio e grande porte é observado após um tempo maior, geralmente de alguns anos. Esta situação ocorre da mesma forma na urbanização de uma cidade a medida que a mesma cresce ao longo dos anos.

1.4.2 Variabilidade espacial

A variabilidade espacial dos efeitos é uma dos grandes desafios do conhecimento hidrológico atual. Neste processo é necessário entender as escalas caracterizadas na literatura (Becker, 1992) e descrita na tabela 1.6

Tabela 1.6 Escalas dos processos hidrológicos (Becker, 1992)

Escala	Dimensão km ²
Macro	> 10 ⁴
Transição α	10 ³ e 10 ⁴
Meso	10 - 10 ³
Transição γ	10 ⁻⁴ – 10
Micro	< 10 ⁻⁴

Da micro escala e sua transição geralmente ocorrem os processos de escoamento de vertente. Nesta escala praticamente não existem dados hidrológicos no Brasil e os processos geralmente estão dentro da percepção da população. A meso escala representa a faixa de bacias onde iniciam os usos da água como abastecimento de água e irrigação. Neste

âmbito de dimensão de bacias ainda existem um reduzido número de informações hidrológicas, e quando existem não são confiáveis ou não medem adequadamente a ocorrência dos eventos. A outorga do uso da água para os referidos usos depende muito de dados e da extrapolação do comportamento para bacias deste tamanho.

A grande maioria das informações hidrológicas no Brasil encontra-se na faixa de transição entre meso e macro-escala e a própria macro-escala. Esta situação é decorrência do principal uso priorizado no passado que é o aproveitamento hidrelétrico. Estes aproveitamentos se viabilizam a partir destas escalas. O conhecimento atual do comportamento hidrológico geralmente está associado a esta dimensão de bacia.

1.4.3 Análise do comportamento da transição da micro para a meso-escala

O comportamento hidrológico depende das intervenções sobre a superfície, como descrito nos vários elementos dos itens anteriores. As alterações de superfície nesta escala mostram:

- Aumento de escoamento com o desmatamento;
- Aumento do escoamento com a impermeabilização (veja item anterior);
- Variação dos efeitos com a escala dos processos de acordo com o tipo de plantio para culturas anuais.

Este último caso, mostra que a alteração das condições de escoamento na bacia pode ser produzir resultados variados de acordo com a escala da bacia.

Silva Jr (2001) utilizou dados da bacia representativa do Poritibu, afluente do Ijuí e do Uruguai no Oeste do Rio Grande do Sul. As bacias possuem dados de 1989 a 1999, sendo que no período de 1989 a 1994 as bacias tinham plantio convencional com terraceamento, enquanto que no período subsequente toda a região alterou o tipo de plantio para direto. Este tipo de plantio altera o escoamento superficial fazendo com praticamente toda a precipitação, gerando preponderantemente escoamento sub-superficial. As bacias possuem as seguintes dimensões: Anfiteatro 0,125 km², Donato 1,1 km² e Turcato 19,5 km². As duas primeiras de escala de transição e a última, escala dentro da meso-escala. A vazão média de inundação reduziu para o plantio direto em 31 e 22,5 % respectivamente, mas para a bacia de meso –escala a vazão média de cheia aumentou de 39% (figura 1.18).

Este resultado inicialmente surpreendente pode ser explicado pelo seguinte. A precipitação se infiltra na camada superior do solo, predominantemente escoando pelos caminhos preferenciais dentro do solo. Este escoamento ocorre por distâncias limitadas, em função da declividade, saindo no ravinamento ou nos canais naturais de escoamento. O lençol freático, nestas condições, possui constante alimentação. Para as bacias menores o escoamento é predominantemente através do sub-solo, reduzindo o escoamento superficial, no entanto a medida que a bacia aumenta o escoamento sub-superficial já entrou nos canais e passa a ser considerado escoamento superficial mantendo sempre com fluxo maior que o cenário anterior.

Cenários como estes ocorrem na meso-escala que é um integrador dos processos de vertente. No entanto, a percepção humana de observação dos processos ocorre na micro-escala que pode resultar em comportamento diferente. Somente a ampliação da coleta de dados em diferentes escalas pode permitir entender os diferentes efeitos hidrológicos e ambientes (ecohidrologia) que estão fortemente integrados dentro da visão da teoria caótica, onde micro não explica o comportamento macro.

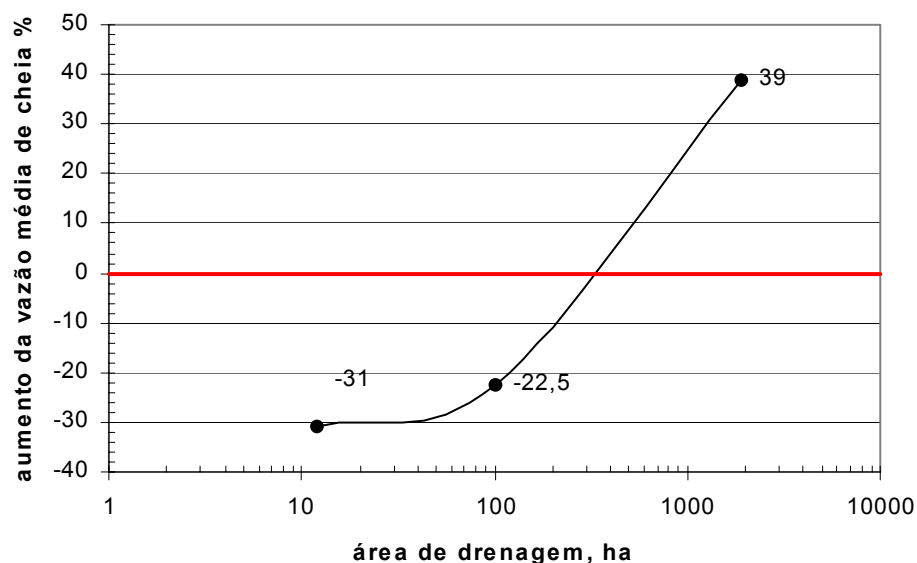


Figura 1.18 Variabilidade da vazão média de cheia com a mudança de plantio convencional para plantio direto.

1.4.4 Extrapolação entre escalas

Como foi observado acima a maioria (se não todos) os dados disponíveis são bacias acima da meso-escala. Neste sentido, no gerenciamento dos recursos hídricos a tendência dos agentes é de extrapolar para as escalas menores e, em algumas situações para escalas maiores. A grande questão deste tipo de cenário se reflete na identificação das incertezas resultantes.

Silva Jr. et al (2002) utilizaram a mesma bacia na região do Uruguai para analisar a extrapolação das variáveis utilizadas em planejamento de recursos hídricos. Foram utilizados dados de bacias na meso – escala e sua transição para regionalizar as vazões e extrapolar para escalas superiores e inferiores. Na tabela 1.7 são apresentadas as bacias e suas dimensões.

Relacionando a vazão média de cheia com a área da bacia e ajustando a uma função para as bacias da meso – escala e sua transição, observa-se na figura 1.19 que para as bacias maiores o erro não é menor que 7%. No entanto, a extrapolação inferior mostra claramente que os valores são subdimensionados de 40 a 92 %. Este é um resultado esperado, já que a medida que a bacia diminui as vazões específicas máximas aumentam.

Para a vazão média de longo período os resultados foram opostos ao verificados quanto a diferença da extrapolação como mostra a figura 1.20. Os resultados são aceitáveis até a dimensão de 1,1 km², e subdimensiona para a bacia menor. No entanto, este resultado deve ser visto com cuidado, pois a diferença pode ser devido a incapacidade de definição de uma vertente para medir toda a vazão de saída da bacia.

Para Q95, vazão de 95 % da curva de permanência, representativa das condições de escoamento de vazão de estiagem não regularizada o efeito da extrapolação pode ser observado na figura 1.21. Para as vazões de bacias na micro – escala observa-se que o erro é significativo. Com base na extrapolação seriam estimadas vazões superiores as verdadeiras para as pequenas. Na outorga do uso da água representaria aprovar um volume que não existe, gerando um potencial conflito.

Para as bacias maiores observa-se o sentido contrário, a extrapolação tende a subestimar as vazões. Este comportamento seria esperado, a medida que a bacia cresce, a sua capacidade de regularização também aumenta.

Estes resultados mostram a necessidade do seguinte:

- Aumentar a disponibilidade de dados de pequenas bacias;
- Avaliar a variabilidade de comportamento nas escalas espaciais;
- Aumentar o entendimento destes processos nos diferentes biomas que caracterizam o Brasil.

Tabela 1.7 – Rede fluviométrica no rio Uruguai e sub-bacia do Ijuí (Silva Jr. et al, 2002)

Uso	RIO	ESTAÇÃO	ÁREA (km ²)
Postos usados na verificação inferior	Anfiteatro	Vertente	0,125
	Donato	Vertente	1,1
	Turcato	Potiribu	19,5
Postos usados na ajuste da	Potiribu	Pte. Nova do Potiribu	628
Regionalização	Conceição	Conceição	805
	Conceição	Pte. Nova Conceição	966
	Ijuí	Passo Faxinal	2.003
	Ijuizinho	Colônia Mousquer	2.131
	Ijuí	Sto. Ângelo	5.414
	Ijuí	Pte. Mística	9.420
Postos usados na verificação Superior	Uruguai	Garruchos	104.162
	Uruguai	Passo São Borja	110.898

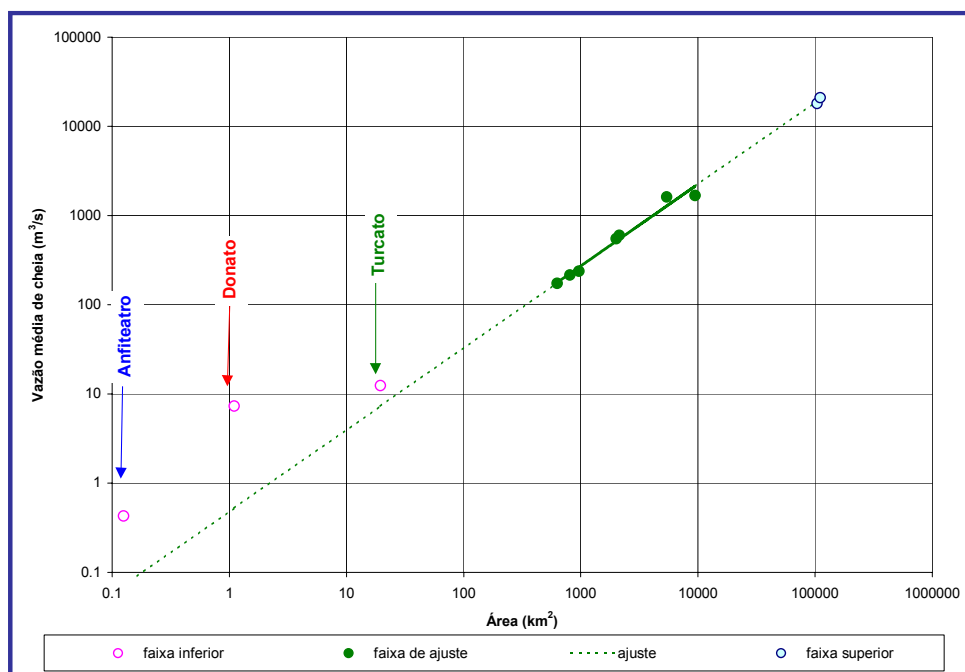


Figura 1.19 Vazões máximas de cheias na bacia do rio Ijuí e Uruguai. O ajuste da curva pontilhada foi realizado com onde a linha é cheia (Silva Jr. et al. 2002).

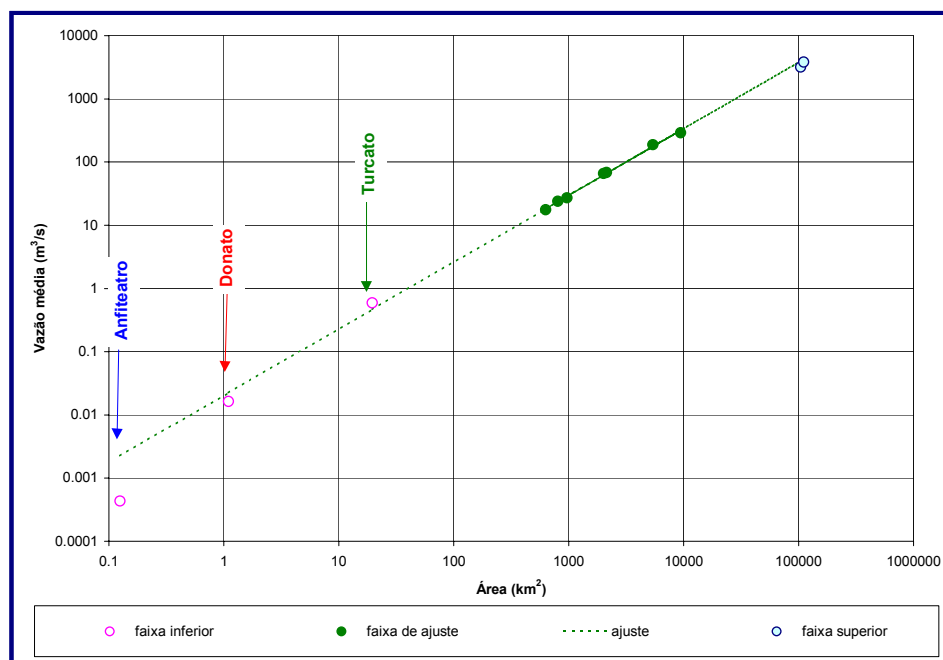


Figura 1.20 Vazões médias de longo período na bacia do rio Ijuí e Uruguai. O ajuste da curva pontilhada foi realizado onde a linha é cheia (Silva Jr. et al. 2002).

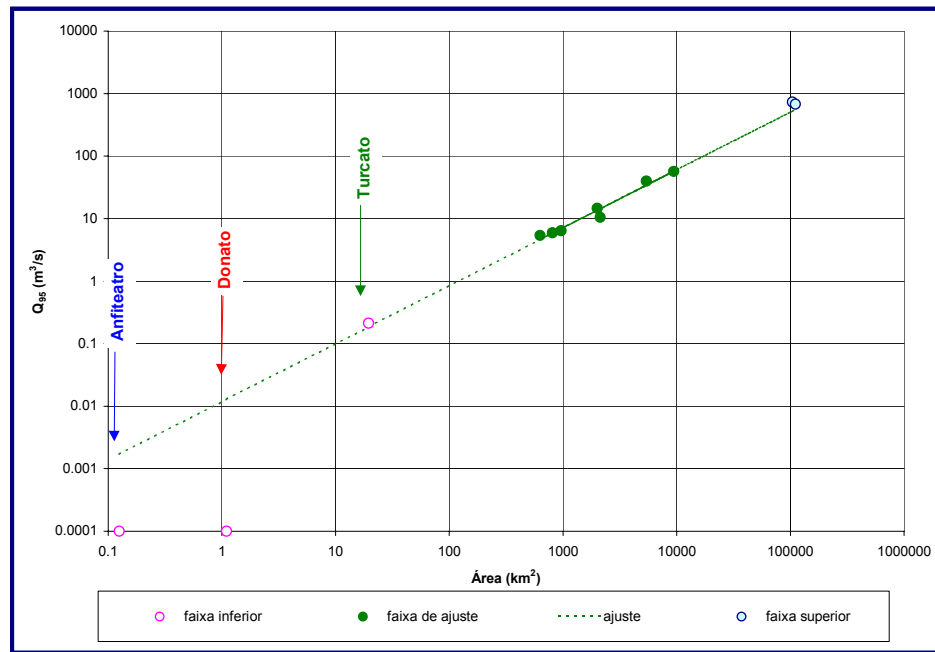


Figura 1.21 Vazões de 95% da curva de permanência na bacia do rio Ijuí e Uruguai. O ajuste da curva pontilhada foi realizado onde a linha é cheia (Silva Jr. et al. 2002).

A regionalização de vazões não deve ser vista como uma solução para a extrapolação de escalas, mas como um auxiliar para entendimento do comportamento, melhoria dos dados e interpolação de resultados em regiões hidrológicas de comportamento similar. O uso deste tipo de técnica de forma indiscriminada pode gerar conflitos e prejuízos aos usuários da água.

2. VARIABILIDADE E MODIFICAÇÃO CLIMÁTICA

2.1 Terminologia

As definições utilizadas na literatura sobre variabilidade climática se diferenciam de acordo com a inclusão dos efeitos antrópicos na identificação da variabilidade.

IPCC (2001b) define *Modificação Climática* (*Climate Change*) como as mudanças de clima no tempo devido a variabilidade natural e/ou resultado das atividades humanas (ações antrópicas). Já outros autores ou grupos como *Framework Convention on Climate Change* adota para o mesmo termo a definição de mudanças associadas direta ou indiretamente a atividade humana que alterem a variabilidade climática natural observada num determinado período.

Estas definições refletem a dificuldade existente de separar o efeito das atividades humanas sobre a variabilidade climática natural. Neste texto adota-se a seguinte terminologia para efeito de análise:

Variabilidade climática: terminologia utilizada para as variações de clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações;

Modificação climática: são as alterações da variabilidade climática devido as atividades humanas.

A avaliação dos processos hidrológicos em diferentes estudos de recursos hídricos baseia-se na homogeneidade das séries hidrológicas, ou seja as estatísticas da série hidrológica não se alteram com o tempo. Não é esta a dinâmica observada na realidade, a não-homogeneidade das séries tem aparecido devido a causas isoladas e combinadas como:

- modificação climática, como definido acima;
- falta de representatividade das séries históricas para identificar a variabilidade natural dos processos climáticos;
- alterações nas características físicas/químicas e biológicas da bacia hidrográfica devido a efeitos naturais e antrópicos, discutido no capítulo anterior

2.2 Efeito Estufa

A radiação solar de onda curta penetra a atmosfera, aquecendo a superfície da terra. Parte desta radiação é absorvida e parte é refletida de volta para a atmosfera (albedo). A parcela absorvida produz aquecimento na superfície que emite radiação de onda longa (radiação térmica) que pode ser absorvida pelos gases encontrados na atmosfera, como o vapor d'água e o dióxido de carbono (CO₂). A absorção desta radiação de onda longa aquece a atmosfera, aumentando a temperatura da superfície. Este é o denominado *efeito estufa*.

O efeito estufa é um processo natural no globo produzido principalmente pelo vapor de água, além de outros gases. Se não houvesse este efeito na atmosfera da Terra, a temperatura da superfície resultante do balanço de energia seria 33° C mais fria.

A potencial modificação climática é resultante do aquecimento adicional da atmosfera devido ao aumento da emissão de gases produzido pelas atividades humana e animal na Terra, além dos processos naturais já existentes.

Os principais gases que contribuem para este processo são : o dióxido de carbono CO₂, metano (CH₄) , óxido de nitrogênio e CFC (clorofluor-carbono). O CO₂ é produzido pela

queima de combustíveis fósseis e produção de biomassa. Existem registros que indicam aumento da concentração de CO_2 de 315 ppm para 342 na atmosfera entre 1958 e 1983.

2.3 Efeitos sobre o clima

As modificações no clima podem ocorrer devido a variabilidade natural ou antropogênica interna ou externa ao sistema climático. A variabilidade natural é expressa pela radiação solar ou atividades vulcânicas, enquanto que as ações antropogênicas são principalmente devido a emissão de gases do efeito estufa.

Para avaliar o efeito específico de cada componente deste sistema tem sido utilizado o conceito de forças radiativas (*radiative forcing*; poderia ser traduzido por impulso radiativo ou fatores radiativos, já que não são efetivamente forças). É definido como uma medida de influência do fator para a alteração do balanço de entrada e saída da energia do sistema Terra-atmosfera. Este é um indicador importante para avaliar o mecanismo de mudança climática, medido em Watts/m².

Na figura 2.1 é apresentada o efeito potencial positivo e negativo destes vários componentes sobre o clima. Pode-se observar que os gases devido ao efeito estufa representam a grande parte dos impactos positivos, se comparado com os demais elementos. As forças radiativas devido aos gases do efeito estufa de 1750 a 2000 foi estimada em 2,42 W/m², sendo 60% devido ao CO_2 ; 20% devido ao Metano; 14% devido ao N_2O , entre outros.

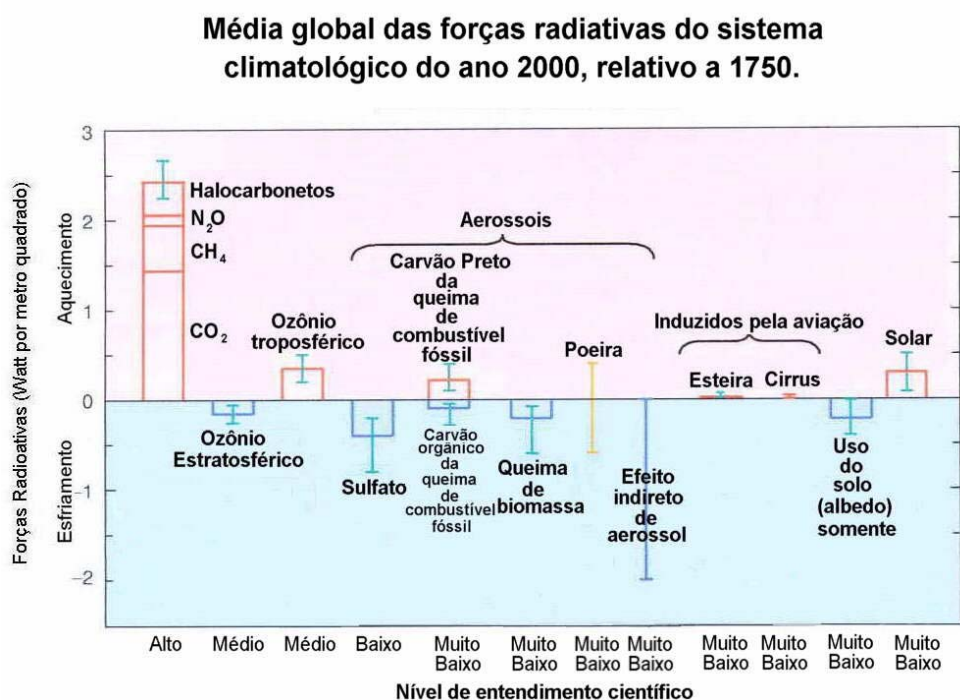


Figura 2.1 Efeito das forças radiativas sobre o clima para o ano 2000, relativo a 1750 (IPCC,2001b)

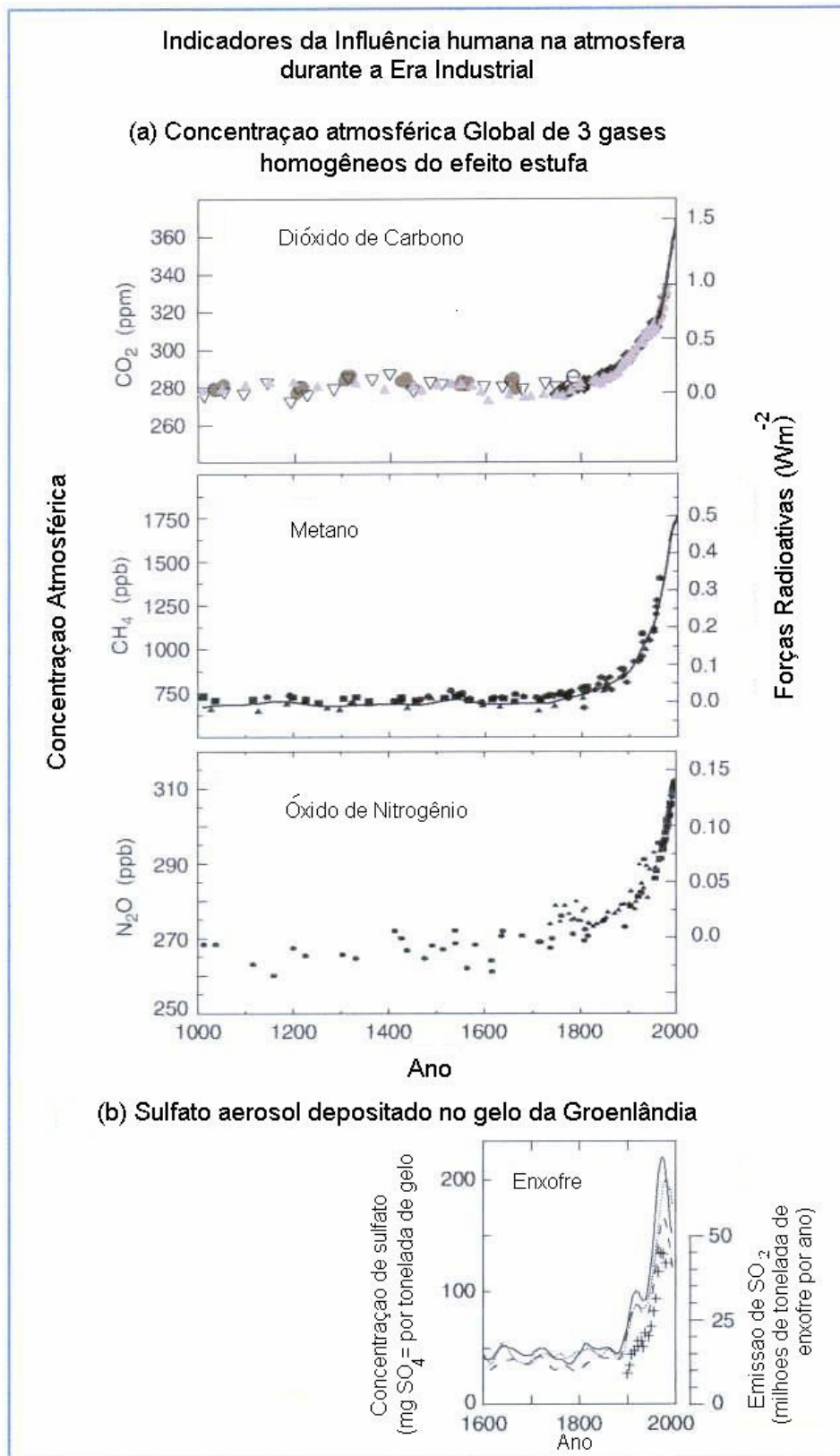


Figura 2.2 Variabilidade dos gases do efeito estufa (IPCC,2001b)

As forças devido a mudança da radiação solar para o período desde 1750 é estimada em $0,3 \text{ W/m}^2$, apenas 12% do total dos gases do efeito estufa. Esta mudança ocorreu na maior na primeira parte do século 20. As forças radiativas da combinação da mudança da radiação solar e atividade vulcânica nas duas últimas décadas foram estimadas como negativas.

Na figura 2.2 é apresentada a variabilidade dos gases do efeito estufa, CO_2 , CH_4 e N_2O , onde observa-se um alto gradiente no último século, representado pela era industrial. Os resultados apresentados pelo IPCC(2001b) mostram que o dióxido de carbono cresceu 31% desde 1750 e o valor atual é o *provavelmente* (ver tabela 2.1) o maior dos últimos 420.000 anos. Nos últimos 20 anos, três quartos das emissões de origem antropogênicas são devido ao dióxido de carbono por queima de combustível fóssil. O restante é devido a mudança do solo como desmatamento.

Do total de CO_2 emitido para a atmosfera, o oceano e a superfície da terra absorvem cerca de 50%. Na terra a absorção de CO_2 é superior a emissão devido ao desmatamento.

2.4 Evidências de alterações do clima

A modificação climática devido ao efeito estufa causado pela emissão de gases provocada pelas atividades humanas pode criar efeitos ambientais adversos (para a população).

Uma das principais evidências do aumento do efeito estufa citada na literatura é a forte correlação entre o CO_2 na atmosfera e a temperatura média do globo (figura 2.3). Estes valores foram obtidos a partir do ar captado em amostras de gelo. Na figura 2.4 é apresentada a evolução da temperatura do globo neste século, onde se observa uma tendência sistemática crescente.

O painel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2001b), grupo de apoio das Nações Unidas sobre assuntos da atmosfera apresentou um relatório elaborado por um grupo de economistas, cientistas políticos e cientistas de diferentes áreas concluindo sobre o seguinte (veja na tabela 2.1 a terminologia usada pelo IPCC):

Quanto a Temperatura:

- A temperatura média do mar a nível global tem aumentado desde 1861. No século vinte o aumento ficou entre $0,6 \pm 0,2^\circ \text{ C}$. O aquecimento ocorreu principalmente em dois períodos 1910 – 1945 e 1976 – 2000;
- Globalmente é *muito provável* que 1990 foi a década mais quente e 1998 o ano mais quente da série observada desde 1861;
- Na análise de dados indiretos, é *provável* que o aumento da temperatura do hemisfério Norte no século vinte foi o maior de 1.000 anos. Da mesma forma é provável que a década 90 e o ano de 1998 tenham sido os mais quentes deste período;
- Entre 1950 e 1993 a temperatura mínima noturna na terra aumentou cerca de $0,2^\circ \text{ C}$ por década. Este é duas vezes maior que a proporção do aumento da temperatura do dia. O aumento da temperatura da superfície do mar sobre o período é cerca de metade da temperatura média do ar na terra;

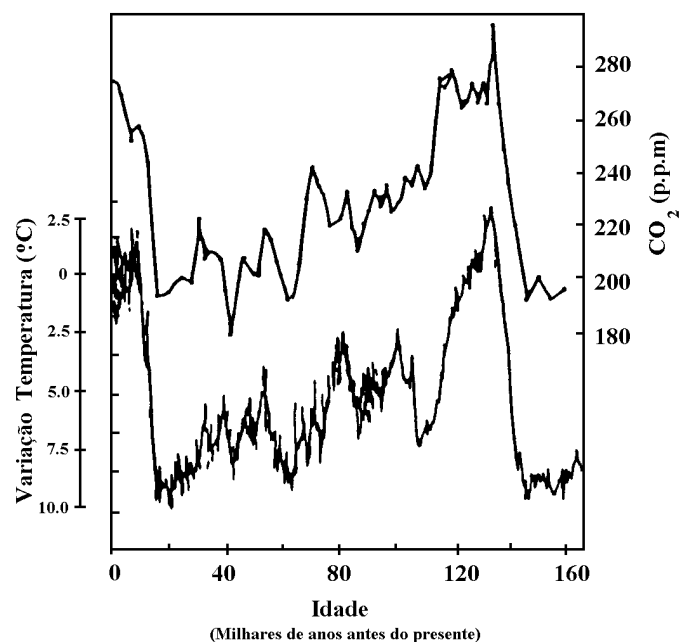


Figura 2.3 Variação da temperatura e do nível de CO_2 dos últimos 160.000 anos na Antártida (Barnola et al. 1987)

- De acordo com cenários previsto pelo painel, a temperatura média do globo poderá aumentar de 1,4 a 5,8 °C para 2100 com relação a 1990 e globalmente o nível do mar poderá aumentar de 0,09 a 0,88 m para a mesma data.

Tabela 2.1 IPCC nomenclatura (IPCC, 2001b)

Termo	% de chance que a afirmação é verdadeira
Virtualmente certo	> 99
Muito provável	90 – 99
Provável	66 – 90
Possibilidade Média	33- 60
Improvável	10-33
Muito improvável	1 – 10
Excepcionalmente improvável	< 1

Quanto a cobertura de neve:

- Dados de satélite mostraram que é muito provável que tenha ocorrido diminuição de cerca de 10% da cobertura de neve desde o final dos anos 60;
- Dados de medidas na terra mostram que é muito provável que tenha ocorrido a diminuição de duas semanas na duração anual da cobertura de gelo nos lagos e rios nas latitude média e altas do hemisfério norte durante o século vinte.

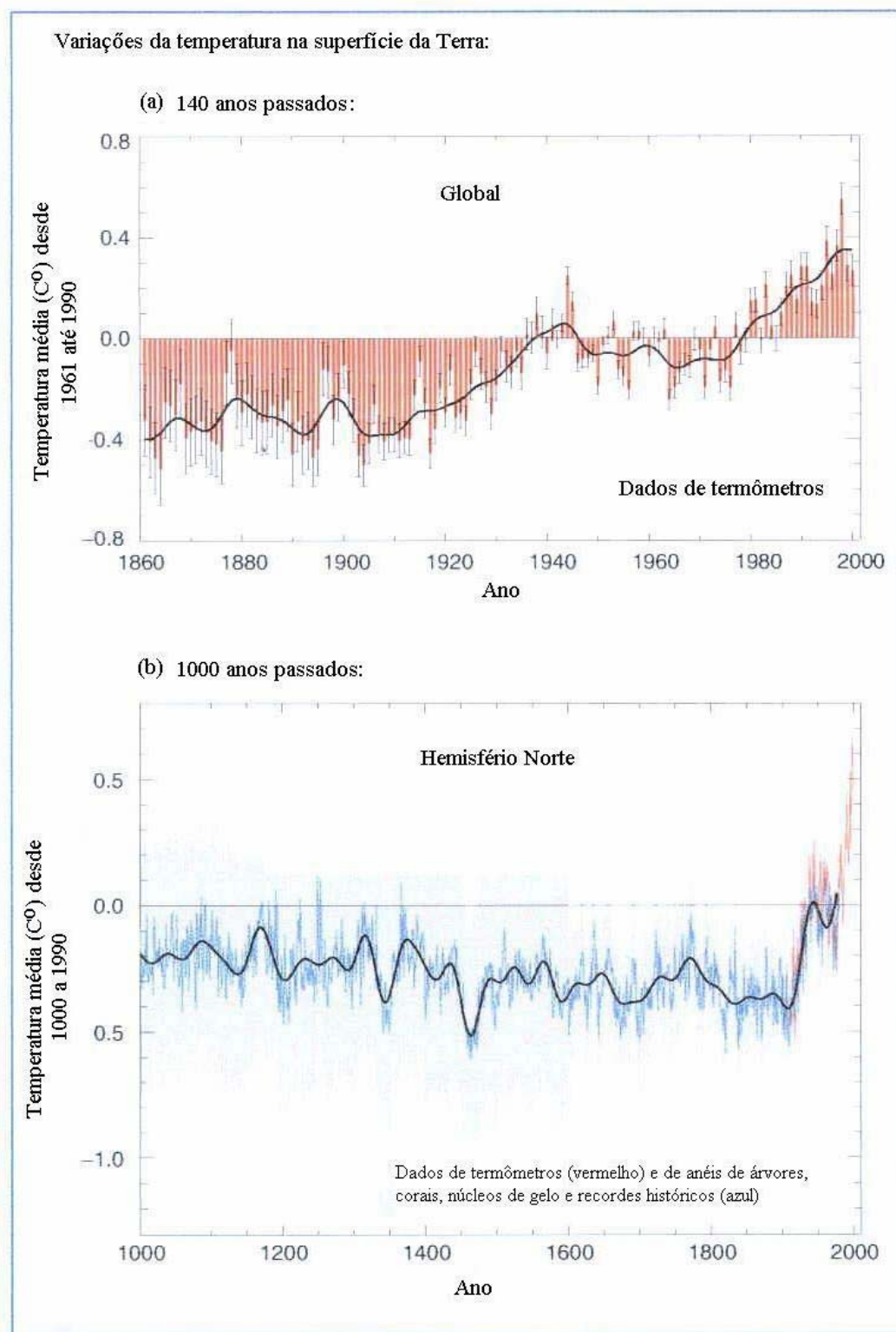


Figura 2.4 Variação da temperatura média do globo e do hemisfério Norte (IPCC,2001b)

Quanto a nível do mar:

- Dados de maré tem mostrado que a média global do nível do mar aumentou cerca de 0,1 a 0,2 m durante o século vinte;
- Houve aumento de calor nos oceanos desde o final dos anos 50;

Quanto a precipitação

- É muito provável que a precipitação tenha aumentado de 0,5 a 1% por década no século vinte para a maioria das latitudes médias e altas do Hemisfério Norte e é provável que a precipitação tenha aumentado de 0,2 a 0,3% por década na região tropical entre 10° N e 10° S;
- É provável que a precipitação tenha diminuído 0,3% por década, na maioria do Hemisférios Norte sub-tropical entre latitudes de 10° e 30°;
- Nas médias e altas altitudes do hemisfério Norte para a última metade do século vinte é provável que tenha ocorrido um aumento de 2 a 4% de aumento na frequência de ocorrência de precipitações intensas.

El Niño

- Episódios quentes de ENSO (El Niño-Southern Oscillation) que afeta o clima regional em diferentes partes do globo tem sido mais freqüente, intenso e persistente desde a metade de 1970 com relação ao período anterior de 100 anos;
- Em grande parte da América do Sul, principalmente bacia do Prata as vazões e as precipitações aumentaram depois de 1970.

2.5 Modelos Globais Climáticos

Para procurar avaliar quais seriam as alterações climáticas devido ao efeito estufa foram desenvolvidos modelos globais climáticos (GCM).

Os modelos simples que representam o clima do globo usam valores médios globais, mas não consideram as variabilidades temporais e espaciais do processo. Modelos verticais ou horizontais unidimensionais tem permitido analisar os vários elementos climáticos, mas com resultados limitados.

Os modelos GCM (Modelos Globais Climáticos) são tridimensionais no espaço e consideram os principais processos e suas interações. Estes modelos buscam representar os diferentes processos na atmosfera e sua interação com a superfície da terra e água usando equações matemáticas. Os modelos discretizam o globo em elementos de 100 a 1000 km de lado e de 1 a 5 km de altura. A topografia e os processos físicos do sistema em cada elemento são valores médios.

As principais limitações destes modelos são as seguintes:

- a discretização é somente suficiente para retratar os processos atmosféricos de macroescala na superfície da Terra;
- existem vários parâmetros e processos que apresentam fortes limitações na representação dos modelos. Por exemplo, os processos físicos hidrológicos na bacia

variam na microescala. A transferência deste problema para a macroescala é um processo ainda pouco conhecido na hidrologia. Isso tem dificultado a integração entre os modelos climáticos e os hidrológicos. Atualmente, existem vários projetos no globo que buscam melhor estimar os parâmetros para tornar estes modelos mais confiáveis (IGBP,1993);

- somente recentemente alguns modelos estão considerando a modificação ambiente provocada na superfície terrestre que pode alterar a umidade do solo e, em consequência os próprios prognósticos. O sistema natural é extremamente não-linear e fechado nas suas interações, o que o modelo tem dificuldade de representar.
- A quantidade de informações existente em algumas partes do globo produzem incertezas, como a temperatura do oceano Atlântico Sul.
- o tempo de processamento dos modelos para uma discretização mais detalhada é extremamente elevado, mesmo para a capacidade dos computadores atualmente existentes;
- Os resultados destes modelos tem produzido especulações sobre o clima do globo, mas alterações dos seus parâmetros (que em geral não são conhecidos) podem produzir modificações substanciais nos prognósticos.

Para melhorar as estimativas e a discretização têm sido utilizados modelos de mesoescala. Estes modelos discretizam uma região específica com malha espacial mais fina, permitindo uma melhor representatividade espacial. Os modelos GCM são utilizados para estimar as condições de contorno dos modelos de mesoescala. A evolução da discretização para malhas mais finas e representatividade dos processos depende da evolução da capacidade de processamento dos supercomputadores.

Nos últimos anos, segundo IPCC(2001b), tem apresentado melhora nos seguintes aspectos:

- O entendimento dos processos climáticos e sua incorporação nos modelos tem melhorada a descrição do vapor água, dinâmica do oceano-gelo e transporte de calor pelo oceano;
- Os modelos atuais reproduzem satisfatoriamente o clima atual sem a necessidade parametrização empírica para o fluxo de água e calor da interface oceano-atmosfera;
- Na figura 2.5a são apresentadas simulações com o modelo considerando somente as condições naturais e o modelo tende a subestimar a variabilidade de temperatura deste século. Quando o modelo considera somente os efeitos antropogênicos a simulação tende a superestimar a temperatura (figura 2.5b). No entanto, quando os dois efeitos são considerados o modelo tende a apresentar o melhor resultado (figura 2.5c).

2.6 Prognóstico com modelos

Os modelos globais climáticos tem sido utilizados para analisar os componentes dos efeitos observados nos últimos anos e para o prognóstico de impactos futuros em função da tendência de emissão de gases pela atmosfera.

Cenário observado

As principais avaliações obtidas através dos modelos climáticos para a variabilidade do passado são as seguintes (IPCC,2001b):

- O aquecimento ocorrido nos últimos 100 anos é *muito improvável* que seja devido apenas a variabilidade climática de origem natural;
- As simulações mostraram que a variabilidade natural não explica o aquecimento ocorrido na última metade do século 20. O melhor resultado foi obtido quando também foram considerados os efeitos antropogênicos nas simulação (figura 2.5c).
- É *muito provável* que no século 20 o aquecimento tem contribuído para o aumento do nível do mar através da expansão térmica da água do mar e da perda de gelo da terra;
- Considerando as incertezas, o aumento de temperatura dos últimos 50 anos é *provável* que seja devido ao aumento dos gases do efeito estufa.

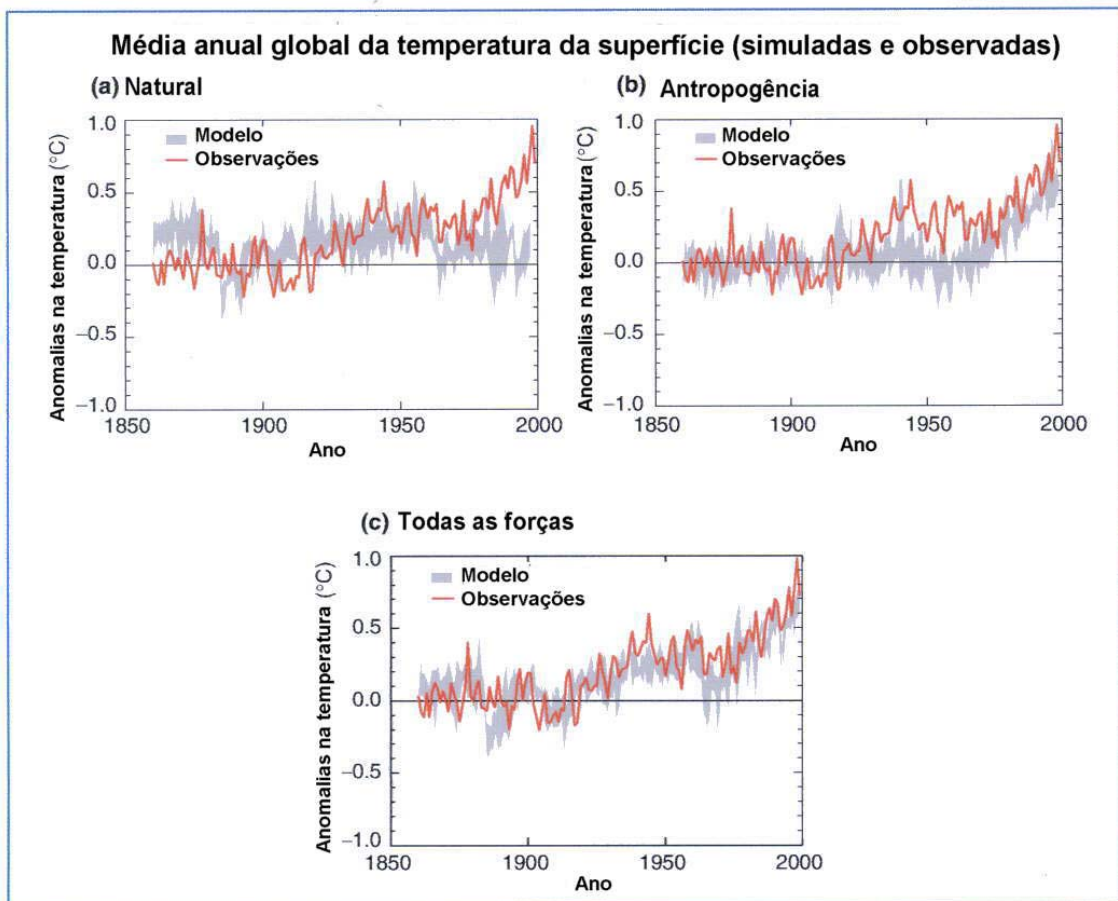


Figura 2.5 Resultados do efeito das condições naturais e antropogênicas simulados pelos modelos GCM (IPCC, 2001b)

Prognósticos da influência humana

A emissão de gases CO_2 pela queima de combustíveis fósseis é *virtualmente certo* como o efeito dominante, na tendência de variação da concentração de CO_2 na atmosfera para o século 21. Atualmente os oceanos e a terra absorvem 50% de CO_2 , com o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera existe a tendência de redução da proporção com que os

sistemas absorvem dióxido de carbono, aumentando de forma mais significativa a quantidade de CO₂ na atmosfera.

IPCC apresentou um relatório especial sobre emissão de gases (SRES) onde desenvolveu vários cenários futuros. Estes cenários não consideram os objetivos do protocolo de Quioto, mas tendências atuais dos condicionantes econômicos e sociais dos países. Um resumo das projeções obtidas são as seguintes:

- A projeção para o CO₂ na atmosfera para 2100 pelos modelos é entre 540 e 970 ppm (diferentes cenários), aumento de 90 a 250% sobre a concentração de 1750 e 59 a 158% com relação a concentração de 1983.
- Caso o carbono emitido por alterações no uso do solo pudesse ser recuperado através de reflorestamento a concentração de dióxido de carbono na atmosfera poderia se reduzir de 40 a 70 ppm;
- Para estabilizar a concentração de CO₂ em 450, 650 e 1000 ppm dentro poucas décadas, cerca de um século e cerca de dois séculos, respectivamente é necessário reduzir a emissão aos níveis de 1990;
- A temperatura média da superfícies é projetada para aumentar entre 1,4 a 5,8° C entre 1990 e 2100. Este é o resultado de 35 cenários baseado em vários modelos climáticos;
- Com base nas simulações é *muito provável* que praticamente todas as áreas terrestres aquecerá mais rapidamente que a média, principalmente no hemisfério norte com altas latitudes e clima frio, enquanto que no hemisfério sul ocorrerá o contrário.

Na tabela 2.2 é apresentado um resumo das condições previstas para climas extremos e eventos climáticos.

2.7 Impactos sobre o meio ambiente e a população

IPCC(2001 a) apresenta uma análise dos potenciais impactos sobre o meio ambiente e a população. O documento lista os seguintes:

- A redução da potencial produção agrícola nas regiões tropicais e sub-tropicais para a maioria dos cenários estudados;
- Uma redução geral, com algumas variações, no potencial de produção agrícola na maioria das regiões de média latitude;
- Diminuição da disponibilidade hídrica nas regiões com deficiência de água, particularmente em regiões sub-tropicais;
- Um aumento de pessoas sujeitas a doenças veículas pela água (por exemplo, cólera, malária) e aumento da mortalidade devido ao aquecimento;
- Aumento generalizado de risco de inundações para a população devido ao aumento da intensidade da precipitação e aumento do nível do mar;
- Aumento da demanda de energia para refrigeração devido ao aumento das temperaturas de verão.

Os aspectos benéficos identificados foram:

- Aumento da produção agrícola em algumas regiões de média latitude devido ao aumento de temperatura;

- Potencial aumento do suprimento mundial de madeira devido ao gerenciamento de florestas;
- Aumento da disponibilidade hídrica em algumas regiões de média latitude como o sudoeste da Ásia;
- Diminuição da mortalidade de inverno em média e altas latitudes;
- Redução da demanda de energia para aquecimento nos períodos de inverno.

Tabela 2.2 Estimativas dos observados e projetadas mudanças de climas extremos (IPCC,2001b)

Mudanças do fenômeno	Avaliação de mudanças para a Segunda metade do século 20 ¹	Avaliação em mudanças projetadas para o século 21
Altas temperaturas máximas e mais dias quentes sobre quase todas as áreas	Provável	Muito provável
Altas temperaturas mínimas, poucos dias frios e dias com geada em quase todas as áreas	Muito provável	Muito provável
Reduzido intervalo para a temperatura diária em quase todas as áreas	Muito provável	Muito provável
Aumento do índice de calor: é uma combinação de temperatura, umidade e efeitos medidos no conforto humano	Provável em muitas áreas	Muito provável em muitas áreas
Eventos de precipitação mais intensos	Provável sobre muitas áreas do hemisfério norte de meia e alta latitude	Muito provável sobre muitas áreas
Aumento do verão continental seco e associado ao risco de estiagem	Provável em muitas áreas	Provável para muitas regiões de latitude média no interior dos continentes
Aumento em picos de intensidade de ventos de ciclones tropicais	Não foi observado e poucos análises	Provável sobre algumas áreas
Aumento da média ciclones tropicais e intensidade de precipitação	Dados insuficientes	Provável sobre muitas áreas

1 - veja classificação na tabela 2.1

O documento estima o impacto sobre diferentes partes do globo. Especificamente sobre o Brasil, observa-se redução da precipitação na Amazônia da ordem de 200 mm, o que representa cerca de 8 a 10% das precipitações da região; no Sul do Brasil a redução prevista é da ordem de 100 mm, o que representa 8% da precipitação média regional. Em parte do Centro Oeste e Norte as reduções são pequenas, próximas de zero. No Nordeste (costa e Centro variam entre 15 mm e 100 mm. A única área de acréscimo aparece em parte do Sudeste na cabeceiras dos grandes rios Paraná e São Francisco com valores da ordem de entre 15 mm a 100 mm. Estas estimativas podem estar sujeitas a importantes incertezas.

O relatório aponta também para a América do Sul, entre outras áreas do mundo os seguintes aspectos quanto a capacidade de adaptação, vulnerabilidade e principais aspectos(veja definições na tabela 2.3):

- A capacidade adaptativa humana na América Latina é pequena, particularmente com relação aos eventos de clima extremos e a vulnerabilidade é muito alta;
- Perdas e redução de glaciais terá impacto adverso no escoamento e no suprimento de água em áreas onde o degelo dos glaciais é uma importante fonte de disponibilidade (*alta confiabilidade*¹) ;
- Inundações e secas poderão se tornar freqüentes com inundações aumento a carga de sedimentos e a degradação da qualidade da água em algumas áreas (*alta confiabilidade*);
- Aumento em intensidade dos ciclones tropicais poderá alterar o risco de vidas, propriedades, e ecossistemas devido a chuvas intensas, inundações, ondas de mar devido a tempestades e prejuízos devido ao vento (*alta confiabilidade*);
- Redução da produção agrícola foram estimadas em muitos locais da América Latina, mesmo quando os efeitos positivos do CO₂ são considerados; cultivos de subsistência podem ficar sujeitos a limitações (*alta confiabilidade*);
- A distribuição geográfica das doenças veiculadas pela água devem se expandir em direção aos pólos e altas elevações a exposição da população a doenças como malária, febre amarela, cólera, dengue deverá aumentar (*média confiabilidade*);
- O ambiente costeiro e a população deverão ser afetados pelo aumento do nível do mar (*média confiabilidade*);
- Aumento da taxa de perda de variedades de biodiversidade (*alta confiabilidade*);

Tabela 2.3 Definições utilizadas (IPCC(2001 a)

Termo	Definição
Sensibilidade	O grau no qual o sistema é afetado, seja de forma adversa ou benéfica, por alterações climáticas de todo o tipo
Capacidade de adaptação	É a habilidade do sistema de se ajustar a mudança climática (incluindo a variabilidade e extremos) para moderadas perdas potenciais, tirar vantagem de oportunidades, e controlar as consequências.
Vulnerabilidade	É o grau no qual o sistema é suscetível para, ou incapaz de controlar os efeitos adversos da mudança climática, incluindo a variabilidade de extremos. A vulnerabilidade é função da condição, magnitude e proporção da alteração climática e sua variação que o sistema esta exposto, sua sensibilidade e a capacidade adaptativa

¹ Qualificação do níveis de avaliação : *muito alto* (95% ou mais); *alto* (67-95%); *médio*(33-67%); *baixo* (5-33%) e *muito baixo* (> 5%)

2.8 Ações internacionais para mitigação dos impactos

2.8.1 Acordos

A preocupação com o comportamento climático do globo devido a efeitos antrópicos iniciou-se na década de 80 com o questionamento sobre o desmatamento das florestas, redução da camada de ozônio e o efeito estufa. O acidente de Chernobyl na metade da década foi um grande divisor deste processo, quando se observou que ações em qualquer parte da Terra poderia afetar as pessoas em qualquer região, mostrando que as manifestações de cientistas não era uma mera ficção.

Em 1990, a Assembléia Geral das Nações Unidas criou o Comitê Intergovernamental de Negociação para uma Convenção – Quadro sobre Mudança do Clima (INC). O INC preparou um texto chamado de *Convenção sobre Mudança Climática*. Este documento foi assinado em maio de 1992 nas Nações Unidas e aberta para assinaturas dos países em junho de 1992 na Cúpula sobre Meio Ambiente no Rio de Janeiro. Esta convenção foi ratificada ou aderida assinada por 175 países até 1999, comprometendo-se com seus termos (Nações Unidas, 1999). A Convenção estabeleceu que os países desenvolvidos deveriam reduzir suas emissões de gases do efeito Estufa (GEE) para o ano 2000 em níveis anteriores a 1990. A Conferência das Partes (COP), órgão supremo da Convenção, reuniu-se inicialmente em 1995 em Berlim e concluiu que os compromissos eram inadequados e elaborou o chamado Mandato de Berlim que abriu a discussão por dois anos para definição dos compromissos para a primeira década do novo milênio. Esta fase concluiu com a terceira Conferência das Partes em Quioto no Japão em 1997 onde foram definidos que os países desenvolvidos deveriam reduzir em pelo menos 5% (com relação aos níveis de 1990) a emissão dos gases do efeito estufa até o período de 2008 a 2012.

Os gases do efeito estufa, como já mencionado nos itens anteriores, foram considerados no protocolo de Quioto como sendo: Dióxido de Carbono, Metano, óxido nitroso, hexafluoreto de enxofre e as famílias perfluorcarbonos.

A redução da emissão envolve na realidade a variação líquida de emissões, que é resultado da diferença entre a emissão e a absorção ou remoções como a absorção de CO₂ pelas plantas na fotossíntese.

Os compromissos assumidos na época pelos países europeus foram de reduzir em 8% os níveis de 90, os Estados Unidos mencionava 7%, Japão, Canadá, Polônia e Croácia em 6%. Outros países acordaram em manter os níveis de 90 como a Rússia e Ucrânia.

O acordo de Quioto entraria em vigor 90 dias após a sua ratificação por pelo menos 55 países, incluindo países desenvolvidos responsáveis por 55% do total das emissões. Como Estados Unidos e Federação Russa juntos produzem atualmente cerca de 51,7% praticamente condicionam a ratificação do protocolo de Quioto. Em 1997 o Senado americano definiu que o país não deveria ratificar o protocolo se os países em desenvolvimento como Brasil, China, México e Índia (que ficaram fora dos compromisso) não tivessem o mesmo compromisso para o mesmo período.

2.8.2 Mecanismos

Em face das dificuldades de implementação do protocolo e o impacto econômico que estas medidas podem produzir nos países foram discutidos em várias conferências depois de Quioto três mecanismos para atuar no processo de redução das emissões:

- Implementação conjunta de projetos;
- Comércio de emissões;
- Mecanismos de desenvolvimento limpo (CDM ou MDL).

Os dois primeiros a serem implementados principalmente nos países desenvolvidos onde existem as restrições ao crescimento das emissões. A implementação de projetos conjuntos (Joint Implementation) é a transferência e aquisição de unidades de redução de emissões resultante de projeto de mitigação de mudanças climáticas. O Comércio de emissões (Emissions trading) objetiva o comércio de emissões com o objetivo de mitigação das mudanças climáticas. O terceiro, que partiu de idéia brasileira, visa promover o desenvolvimento sustentável em países fora da classificação adotada (que possuem compromissos de redução de emissão). O desenvolvimento de projetos MDL em países em desenvolvimento pode gerar uma certificação de emissão reduzida (CER) que pode ser negociada com os países desenvolvidos.

As conferências internacionais e os estudos em desenvolvimento têm buscado mecanismos técnicos para a implementação destes elementos no cenário internacional. No entanto, após a posse do governo Bush existe uma mudança muito forte dos rumos da política americana no sentido de atendimento do protocolo de Quioto, apresentando recentemente uma alternativa ao cumprimento das metas anteriores.

2.9 Variabilidade climática

Para analisar o comportamento do clima tem sido utilizado de várias técnicas e a paleoclimatologia tem sido uma área recente que tem utilizado elementos de física e biologia para entender a variabilidade climática. O clima apresenta variabilidade do espaço e no tempo sazonal e interanual. A escala temporal pode variar de horas até milênios, os estudos em recursos hídricos geralmente estudam o comportamento dos sistemas hídricos dentro da sazonalidade anual e para períodos de dados geralmente da ordem de 15 a 80 anos. O estudo do comportamento climático na escala decadal ou tempos maiores permite analisar a influência do comportamento climático sobre o sistema global e, em específico os recursos hídricos.

Os processos geralmente analisados se referem a tendências de variabilidade solar, efeitos do El Niño – Southern Oscillation (ENSO), mudanças na atmosfera, mudanças na variabilidade da extensão e volume da terra e gelo e a variabilidade da biosfera são estudos que permitem analisar a variabilidade do clima. A variabilidade solar pode contribuir para a explicar as oscilações de temperatura de 9 a 10 anos, mas apenas somente este efeito não explica o comportamento da variabilidade. O ENSO mostra a inter-relação entre o aquecimento da temperatura do leste do oceano Pacífico Sul com a Southern Oscillation e influencia o clima de grande parte do globo. Estes processos apresentam uma certa ciclicidade. A grande dúvida sobre os mesmos é se o aquecimento global pode estar ampliando o seu efeito.

El Niño foi utilizado por pescadores peruanos no século 19 para descrever o aquecimento da temperatura do mar na costa do Peru no período do Natal. Atualmente o termo descreve a fase de aquecimento natural que ocorre da oscilação da temperatura do mar na

área tropical do Oceano Pacífico. A variação ou a oscilação da temperatura do mar está associada ao comportamento da atmosfera. O ENSO é o componente da atmosfera deste processo e indica a variação de pressão do ar entre Darwin na Austrália e o Sul do Pacífico, na ilha de Tahiti. Quando a pressão está alta em Darwin em Tahiti está baixa e vice-versa. El Niño e La Niña são as fases extremas da Oscilação do Sul (Southern Oscillation), sendo o El Niño a fase quente no leste do Pacífico e La Niña a fase fria.

Amostras de gelo, registros biológicos, registros geológicos, observações de superfícies do clima, variações do gelo e dos oceanos são elementos estudados para procurar separar os efeitos do aquecimento global e a variabilidade natural do clima. Existem ainda incertezas, apesar dos resultados apresentados nos itens anteriores quanto as alterações do clima já que todos os resultados obtidos para justificar o impacto do efeito estufa se baseiam em resultados do modelos GCMs, apesar de algumas evidências observadas. A incerteza existente na parametrização e na quantificação de certos processos podem transferir erros para as estimativas.

3. VARIABILIDADE HIDROLÓGICA

As alterações climáticas se refletem nas modificações das variáveis: precipitação, temperatura, vento, radiação, umidade, ou seja variáveis representativas do clima. No ciclo hidrológico a distribuição temporal e espacial da precipitação e evapotranspiração são variáveis de entrada na bacia, que podem produzir alterações nas estatísticas das séries de vazões líquida e sólida entre outras variáveis de resposta da bacia.

Estas mudanças não alteram somente as vazões para uma bacia existente, mas também alteram os condicionantes naturais que dão sustentabilidade ao meio natural como a fauna e flora. Ao longo do tempo a modificação climática gera outros ambientes em função da ocorrência de maior ou menor precipitação, temperatura, umidade, etc. Com a alteração destes condicionantes o escoamento proveniente das bacias também se alteram. É importante observar que o efeito da modificação climática (e mesmo variabilidade climáticas de longo prazo) produzem alterações do ambiente da bacia que resulta em modificações desta parte do ciclo hidrológico, além das alterações dos valores absolutos de entrada na bacia hidrográfica.

Em recursos hídricos geralmente admite-se que a variabilidade climática natural apresenta um comportamento estacionário que depende da representatividade da série histórica de observação. Como as séries históricas geralmente não são suficientemente longas, as mesmas podem apresentar variabilidade de estatísticas de acordo com amostra obtida ao longo do tempo.

A variabilidade hidrológica é entendida com as alterações que possam ocorrer na entrada e saídas dos sistemas hidrológicos. As principais entradas são a precipitação e a evapotranspiração (que depende de outras variáveis climáticas), enquanto que a principal variável de saída são o nível e a vazão de um rio.

Os principais efeitos da variabilidade hidrológico estão relacionados com:

- Variabilidade natural dos processos climáticos;
- Impacto da modificação climática;
- Efeitos do uso da terra e alteração dos sistemas hídricas.

Para analisar estes efeitos são utilizadas as variáveis citadas e suas relações. No capítulo seguinte são analisadas as relações entre as variáveis de entrada e saída e tendências.

3.1 Relação entre variáveis hidrológicas

A relação entre as variáveis de entrada e saída dos sistemas hidrológicos apresentam um comportamento não-linear (figura 3.1) em função dos diferentes sub-sistemas e características do sistema físico. Geralmente a precipitação, sua distribuição temporal e espacial é a principal variável de entrada. A evaporação apresenta menor variabilidade e menor efeito nas regiões mais úmidas. Como exemplo, na figura 3.2 é apresentada a variabilidade de precipitação, evaporação e vazão onde se observa que as anomalias (variação com relação a média) variam de acordo com o tipo da variável e suas características.

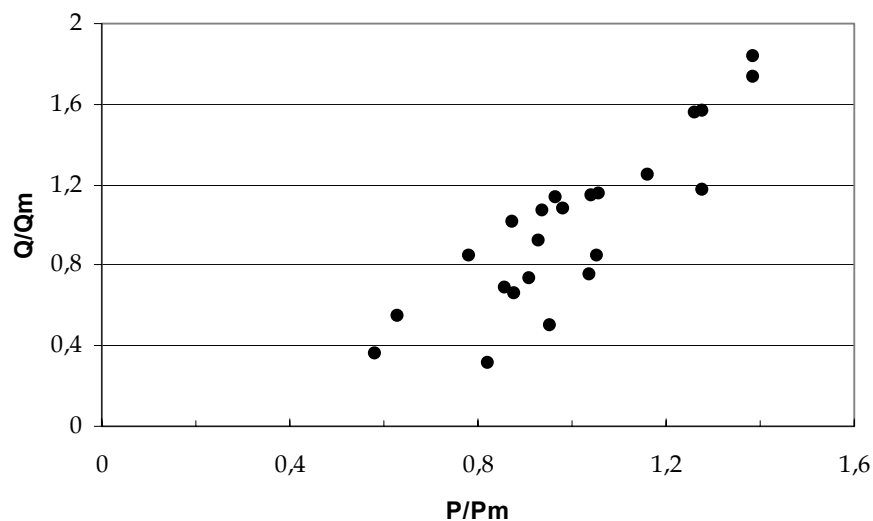


Figura 3.1 Relação entre as anomalias de vazão e precipitação na bacia do rio Faxinal, afluente do rio Uruguai

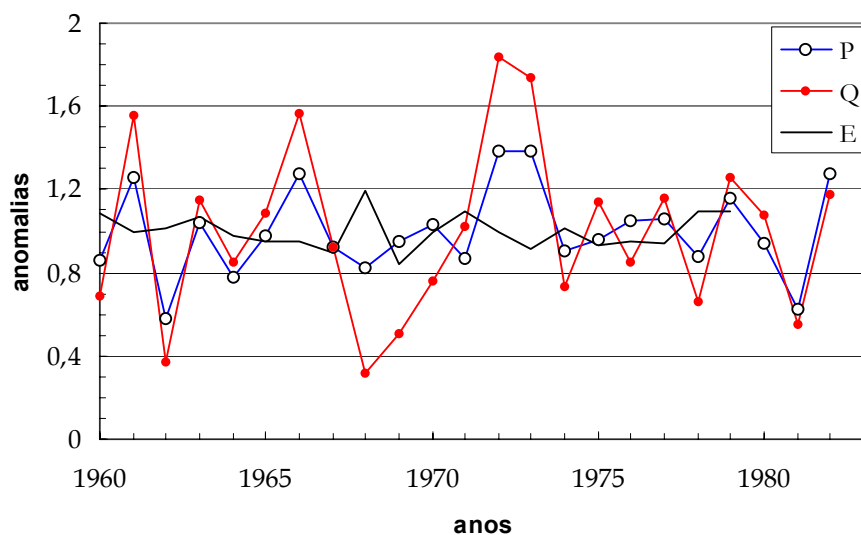


Figura 3.2 Variabilidade de anomalias de precipitação (P/Pm), Evaporação (E/Em) e Vazão (Q/Qm) de um afluente do rio Uruguai (rio Faxinal)

A alteração da precipitação apresenta impacto relativo diferenciado sobre a vazão da bacia hidrográfica (figuras 3.2 e 3.3). Observa-se nos dados que nos anos com valores extremos (inundações e secas) a resposta da bacia se amplifica com relação a variação adimensional da precipitação. Esta condição ocorre devido a proporcionalidade como os valores de precipitação se relacionam com os de vazão. Nos anos mais úmidos o aumento de precipitação produz maior aumento da vazão já que a infiltração aumenta pouco e a evapotranspiração potencial diminui pelo aumento da chuva, o que aumenta o proporcionalmente mais o escoamento. No sentido contrário, nos anos secos, a redução de precipitação, aumento da evapotranspiração reduz em maior magnitude a vazão. Portanto,

a anomalia da vazão (resposta da bacia hidrográfica) amplifica os efeitos na precipitação, se considerarmos apenas o efeito da anomalia da precipitação (figura 3.3 e figura 3.4).

Em climas semi-áridos o efeito combinado da diminuição da precipitação e aumento da evapotranspiração potencial é significativo e o escoamento deve ser analisado através da combinação de efeitos destas variáveis climáticas.

Nos climas úmidos como a região Sudeste do Brasil, como a evapotranspiração varia pouco, utiliza-se a muito mais a precipitação para caracterizar a vazão, já que na relação do coeficiente de escoamento está embutida a perda para a evapotranspiração. Num clima semi-árido o efeito combinado é mais significativo.

Na figura 3.5 é apresentada as anomalias de precipitação evapotranspiração potencial na região de Estreito no Sul da Bahia. Na figura 3.6 é apresentada a anomalia de E/P para o mesmo período junto com a sua média móvel de três anos. Observa-se na segunda figura o aumento sistemático de E/P de 1991 a 1999, o que agrava a disponibilidade hídrica. Na figura 3.7 é apresentada a relação entre E/P e a vazão, o que mostra uma tendência com pequena variabilidade, mas deve-se considerar que as vazões foram obtidos com modelo precipitação-vazão.

Esta análise procura destacar que na relação entre precipitação e vazão (dentro de uma visão macro) os seguintes aspectos devem ser destacados:

- existe uma natural amplificação das anomalias da vazão (resposta da bacia) em função das anomalias da precipitação e da evapotranspiração potencial;
- a relação não-linear entre precipitação e vazão depende do armazenamento, de acordo com o tamanho da bacia e da evapotranspiração principalmente em regiões semi-áridas;
- o coeficiente de escoamento ($C = Q/P$) se altera em função das relações citadas.

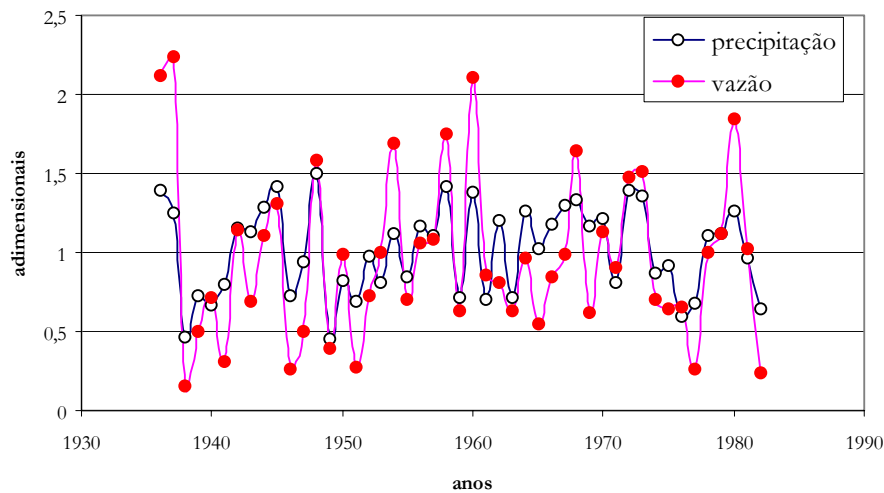


Figura 3.3 Precipitação e vazão no rio Verde Pequeno (vazões obtidas por modelo hidrológico)

3.2 Efeito das variáveis climáticas e uso do solo sobre o escoamento

No item anterior foram descritos os efeitos que poderiam ser produzidos no escoamento pela variabilidade das variáveis climáticas. Pequenas variações de precipitações devido a variabilidade ou modificação climática podem produzir significativo aumento no escoamento (veja item anterior). Com base na equação do coeficiente de escoamento e de suas variações entre dois estágios pode-se obter

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right) - 1 \quad (3.1)$$

onde ΔQ é a variação de vazão com relação a uma vazão Q ; C_2 é o coeficiente de escoamento resultante da variação; C_1 é o coeficiente de escoamento = Q/P ; ΔP é variação de precipitação acima da precipitação P . Considere a relação entre $C = f(P)$ como obtido para a bacia da figura 3.8. Através de tendência média é possível estimar o coeficiente de escoamento em função da variação de P . Utilizando esta função média e a equação 3.1 é possível estimar a variação da vazão em função da precipitação e de sua variação percentual (figura 3.9).

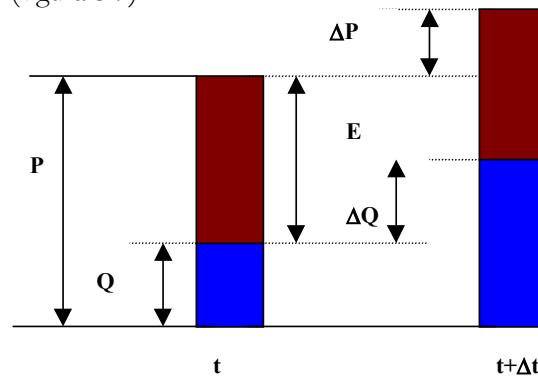


Figura 3.4 Caracterização do aumento da precipitação, redução da evapotranspiração e aumento da vazão.

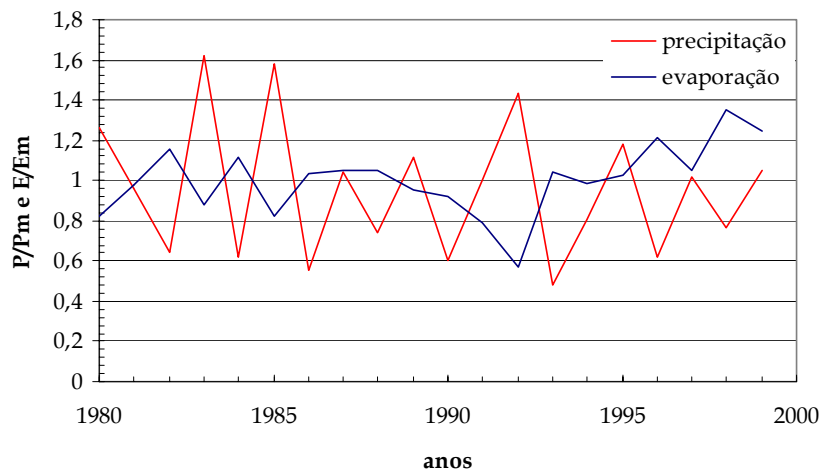


Figura 3.5 Variação de precipitação e evaporação potencial em Estreito

O efeito do uso do solo na relação entre o escoamento e a precipitação faz com que a relação entre o coeficiente de escoamento e a precipitação se desloque como se observa na figura 3.10 (impermeabilização), já que a relação entre a precipitação e vazão se altera. Com o desmatamento ocorre aumento do escoamento pela redução da evaporação real, aumentando o coeficiente de escoamento. Este aumento é maior de acordo com a substituição da cobertura como foi destacado no capítulo 1. A figura 3.10 apresenta a variação do coeficiente de escoamento para dois cenários de urbanização de uma bacia urbana em Porto Alegre, mostrando claramente o efeito da alteração da cobertura e da drenagem sobre a relação entre precipitação e escoamento na bacia.

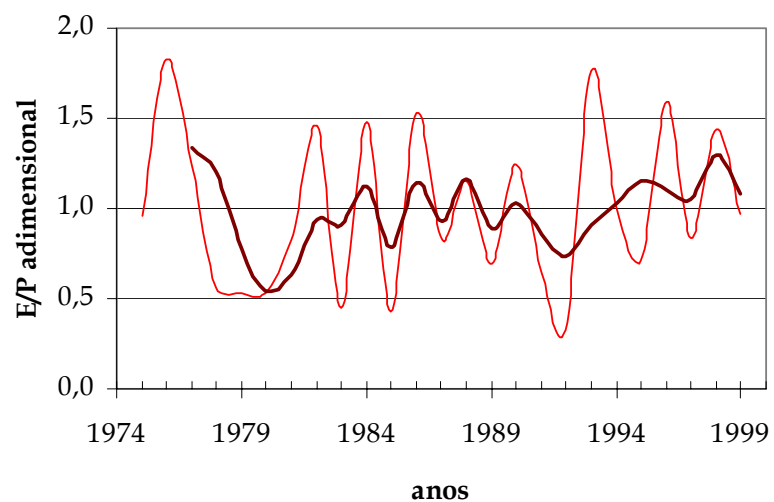


Figura 3.6 Variação da relação de E/P e sua média móvel de três anos.

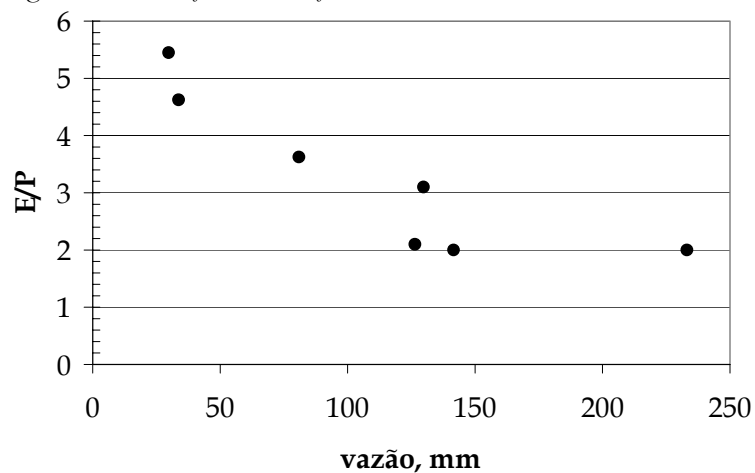


Figura 3.7 Relação de E/P com a vazão (obtida de modelo hidrológico) para bacia do rio Verde Pequeno, próximo a Estreito.

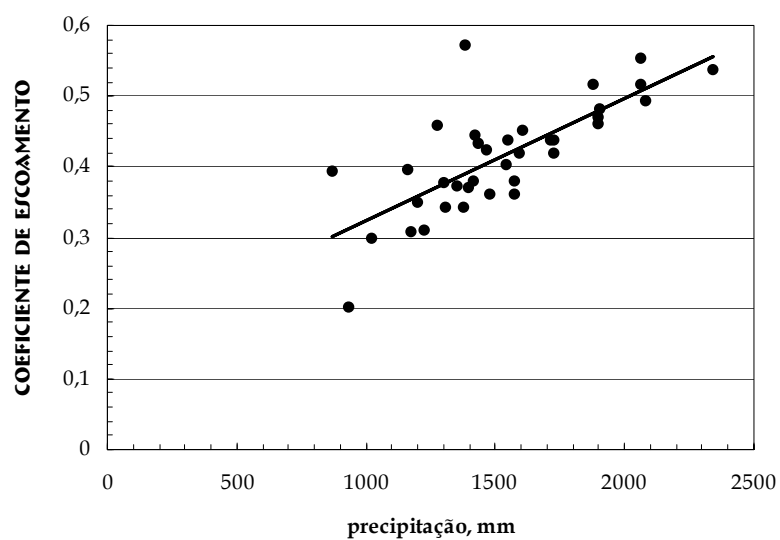


Figura 3.8 Coeficiente de Escoamento em função da precipitação anual na bacia do Butuí

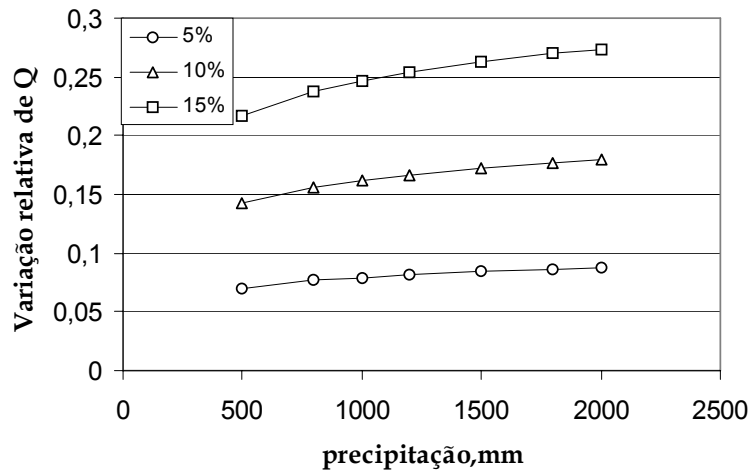


Figura 3.9 Variação da vazão em função da precipitação e do seu do aumento relativo (%) na bacia do Butuí.

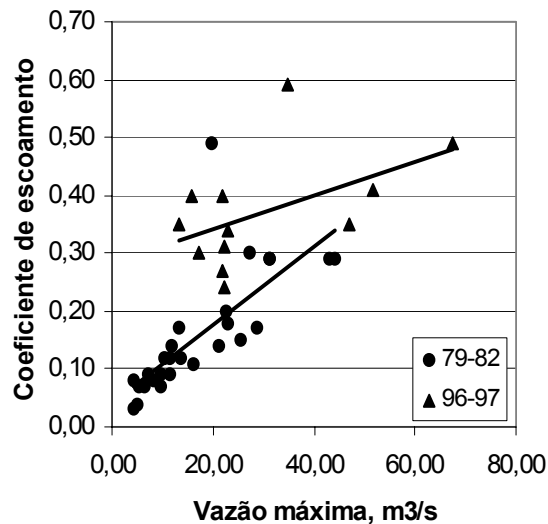


Figura 3.10 Coeficiente do escoamento em função da vazão para a bacia do arroio Dilúvio em Porto Alegre

3.3 Variabilidade observada em algumas bacias brasileiras

3.3.1 Bacia do rio Paraná

Efeito do Uso do Solo

A bacia do rio Paraná sofreu grande desmatamento ao longo do século vinte. Nas figuras 3.11 e 3.12 pode-se observar a evolução deste desmatamento e observa-se que na década de 60 a região que cobre os dois Estados, que representa na maior parte a bacia do rio Paraná, já se encontrava com pequena cobertura vegetal natural. O desmatamento no Estado de São Paulo é anterior ao do Paraná, que em 1965 possuía 23,6 % de cobertura, na sua maioria na área de contribuição direta ao rio Paraná no trecho atual do reservatório de Itaipu.

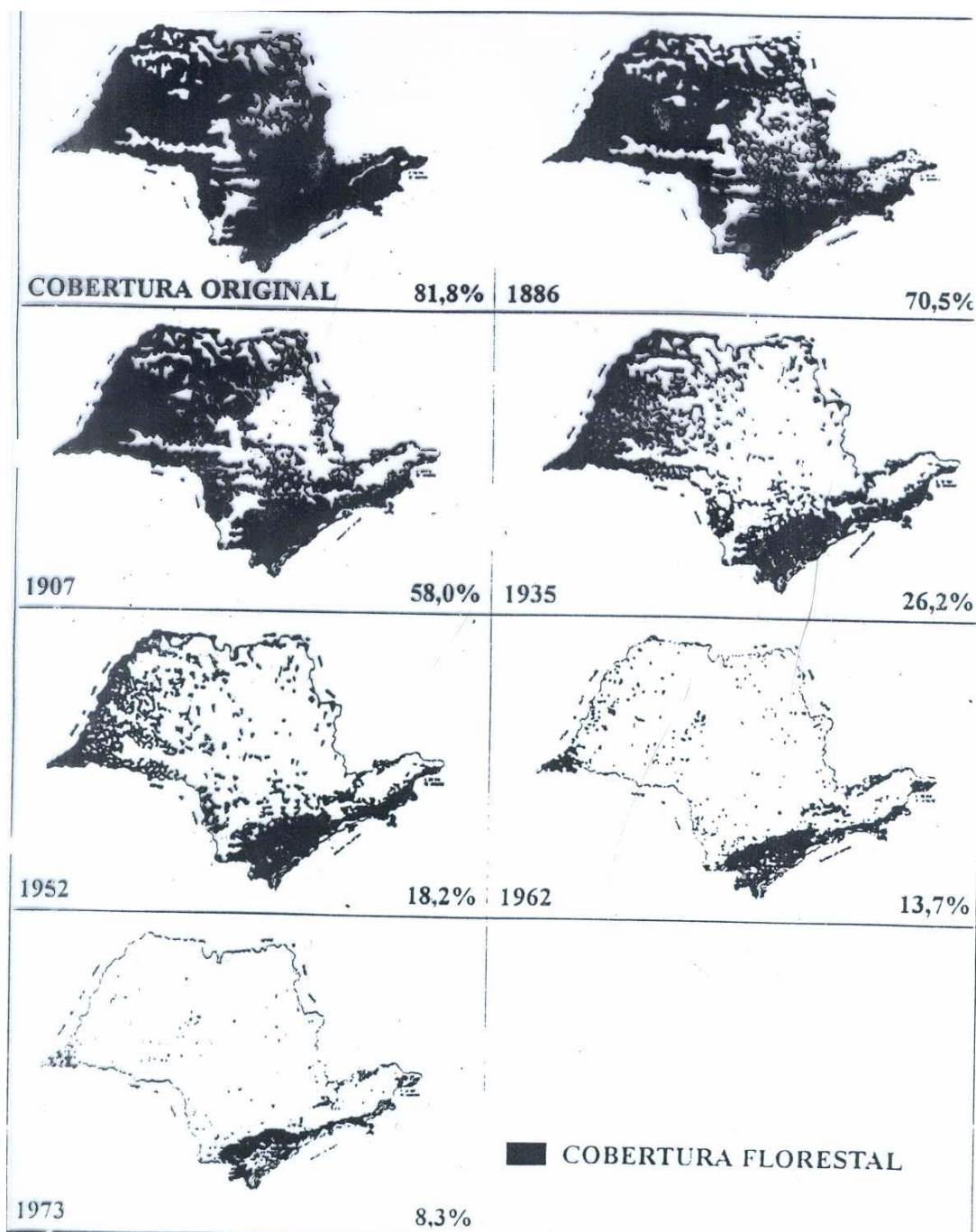


Figura 3.11 Desmatamento no Estado de São Paulo

O desmatamento ocorrido foi realizado para diferentes usos. Em São Paulo, inicialmente foi utilizado para café e depois para a cana de açúcar e no Paraná, o processo foi semelhante, mas o café foi substituído por plantios anuais como a soja e milho. No final da década de 60 houve uma grande geada no Paraná que matou grande parte das árvores de café e ocorreu a substituição do café (que leva cerca de 4 anos para crescer e dar resultados econômicos) pela soja, plantio anual com forte modificação nas características hidrológicas

das bacias hidrográficas. Na figura 3.13 é apresentada a amostra da evolução do uso do solo numa região do Paraná. Na tabela 3.1 é apresentada a evolução dos valores das figuras 3.12 e 3.13 e do Leste do Paraguai.

Tabela 3.1 Evolução do desmatamento da cobertura original

Ano	São Paulo %	Ano	Paraná %	Ano	Leste do Paraguai %
< 1886	81,8	< 1890	83,4	1945	55
1886	70,5	1890	83,4	1960	45
1907	58,0	1930	64,1	1970	35
1935	26,2	1937	58,7	1980	25
1952	18,2	1950	39,7	1990	15
1962	13,7	1965	23,9		
1973	8,3	1980	11,9		
		1990	5,2		

Kroner (1990) apresentou um estudo detalhado da evolução da erosão do solo no estado do Paraná entre 1952 e 1985. Para caracterizar esse processo, o autor escolheu quatro áreas de estudo (aproximadamente de 100.000 ha), como amostras de quatro regiões do Estado (figura 3.13). As áreas 2, 3 e 4 são representativas do terceiro planalto ou planalto de Guarapuava e a região 1 é a amostra representativa do segundo ou planalto de Ponta Grossa. Em cada área foram realizadas as avaliações do uso do solo entre 1952 e 1980, entre outras atividades.

Nas figuras 3.14 a 3.17 é apresentada a evolução da mudança do uso do solo nas quatro áreas entre 1952 e 1985. Na região 1 (Ponta Grossa), pode-se observar que as áreas de florestas não sofreram grande alteração no período; houve redução de pastagem em detrimento do aumento de culturas anuais. Na região 2 (Sudoeste) observou-se uma forte redução de florestas, inicialmente em detrimento da pastagem e do café (menor proporção).

No entanto, após os anos 70 houve um forte incremento das culturas anuais. Na região 3 (Norte) observou-se que já em 1952 a área de floresta era pequena, com predominância do café e pastagem. Na década de 1970, como na região anterior, inicia um forte incremento das culturas anuais, reduzindo o café e as pastagens. Na região 4 (Oeste) observou-se uma sistemática redução das florestas e das áreas de café (principalmente do primeiro) em detrimento principalmente das pastagens. As culturas anuais não representaram uma área significativa.

O Paraná na primeira metade do século desenvolveu principalmente a cafeicultura. Com as geadas de 1969 a 1975 iniciou-se um novo ciclo, que transformou o uso de solo de café para soja. Essa última uma típica cultura anual, muitas vezes plantada em rotação com o trigo, de acordo com a sazonalidade. Esse processo teve uma intensa mecanização sem a apropriada prática de conservação do solo. Na figura 3.18 é apresentada a evolução do número de tratores/colheitadeiras no estado do Paraná entre 1960-1985. Novamente, observa-se um forte gradiente de aumento de máquinas após a década de 70. Parchen e Bragagnolo (1991) apresentaram os principais impactos desse processo na região, que são os seguintes:

- depauperação dos solos arenosos no noroeste paranaense, formação de voçorocas e início do processo de desertificação;
- degradação física e empobrecimento, aliado a fortes processos de erosão laminar nos solos derivados do derrame basáltico nas regiões oeste e norte do Estado;
- redução da cobertura vegetal, assoreamento dos rios, contaminação por agrotóxicos.

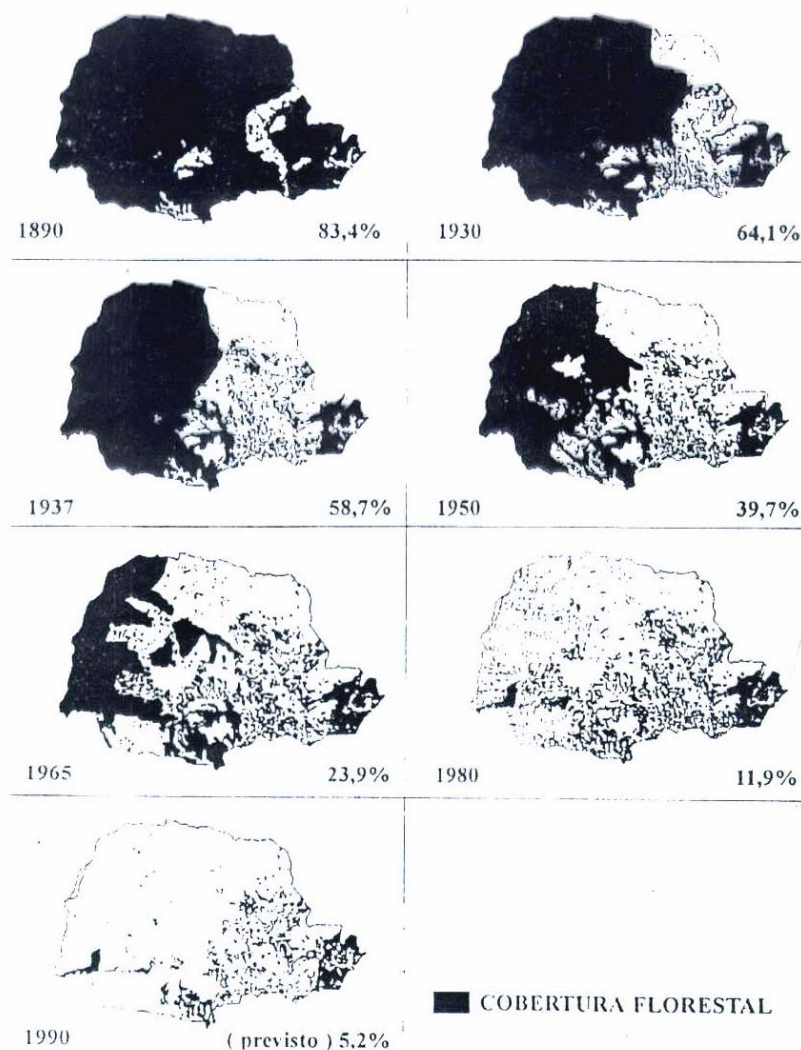


Figura 3.12 Evolução do desmatamento no Paraná (Gubert Filho, 1986 apud Themag, 1994a)

Em 1978 o governo Federal instituiu o Programa Nacional de Conservação do Solo e o governo do Paraná criou a versão estadual chamado de Programa Integrado de Conservação dos Solos, seguido por outros programas na década de 80. Esses programas buscaram disseminar a prática de conservação do uso do solo, que permite uma maior infiltração da precipitação em detrimento do escoamento superficial, que gera maior erosão do solo fértil. Esse programa se desenvolveu principalmente após 1980, com base em microbacias. Esses programas tem três grandes estratégias técnicas:

- aumento da cobertura vegetal do solo, visando reduzir a energia do impacto das gotas de chuva;
- aumento da infiltração da água no perfil do solo visando reduzir o escoamento superficial e promover maior disponibilidade de água no perfil do solo;
- controle do escoamento superficial, visando reduzir os efeitos erosivos da água de escoamento superficial, evitando o transporte de solo para os mananciais e facilitando o processo de infiltração da água.

Na tabela 3.2 são apresentados os resultados dessas práticas no Estado entre 1984 e 1990. Kroner (1990) apresentou os indicadores de conservação do solo anteriores a década de 80 através da percentagem da área com curvas de nível para as quatro regiões identificadas na figura 3.13. Essa evolução é apresentada nas figuras 3.14 a 3.18. Como se observa nesses gráficos, esse processo iniciou-se após a década de 70 com a tendência de aumento de culturas anuais.

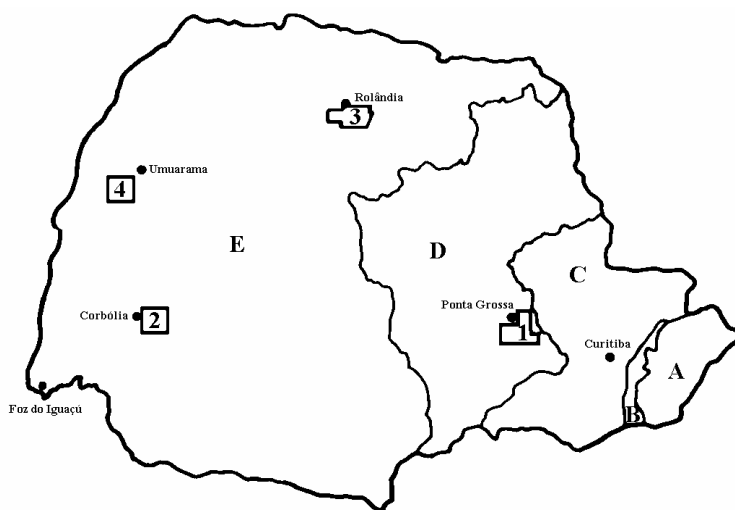


Figura 3.13 Áreas de amostragem no Estado do Paraná, na bacia do rio Paraná

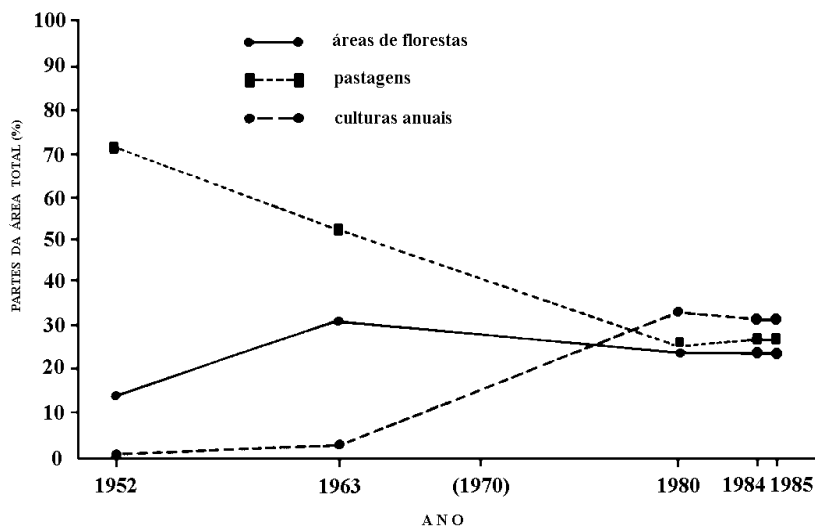


Figura 3.14 Evolução do uso do solo na região 1 (Kroner, 1990)

Tabela 3.2 Resultados de práticas agrícolas no Paraná (Parchen e Bragagnolo, 1991)

Prática	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	total
Terraceamento (1000ha)	442,5	156,9	150	300	650	368	262	2.329
Reflorestamento (ha)	2.734	4.634	2.620	3.460	5.000	12130	11.260	41.841
Adequação de estradas (km)	665	989	1.975	5.734	5.000	7.600	6.250	28.213
Número de microbacias (valores acumulados)	338	498	547	680	1.017	1.150	1.200	1.200

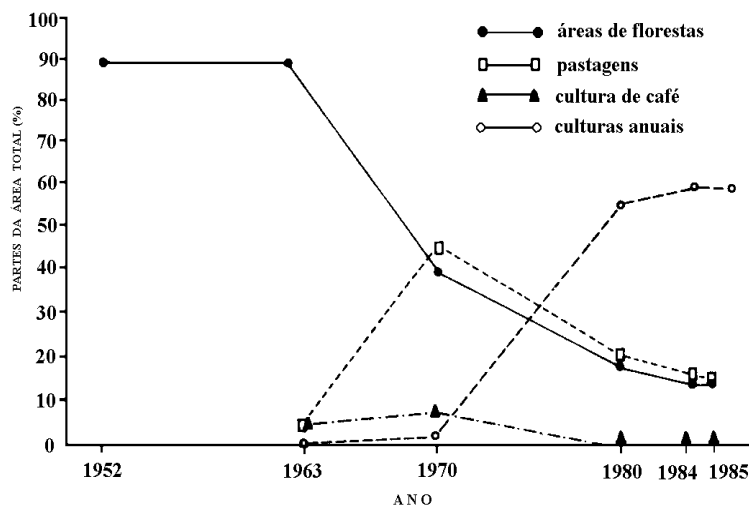


Figura 3.15 Evolução do uso do solo na região 2 (Kroner, 1990)

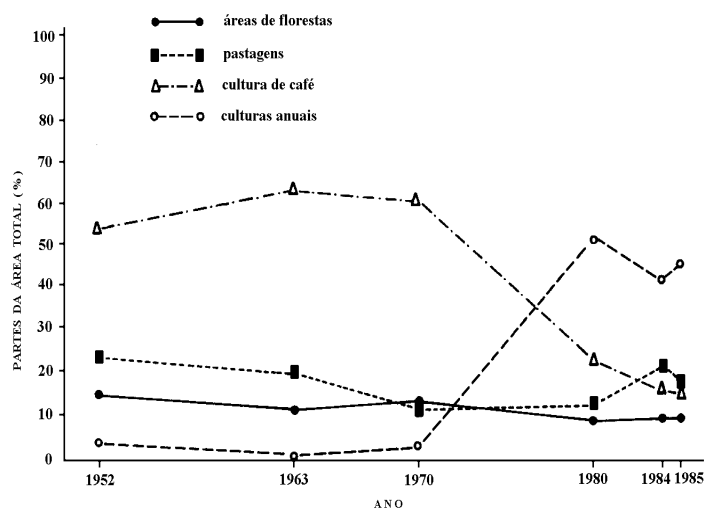


Figura 3.16 Evolução do uso do solo na região 3 (Kroner, 1990)

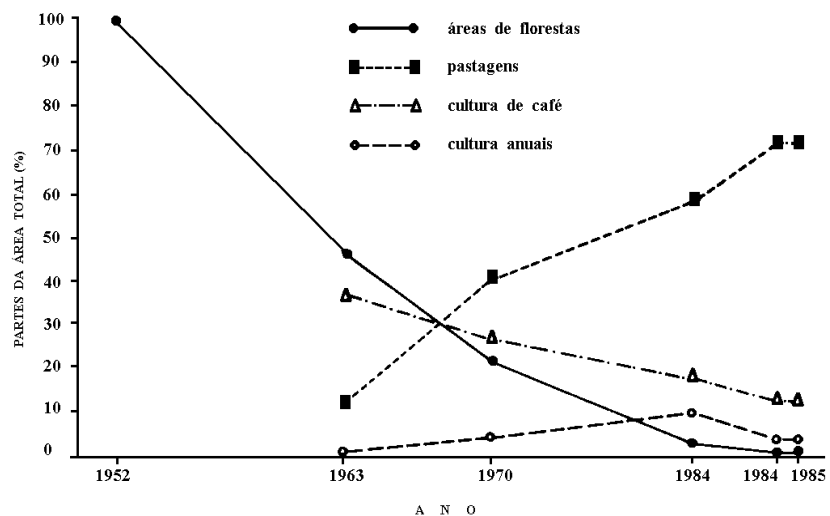


Figura 3.17 Evolução do uso do solo na região 4 (Kroner, 1990)

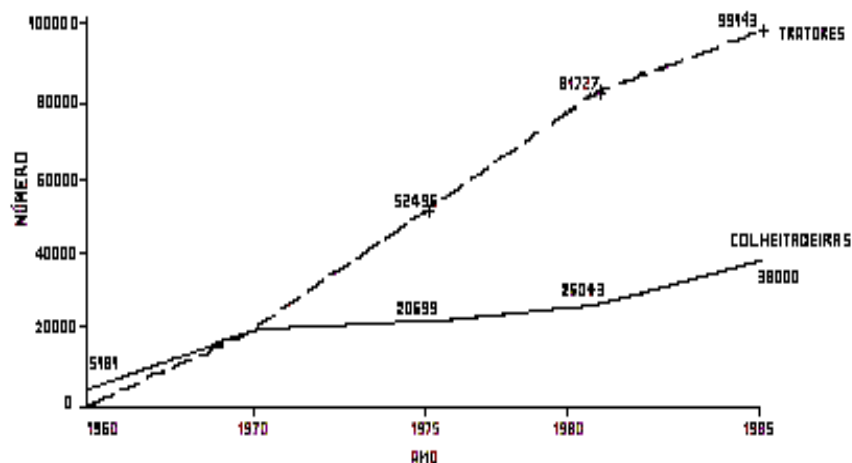


Figura 3.18 Evolução dos tratores e colheitadeiras no Paraná (Parchen e Bragagnolo, 1991)

Variabilidade climática

Barros et al. (1995) descobriram tendências positivas na precipitação anual na maior parte da Argentina no período 1916-91, especialmente depois da década cinquenta. Eles apresentaram a variação média espacial da precipitação anual, calculada com registros dos postos Paraná, Rosário, Concórdia, Buenos Aires, las Flores Azul e Mar del Plata, que *"mostra um aumento na média de 850 mm na década 20 até 1150 mm na década de 80. A maior parte desse aumento ocorreu depois de 1960."* Os autores também dizem que *"na parte nordeste da Argentina e no Paraguai....[houve] um aumento marcante até 1960, seguido por um decréscimo até o presente"*.

Anderson et al (1993) realizaram análises estatísticas dos registros de precipitação e vazão na bacia Paraná-Paraguai do período 1900-1992, para verificar:

- se as enchentes ocorreram com maior frequência, e foram maiores, na década 1982-92 do que no período anterior;
- se a variabilidade na vazão da bacia poderia ser explicada em termos de flutuações aleatórias, ou se é necessário considerar outros fatores (mudanças climáticas; mudanças no uso da terra; construção de reservatórios) para explicar as variações observadas.

Os autores concluíram que:

- as enchentes foram maiores, e aconteceram mais frequentemente, em anos recentes do que no início do século;
- as estiagens foram menos frequentes, e menos extremas, em anos recentes;
- vazão anual foi maior, e a distribuição intra-anual foi diferente, em anos recentes;
- as variações na precipitação explicam uma grande parte da variação da vazão e ocorrência de enchentes;
- mudanças na variação intra-anual de vazão podem ser explicadas em termos de mudanças na distribuição intra-anual de precipitação, e em termos da operação dos reservatórios no sistema Paraná, que demoram a propagação das enchentes;

- não há evidência consistente, estatística ou não, que mudanças na dinâmica chuva-descarga têm papel importante na ocorrência de enchentes.

Variabilidade das séries históricas de vazão

As séries de vazões na bacia do rio Paraná apresentam uma importante não estacionariedade entre os períodos antes e depois da década de 70. Na tabela 3.3 são apresentadas as estatísticas destes valores para várias seções do rio Paraná. Pode-se observar que o incremento de vazão varia na vizinhança de 30%. Este processo também é observado em várias sub-bacias do rio Paraná em território brasileiro. As perguntas que naturalmente são feitas são:

Esta variação de vazão é resultado de aumento de precipitação ou da alteração do uso do solo?

Caso tenha sido devido ao aumento de precipitação, será devido a modificação climática ou variabilidade natural do clima?

Tabela 3.3 Vazão média anual $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Local	Antes de 1970	1970-1990	Aumento %
Rio Parana em Jupia	5,852 ⁽⁺⁾	6,969	19,1
R. Paranapanema em Rosana	1,057 ⁽⁺⁾	1,545	46,2
R. Paraná em São José	6,900 ⁽⁺⁾	8,520	23,3
R. Paraná em Guaira	8,620 ⁽⁺⁾	11,560	34,1
R. Paraná em Posadas	11,600 ^(*)	14,255	22,9
R. Paraná em Corrientes	15,265	19,510	27,8

+ series de 1930-1970; * series de 1901-1970

Segundo Eletrobrás (1995) não teria ocorrido esse aumento e trata-se de apenas uma questão amostral. O estudo obteve estacionariedade em dois períodos 1931/1970 e 1978/1992. Esses dois períodos poderiam representar dois patamares distintos de condição da bacia (duas realidades diferentes, antes e depois dos efeitos do desmatamento seguido do uso com culturas anuais) e, portanto, estacionários dentro de cada um deles, já que os grandes gradientes de mudança ocorreram entre 1970 e 1980. Os autores também escolheram vários períodos de diferentes tamanhos, encontrando alguns com aumento de vazão e outros com diminuição. No caso da diminuição, os períodos escolhidos, com exceção de dois, encontram-se todos antes de 1970. Os dois no período, depois de 1970, na realidade são um único, porque existe uma grande superposição. Da mesma forma que o argumento anterior, esse período poderia ter uma pequena diminuição, depois da bacia ter atingido um estágio de desmatamento no final da década de 70. Além disso, com as práticas conservacionistas iniciadas em 1978 no estado do Paraná a bacia poderia ter apresentado uma redução do escoamento superficial. Além disso, a análise realizada desprezou a correlação interanual das vazões, que pode ser importante devido a grande magnitude da área de drenagem envolvida, que pode regularizar naturalmente o escoamento mínimo entre um ano e outro. O que se observa na série é o aumento gráfico de patamar de vazão média entre o período 1932-1970 e 1971-1992.

Outro questionamento que pode ser colocado é o da inconsistência das séries hidrológicas em função da sua curva de descarga e/ou assoreamento ou erosão das seções de medição. Esta questão não é real pois observou-se a mesma tendência em diferentes locais (tabela 3.3) da bacia, o que seria improvável que todos apresentassem o mesmo tipo de tendenciosidade. Nas figura 3.19 é apresentada a série de vazões médias anuais do rio Paraná em Guaíra, onde se observa nitidamente o aumento das vazões citadas.

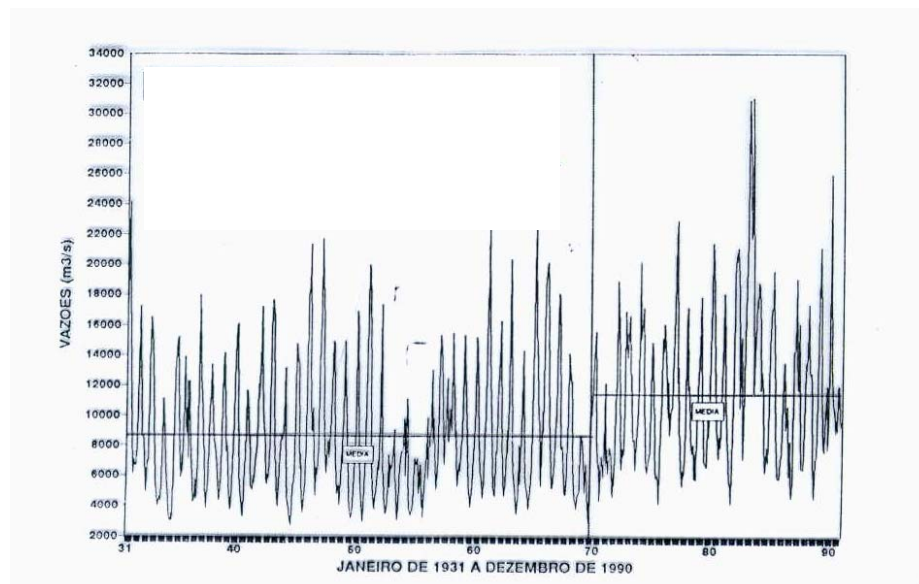


Figura 3.19 Vazões em Guaíra no rio Paraná (Itaipu, 1995)

As causas potenciais desse aumento de vazão são as seguintes:

- aumento da precipitação no período devido a modificação climática ou condições amostrais ;
- modificação do uso do solo por desmatamento;
- variabilidade amostral da vazão, em conjunto com a precipitação.

Nesse estudo e nos anteriores foram levantados elementos circunstanciais, para caracterizar cada um dos elementos acima discutidos a seguir:

Aumento da Precipitação : Os elementos atualmente existentes sobre a modificação climática, como descrito no capítulo anterior, mostram que existe uma tendência de aquecimento do globo e aumento da temperatura. O aumento ou diminuição da precipitação, depende de cada região em específico.

As previsões apresentadas são baseadas em modelos que ainda apresentam grandes incertezas e as projeções de modificação foram realizadas para o próximo século, enquanto que as alterações atuais, se existem, estão dentro da faixa de flutuação natural dos processos climatológicos.

A outra hipótese de aumento da precipitação, se refere ao impacto devido ao desmatamento ocorrido na região Sul e Sudeste. Nos resultados apresentados de ensaios de modelos na Amazônia sobre o desmatamento de grandes áreas tem demonstrado, que existe um ciclo interno que pode afetar a precipitação regional, o seu impacto é, em geral, de reduzir a precipitação com o desmatamento e não de aumentar. No entanto, deve-se considerar também, que as incertezas dessas avaliações ainda são muito grandes.

A série de precipitações da bacia incremental apresentou uma média cerca de 6% superior, para o período de 1971 a 1990, se comparado com o período de 1930-1970. Esse aumento não se mostrou estatisticamente significativo no período, para indicar qualquer potencial alteração climática, e pode ser simplesmente uma flutuação de uma série temporal. Existe,

no entanto, a possibilidade que parte deste aumento depois dos anos 80 tenha algum componente de alteração climática.

Desmatamento : A literatura é unânime em experimentos, demonstrando que *o desmatamento produz aumento de escoamento médio* (veja capítulo 1). Com relação as estiagens, o desmatamento pode provocar uma diminuição ou aumento do escoamento mínimo, de acordo com as condições do solo e com o tipo de tratamento usado no desmatamento e uso do solo, após o desmatamento.

Essas conclusões, no entanto, se referem principalmente a bacias de pequena escala, onde o experimento pode ser controlado. Para bacias maiores a literatura é pobre sobre o assunto porque a variabilidade espacial dos diferentes fatores que interferem no escoamento é muito grande.

No entanto, deve-se observar alguns indícios importantes na bacia incremental em estudo:

- o desmatamento inicial (até 1970) na bacia incremental foi utilizado para a implantação do café na região Norte do estado do Paraná. O café tem características semelhantes a uma área com mata, no que se refere ao efeito sobre o escoamento já que o solo é protegido e a cobertura é mantida;
- na década de 70 iniciaram os seguintes processos: (a) forte incremento de culturas anuais como o soja, milho e trigo, que geram maior escoamento e se mantém ao longo dos anos; (b) aumento da mecanização, que aumenta ainda mais o escoamento médio, devido a compactação do solo(ver item anterior); (c) incremento do desmatamento no oeste do Paraná. Esse tipo de uso do solo tem condições de provocar um aumento mais importante na vazão média, como a literatura tem mostrado (capítulo 2).
- no final da década de 70 iniciou um forte processo de conservação do uso do solo no Paraná. O processo de conservação do solo induz a um aumento da infiltração, o que pode permitir um aumento das vazões mínimas.
- a literatura mostra, também, que o desmatamento seguido de ocupação do solo com culturas anuais, a bacia não recupera o balanço hídrico, como acontece quando ocorre o crescimento da floresta natural.

Esses indícios levam a crer que parte do aumento das vazões sejam devido ao desmatamento da bacia incremental. A maior dificuldade é conhecer o real impacto do desmatamento sobre bacias do porte da bacia incremental, que é um dilema da hidrologia de escala. As dúvidas principais do problema são as seguintes:

- O aumento do escoamento numa pequena bacia (de alguns hectares) devido ao desmatamento, pode ter seu efeito reduzido se, para a água se deslocar sobre a bacia, sejam criadas condições hidrológicas de evapotranspiração do escoamento excedente, que restituam, numa escala maior, as condições anteriores com florestas ou minimizem seus efeitos;
- Potencialmente as principais condições podem ser as seguintes:
 - (c) Maior extravasamento das vazões durante as cheias e como as cheias ocorrem no período de maior evaporação potencial, o excesso poderia ser restituído a atmosfera;
 - (d) a água no seu transporte pelos rios e no subsolo, ao longo da bacia, permite que os volumes, antes interceptados e evaporados. Esses efeitos podem ser maiores ao longo de uma bacia grande.

Consequências do aumento verificado na vazão : O aumento verificado na vazão pode ser consequência da composição de dois efeitos:

Aumento da precipitação, que mesmo em pequena escala pode produzir aumento na vazão. Observou-se um incremento do coeficiente de escoamento que pode ser devido as alterações da bacia ou da precipitação. A dificuldade maior decorre em separar os dois efeitos em termos quantitativos (veja estimativas nas páginas seguintes).

Aumento devido as condições de alterações do solo na bacia incremental como discutido acima. Dessa análise observa-se que existem várias incertezas que dificultam uma identificação cabal, quantitativa de quais são as causas. Existem, na realidade, vários indícios. Portanto, a pergunta principal seria :

As alterações de vazões são permanentes ou transitórias?

Essa pergunta é óbvia porque o aumento da disponibilidade hídrica influi em vários setores dos recursos hídricos como o de energia, abastecimento, irrigação, etc.. Sendo assim, reunindo os elementos até aqui tratados podemos concluir com o seguinte:

- Os indícios com os elementos até agora existentes mostram que o resultado do aumento (se não amostral) das vazões pode ser devido a composição de dois efeitos: (a) aumento da precipitação no período; (b) modificação do uso do solo;
- O aumento da precipitação tem maior probabilidade de ser amostral, portanto não tem garantida a sua permanência, podendo passar no futuro por ciclos de menores precipitações;
- o aumento devido as modificações do uso solo devem ser permanentes;

Muller et al (1998) analisaram dados de precipitação do estado do Paraná e São Paulo procurando identificar as alterações das variáveis hidrológicas nas sub-bacias contribuintes do rio Paraná, com área total da ordem 500.000 km². Foram utilizados dados de precipitação e vazão das bacias contribuintes do rio Paraná. Na tabela 3.4 são apresentados resultados sínteses das sub-bacias do Paraná. Pode-se observar claramente o aumento nas precipitações e das vazões. A dificuldade continua sendo de separar o efeito de uso do solo da variabilidade climática. Os autores calcularam com modelo, a evapotranspiração real e estimaram que no período depois de 1970 ocorreu diminuição da mesma em cerca de 10%, mesmo considerando que houve aumento de precipitação. Destas informações pode-se observar o seguinte:

- (a) o aumento de vazão é menor nas bacias do estado de São Paulo onde o desmatamento já tinha ocorrido muito antes de 1970, portanto é de esperar que as vazões analisadas possam, refletir apenas a variabilidade climática. Na tabela 3.4 observa-se que o aumento do coeficiente de escoamento entre os dois períodos não foi muito alto para as bacias do Grande e do rio Tietê. Analisando a relação entre precipitação e coeficiente de escoamento, verifica-se que os mesmos são compatíveis com o aumento de precipitação. Utilizando estes dados na equação 3.1 obtém-se cerca de 20,9 e 34,6% de aumento de vazão, respectivamente. Na tabela 3.4 os valores são 18% e 34%. Isto indica que o aumento do coeficiente de escoamento e das vazões estão diretamente relacionado com o aumento de precipitação;
- (b) nas bacias do Paranapanema e Incremental, onde o desmatamento ocorreu na década de 60 e a mudança de tipo de plantio depois de 1970 (veja itens anteriores),

observou-se aumento significativo no coeficiente de escoamento entre os dois cenários que não se justificam apenas pelo aumento da precipitação. Neste caso, utilizou-se a tendência entre C e P para determinar C_2 a partir de P_2 . Com C_2 , C_1 e $P/\Delta P$ estimou-se o aumento de vazão correspondente devido a precipitação e obteve-se 35% e 20%, respectivamente. Na tabela 3.4 observa-se que estes valores são 45 e 44%. Numa avaliação simplista pode-se concluir que a diferença entre os valores 10% e 24% corresponderiam ao efeito do uso do solo nas duas bacias. Estes valores representam 25% e 55% da variação total no período, respectivamente;

- (c) Estas conclusões foram obtidas sobre dados macros e algumas simplificações, mas pode ser considerada uma estimativa inicial dos impactos observados nesta região.

Tabela 3.4 Vazões dos períodos anteriores e posteriores a 1970 nas sub-bacias do rio Paraná (Muller et, 1998).

Bacia	$P_2 - P_1$ mm	$Q_2 - Q_1$ Mm	Q_1/P_1	Q_2/P_2	Q_2/Q_1
Grande	228	90	0,33	0,34	1,18
Tietê	193	101	0,24	0,28	1,34
Paranapanema ¹	183	153	0,25	0,32	1,45
Incremental ¹	127	199	0,29	0,39	1,44

¹ 1931-1994; incremental se refere a bacia contribuinte do rio Paraná a seção da barragem de Itaipu; P_1 é a precipitação até 1970, com séries que variaram de 30 a 40 até 70; P_2 precipitações de 1970 até 1990 ou 1994; Q_1 vazão correspondente ao período anterior a 1970 e Q_2 vazões correspondentes ao período posterior a 1970.

Os citados autores analisaram também a variabilidade da vazão mínima de alguns postos da região e observaram em quase todos os postos aumento da vazão na estiagem. Na tabela 3.5 são reproduzidas a relação das vazões mínimas dos dois períodos para a duração de 30 dias. Na figura 3.20 são apresentados os valores de aumento relacionados com a área, onde se observa que existem dois grupos de bacias com comportamento diferenciado em função da características de precipitação, tipo e uso do solo.

Com os elementos apresentados nesse documento pode-se observar que existem incertezas quanto ao conhecimento científico e sobre as principais questões que envolvem a variabilidade da disponibilidade hídrica. Neste sentido é recomendável o seguinte: (a) estudos complementares que permitam esclarecer a curto prazo algumas das questões acima; (b) pesquisas específicas sobre a área em estudo.

Análise do uso do solo e da variabilidade climática: Este estudo busca identificar indícios de alteração das vazões nas sub-bacias com dados existentes na bacia incremental. Para tanto é necessário selecionar os postos que possuam séries confiáveis antes e depois de 1970. Identificadas essas bacias deve-se procurar obter: (a) a evolução do uso do solo nas sub-bacias, e suas principais características; (b) analisar os componentes hidrológicos da bacia, ou seja o balanço hídrico com os dados existentes, as características das vazões em estiagem, vazões médias e vazões máximas; (c) buscar estabelecer elementos quantitativos que relacionem os impactos no escoamento, uso do solo e alteração na precipitação; (d) Extrapolar os resultados obtidos para a bacia incremental, estabelecendo a série de vazões para a mesma; (e) ajuste de um modelo de macro-bacias que considere o uso do solo e; (f) estabelecer séries para os dois períodos.

Tabela 3.5 Variação percentual de aumento da vazão mínima de 30 dias em sub-bacias do rio Paraná (dados obtidos de Mueller et al. 1998)

Posto	Aumento percentual	Área da bacia km ²
Cinzas	53	2015
Cinzas	71	5622
Laranjinha	63	3445
Capivari	32	722
Tibagi	33	8948
Tibagi	71	21955
Dos Patos	18	1806
Ivai	12	3572

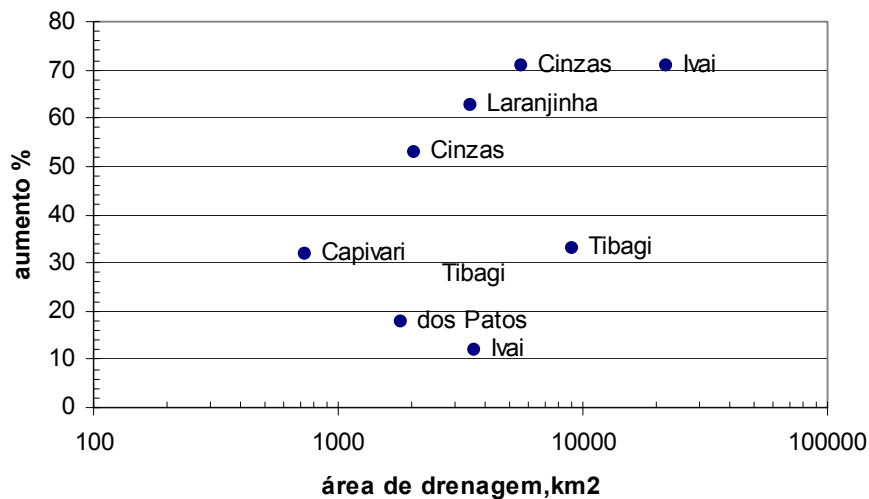


Figura 3.20 Aumentos percentuais de vazão mínima de 30 dias para sub-bacias do rio Paraná

Avaliação dos dados experimentais: O IAPAR possui dados de pequenas áreas experimentais no estado do Paraná. Os dados disponíveis podem ser examinados quanto ao balanço hídrico. Esses dados foram coletados visando estudos sedimentológicos, no entanto possuem informações hidrológicas importantes. Sendo assim, a recomendação aqui é a seguinte: (a) identificar a disponibilidade dos dados experimentais existentes; (b) análise hidrológica e uso do solo dos experimentos realizados quanto ao seguinte: balanço hídrico médio e em estiagem para os diferentes tipos de cobertura experimentados; (c) verificar a representatividade desses resultados nas alterações do uso do solo no período após 1970; (d) identificar a representatividade das áreas realizadas com relação a bacia incremental.

Análise Estatística : A análise estatística envolve o seguinte: (a) Análise de tendência das precipitações; (b) Análise de tendência das vazões, ou seja verificar estatisticamente se existe significância nas mudanças de tendências; (c) Análise de estatística entre as potenciais causas e as alterações nas vazões. Parte deste estudo foi realizado por Mueller et al (1998)

Desenvolvimento de Pesquisas : Os principais impactos que o desmatamento e as práticas agrícolas da bacia hidrográfica tem sobre o comportamento do reservatório são os seguintes:

- o aumento do escoamento potencial devido ao desmatamento tem um resultado econômico muito importante sobre os usos dos recursos hídricos;
- as práticas de uso do solo influenciam a vida útil do reservatório, pela produção de sedimentos. Esse é um processo de longo prazo, mas que deveria ser monitorado e conhecido para permitir um planejamento de médio e longo prazo.

Para buscar avaliar melhor esses impactos e permitir o melhor planejamento futuro, pode ser implementado o monitoramento de bacias hidrográficas, através do seguinte: (a) monitoramento de uma seqüência de bacias de diferentes tamanhos (uma dentro da outra) na bacia preservada dentro do Parque do Iguaçu. Essas bacias seriam a base de comparação; (b) em área próxima ao Parque do Iguaçu, mas desmatada, com uso de solo com práticas agrícolas representativas da região, deve-se buscar uma outra seqüência de sub-bacias (também uma dentro da outra). Essa bacia avaliaria o comportamento comparativo entre os usos do solo em diferentes escalas de tamanho de bacia.

Esse estudo é de longa duração, com estudos intermediários a medida que os dados forem coletados. Essa atividade pode ser desenvolvida nas seguintes etapas: (a) Na primeira é realizada um planejamento detalhado do experimento com a escolha e definição das bacias e das características das coletas, banco de dados, práticas operativas e o custo do programa; (b) Segunda etapa envolve a implementação das bacias e monitoramento dos dados; (c) Desenvolvimento de estudos sobre a produção de sedimentos e de escoamento nas bacias.

As dificuldades técnico-econômicas para a implantação de um programa dessa natureza são: (a) medição da precipitação na área florestada; (b) coletas de sedimentos em suspensão e arraste ao longo do tempo; (c) custo de implantação e operação.

3.3.2 Rio Paraguai

A bacia do rio Paraguai mostrou ao longo do século vinte, significativa variabilidade hidrológica. Na figura 3.21 são apresentados os níveis máximos anuais em Ladário para o todo o período de registro. Pode-se observar que entre 1900 e 1960 os níveis máximos ficaram, em média da ordem de 4,00 m, enquanto que entre 1960 e 1972 da ordem de 2,00 m. Já entre 1973 e 1995 variou em cerca de 5,0 m. Na figura 3.22 são apresentadas as curvas de permanências destes períodos mostrando as diferenças de níveis também para o restante da série.

Considerando que os leitos são móveis e a erosão e sedimentação são significativas as primeiras questões que foram investigadas são as seguintes: (a) a mudança do leito pode explicar as variações nível observadas na década de 60? ; (b) a escala de Ladário poderia ter mudado de posição ou local durante o período? (c) estas variações podem ser explicadas pela variação do uso do solo a montante? (d) estas variações podem ser explicada pela variabilidade climática ou modificação climática?

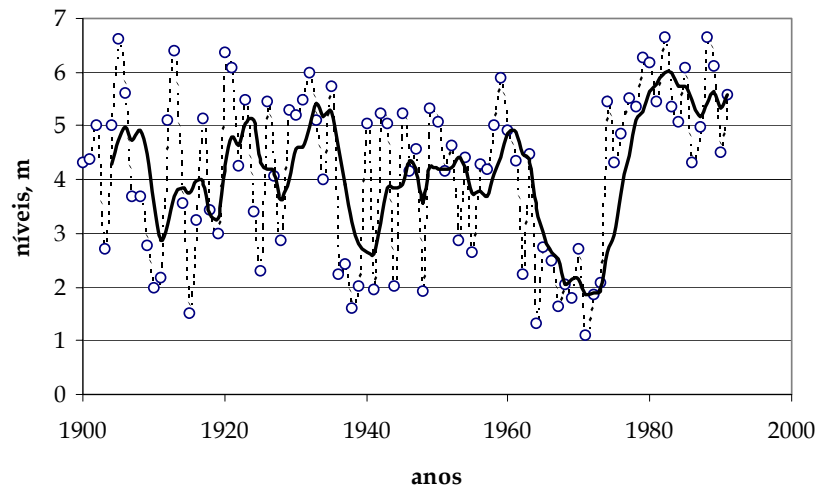


Figura 3.21 níveis máximos em Ladário e média móvel de 5 anos.

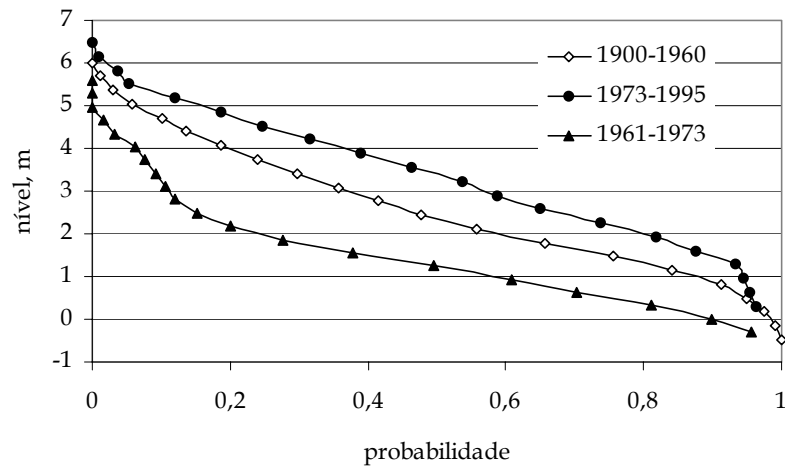


Figura 3.22 curva de permanência dos três períodos: 1900- 1960; 1961-1972 e 1973 - 1995.

Para analisar a primeira questão utilizou-se os dados fluviométricos com dados da década de 60 de outros postos, além Ladário, para verificar se apresentavam a variabilidade relativa entre a década de 60 e o período subsequente, já que não existiam dados anteriores. Na figura 3.23 são apresentados os dados de vazão adimensionalizados com relação a sua média para alguns postos da região. Na figura 3.24 são apresentadas as vazões em Coxim no rio Taquari entre 1969 e 1984, mostrando o mesmo comportamento. A variabilidade dos níveis e vazões dos postos é semelhante a observada em Ladário, uma eventual mudança de leito não poderia explicar toda esta flutuação.

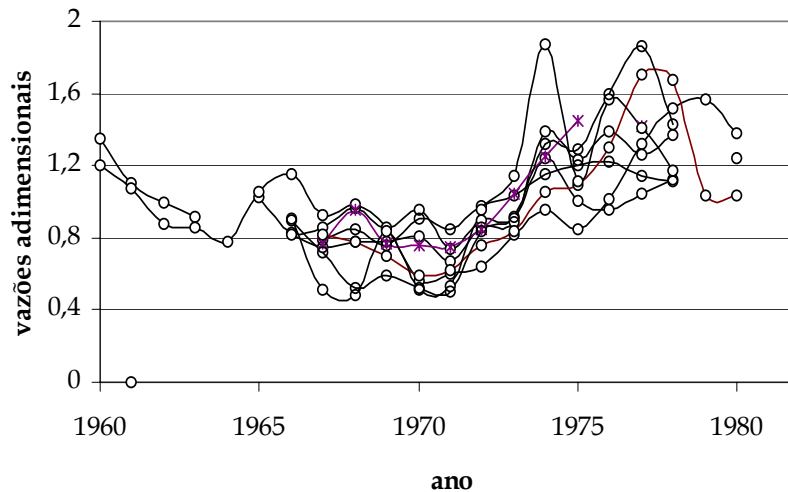


Figura 3.23 Vazões adimensionais de alguns postos do Alto Paraguai com séries a partir de 1960.

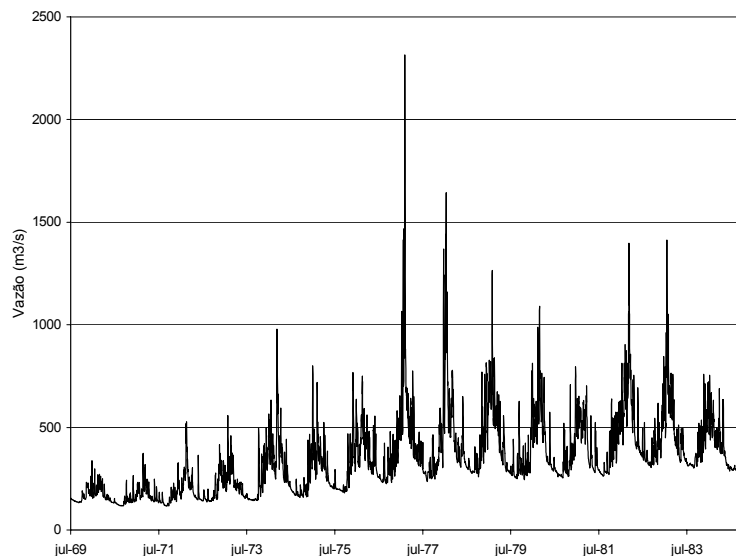


Figura 3.24 Vazões em Coxim no rio Taquari entre 1969 e 1984 (Collishonn, 2001)

Na década de 70 ocorreram dois fatores importantes, o primeiro foi uma maior migração da população para o Planalto e a introdução do plantio de culturas anuais (como o soja) e aumento do rebanho de gado, principalmente no Planalto do rio Taquari. As culturas anuais produzem dois efeitos fundamentais no ciclo hidrológico: aumento do escoamento médio pelo desmatamento e contínua alteração no solo e produção de sedimentos. O solo do Planalto é muito frágil e a expansão do gado e soja geraram aumento significativo na produção de sedimentos. No entanto, a área ocupada pela soja é insignificante se compara com a área de gado (figura 3.25). Além disso, o solo onde o gado ocupa é pouco produtivo e frágil. Esta fragilidade facilita a erosão principalmente nos caminhos formado pela deslocamento dos rebanhos.

O segundo fator importante foi o aumento da precipitação que levou ao aumento da capacidade erosiva e da vazão média de enchente. Os resultados mostraram que no período da década de 60 as precipitações estiveram abaixo da média de longo período, da ordem de 15% (na média do período), durante todos os anos.

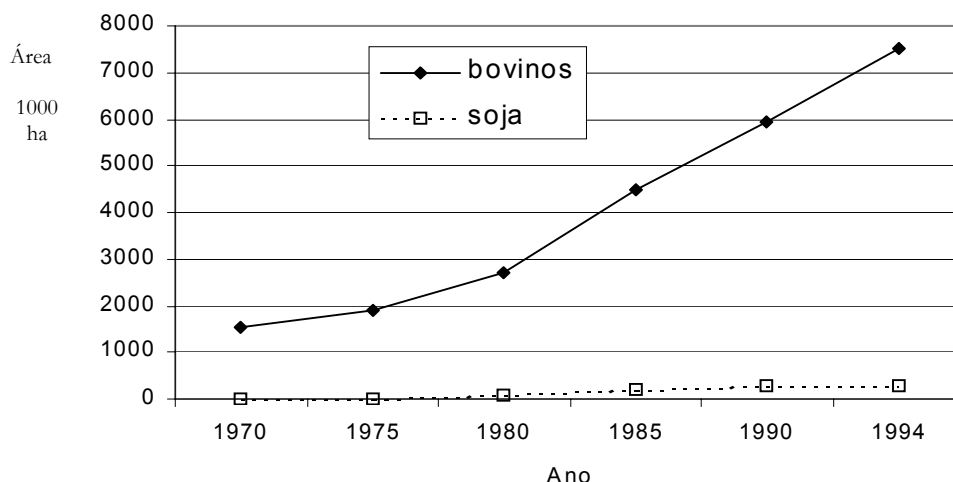


Figura 3.25 Área ocupada em (ha) (Collishonn,2001)

Collishonn (2001) analisou o efeito do uso do solo e da variabilidade da precipitação através de um modelo hidrológico. O modelo foi ajustado para o período após 1973 e elaborado o prognóstico para o período anterior a 1973. Na figura 3.26 são apresentados os resultados. Pode-se observar que o modelo superestima os resultados para o período antes de 73, indicando que os parâmetros não representam as condições físicas deste período existindo componentes do uso do solo que não foram retratados. Na figura 3.27 são apresentados os resultados do ajuste do modelo para o período anterior a 1973 e verificação para o período posterior. Pode-se observar que o modelo tende a subestimar o período verificado, mostrando o mesmo efeito anterior. Estes resultados mostram que houve efeito do uso do solo além da variabilidade da precipitação. O citado autor estimou preliminarmente que da alteração total de 200 mm para 500 mm, entre os dois períodos, o uso do solo corresponderia a valores entre 74 e 100 mm, sendo da ordem de um terço do total de alteração da variação do escoamento. Resultados semelhantes ao obtidos na bacia do rio Paraná.

O comportamento não-estacionário das séries hidrológicas no rio Paraguai a jusante em Porto Pilcomayo próximo a Assunção mostra tendência semelhante as observadas a montante (figura 3.28). Observa-se uma tendência crescente das vazões adimensionais (média móvel de 10 anos) após 1973, como o trecho superior do rio Paraguai. Como se observa nesta série longa de jusante o comportamento de montante e jusante na bacia são semelhantes, já que este posto engloba as vazões do Pantanal o grande regulador de vazão do rio Paraguai.

3.3.3Rio Uruguai

Variabilidade

O rio Uruguai apresentou alteração do cobertura do solo ao longo da segunda metade do século vinte. Analisando as séries de vazões do posto Passo Caxambu (52.000 km²) no Alto Uruguai dentro do trecho brasileiro da bacia (figura 3.29) observa-se uma tendência crescente da vazão (média móvel de três anos). Nesta série pode-se observar que entre 1942 e 1952 as vazões são baixas e o período posterior mostra uma tendência crescente.

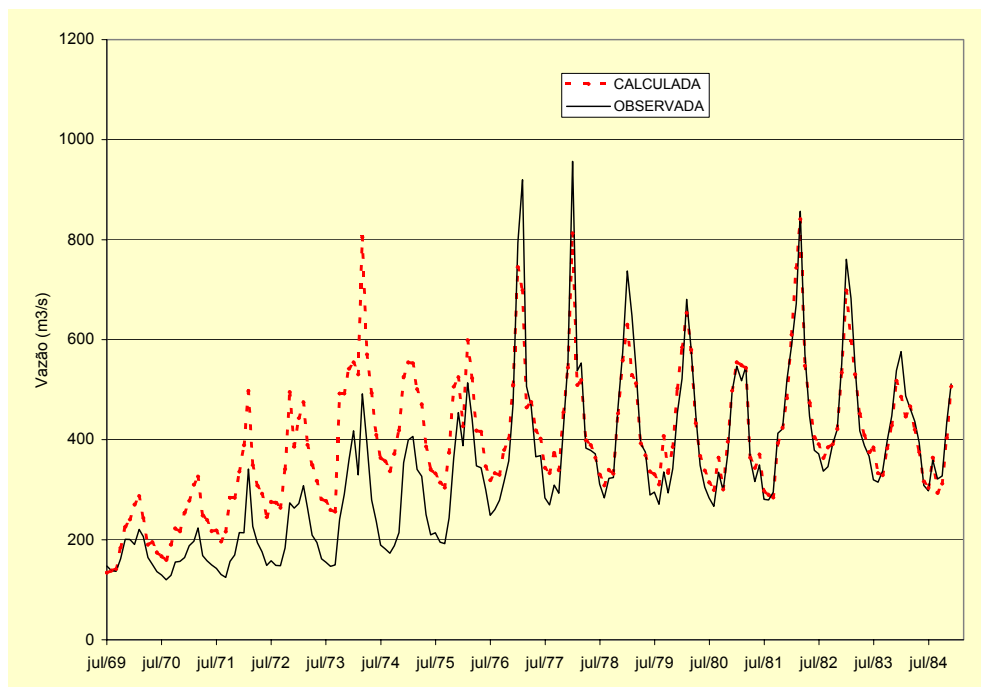


Figura 3.26 Ajuste do modelo com dados depois de 1973 e verificação par o período anterior (Collischonn, 2001)

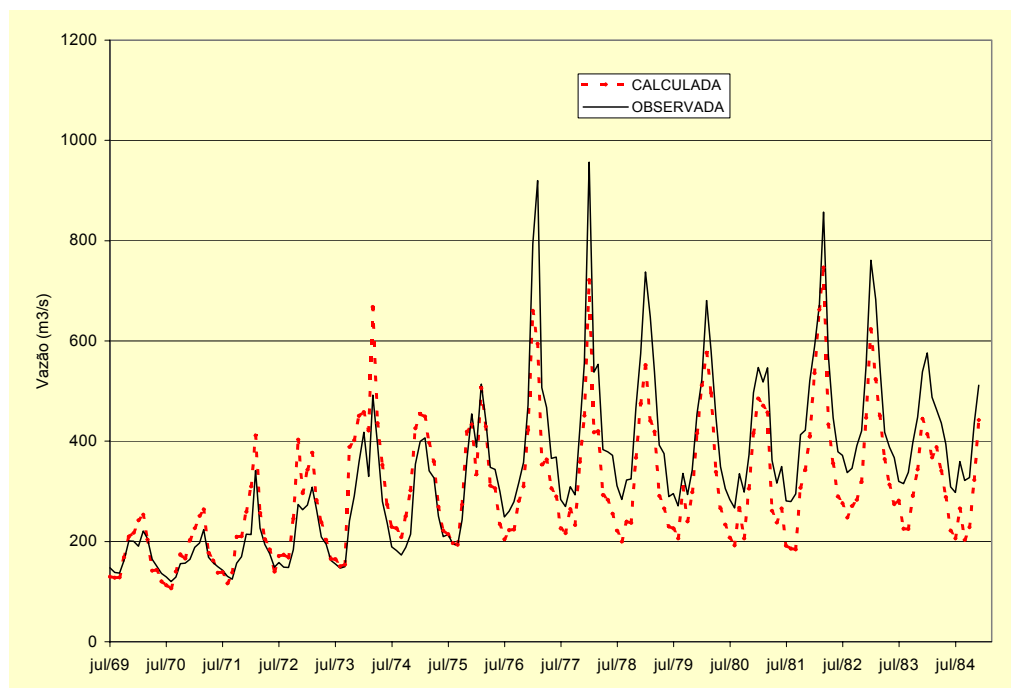


Figura 3.27 Ajuste do modelo ao período anterior a 1973 e verificação para o período posterior (Collischonn, 2001).

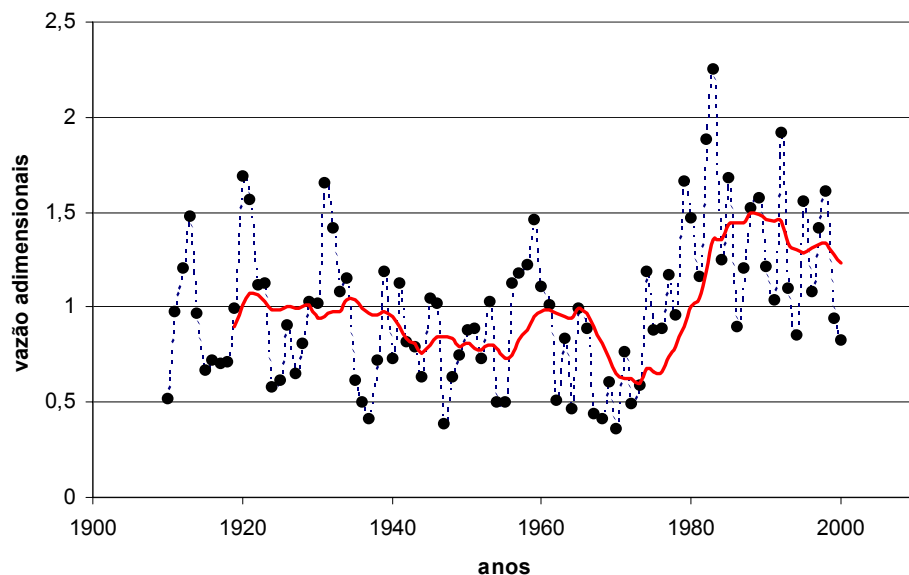


Figura 3.28 Variabilidade das vazões em Pilcomayo no rio Paraguai

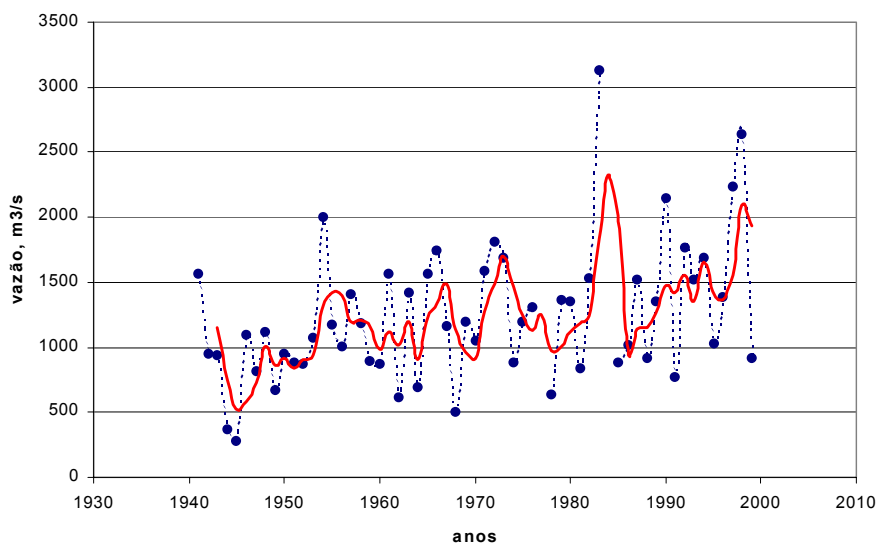


Figura 3.29 Vazões médias anuais e da média móvel de três anos em Passo Caxambu no rio Uruguai

Quando se analisa esta mesma série adimensional (anomalias) com a do posto de Paso de Los Libres ($\sim 200.000 \text{ km}^2$) no trecho inferior do rio Uruguai (figura 3.30) verifica-se que a tendência é devido em parte a amostragem dos dados, apesar do período mais recente se mostrar mais úmido. Além disso, verifica-se que os dois postos, apesar de representarem bacias de dimensão muito diferentes mostram variabilidade adimensional das vazões médias anuais semelhantes e as médias móveis seguem muito próximas. Na figura 3.31 observa-se que o período após 1970 se mantém acima de todo o período anterior, flutuando num outro patamar de vazão média.

A importância destes períodos pode ser observada com os dados de anomalias de precipitação em Passo Fundo no Alto Uruguai (figura 3.32). Observa-se que a variabilidade

de precipitação é marcante na década de 40 (42-52), mas não mostra a tendência de crescimento de longo período das vazões, depois de 1970. Esta década ficou marcada pelo aumento significativo do plantio anual de soja em grande parte do Sul e Sudeste do Brasil.

Utilizando as séries de vazões com dados à partir de 40 para o dimensionamento de um reservatório na parte superior da bacia obtém-se um volume útil 100% maior que o obtido com as séries iniciando em 1953 (Tucci, 1991).

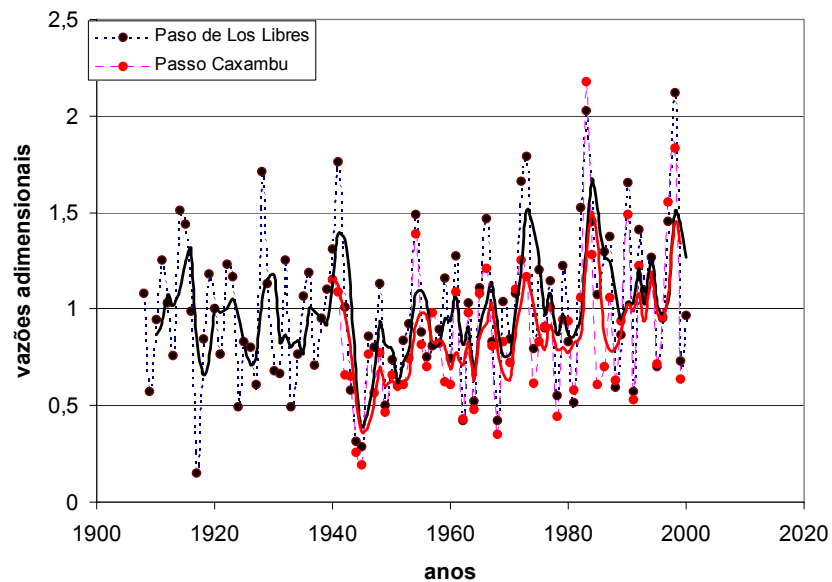


Figura 3.30 Vazões adimensionais nos postos Passo Caxambu ($\sim 52.000 \text{ km}^2$) e Paso de Los Libres ($\sim 200.000 \text{ km}^2$) no rio Uruguai

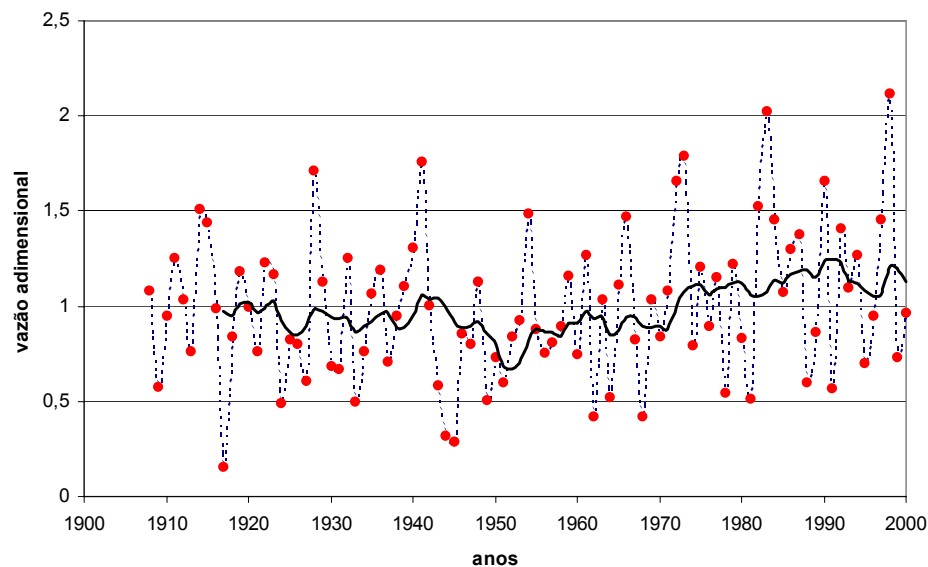


Figura 3.31 Média móvel de 10 anos das vazões no rio Uruguai em Paso de Los Libres.

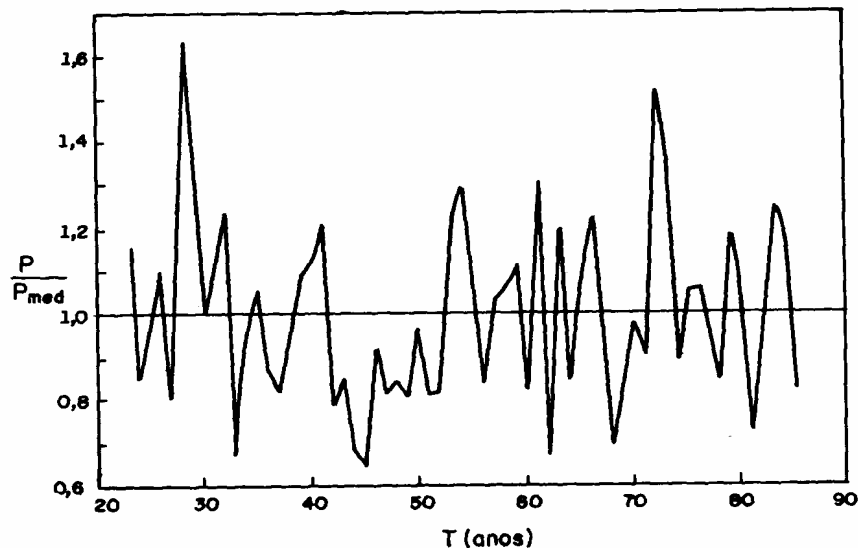


Figura 3.32. Precipitações anuais adimensionais em Passo Fundo no Alto Uruguai

Uso do Solo

Quanto ao uso do solo, a bacia do rio Uruguai apresentou significativas alterações no uso do solo depois dos anos 50 e mais recentemente depois dos anos 70 com o aumento das culturas de soja. Depois de 1994 houveram grandes alterações na prática agrícola, quando os agricultores passaram de plantio convencional para plantio direto. Este último tende a diminuir o escoamento superficial em detrimento do escoamento sub-superficial na cabeceira dos rios. Neste cenário se observar uma redução da erosão (quando os locais em que o sub-superficial é protegido), redução do escoamento superficial nas pequenas bacias, mas nas maiores pode existir a tendência de aumento da vazão em função do lençol freático se manter em níveis maiores (veja resultados no capítulo 1).

Collishonn (2001) apresentou resultados da avaliação do uso do solo para a bacia do rio Taquari, afluente do rio Jacuí no Rio Grande do Sul que é vizinha a cabeceira do rio Uruguai. O referido autor utilizou os parâmetros do modelo ajustado para a bacia do rio Taquari para estimar os resultados no rio Uruguai com resultados muito bons, indicando que as duas bacias apresentam características semelhantes. Na tabela 3.5 são apresentados os resultados de simulação de alteração do uso do solo. O cenário atual apresenta aumento de escoamento de 9% de escoamento. Transformando a bacia de floresta para culturas anuais o aumento do escoamento é de 14,4 %, para pasto é de 13,2 %. Portanto, o impacto atual do uso do solo já representa 69% do impacto máximo (pior cenário).

Este aumento de escoamento, apesar da conservação do solo também introduz outros efeitos de variabilidade ao longo do ano como o aumento da erosão e a poluição difusa apesar do controle das práticas agrícolas.

Tabela 3.5: Vazão média, lâmina escoada e aumento do escoamento em relação a situação hipotética 100 F (a coluna ΔQ indica a diferença de escoamento anual em relação a situação hipotética 100 F, em que a bacia está 100% coberta por florestas) (Collishonn,2001)

Situação simulada	Q $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$	Q mm.an^{-1}	ΔQ mm.an^{-1}
ATUAL	653	765	62
100 F	600	703	0
90 F 10 P	607	712	9
90 F 10 L	608	713	10
100 P	679	796	93
100 L	686	804	101

L – culturas anuais P – pasto - F florestas

3.3.4 Análise Comparativa

Utilizando as séries mais longas dos rios Paraguai, Uruguai e Paraná no seu trecho inferior e obtendo a média móvel de 10 anos obtém-se os resultados da figura 3.33. Pode-se observar que tanto o rio Paraná como Uruguai apresentam tendências semelhantes, mas o Uruguai apresenta maior variabilidade de curto prazo, características de uma bacia menor com menor sazonalidade e menor regularização. A bacia do rio Paraguai mostrou grande variabilidade entre a década de 60 e o período posterior, passando de um estado muito seco para um estado muito úmido.

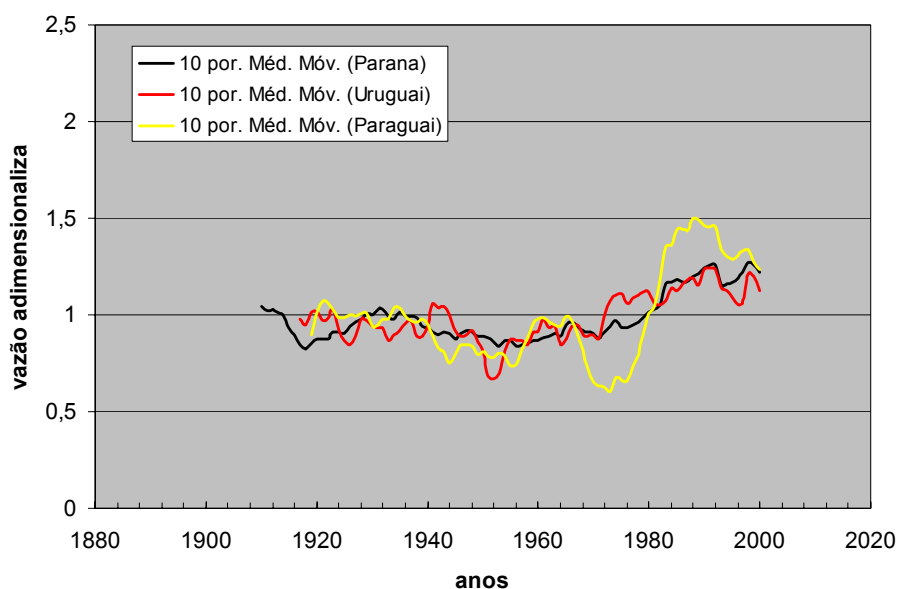


Figura 3.33 Média móvel de dez anos das vazões no rio Paraguai em Pilcomayo, Uruguai em Paso de Los Libres e Paraná em Posadas.

As três séries mostram tendência semelhante quanto aos períodos úmidos e secos. Observe que as três curvas seguem uma tendência decrescente ao longo da primeira parte do século até cerca de 1970, quando todas três curvas começam aumentar e depois dos anos 80 ficam acima da média do período anterior. Como o gráfico trata da média móvel de 10 anos existe uma inércia na tendência dos valores. Na figura 3.34 são apresentados os valores com média móvel de 5 anos onde se observa a mesma tendência, mas com maiores flutuações.

Na figura 3.35 a relação de tendência entre a variação de pressão (padronizadas) entre o Tahiti e Darwin na Austrália, indicador das condições do Oceano Pacífico e as anomalias dos três rios.

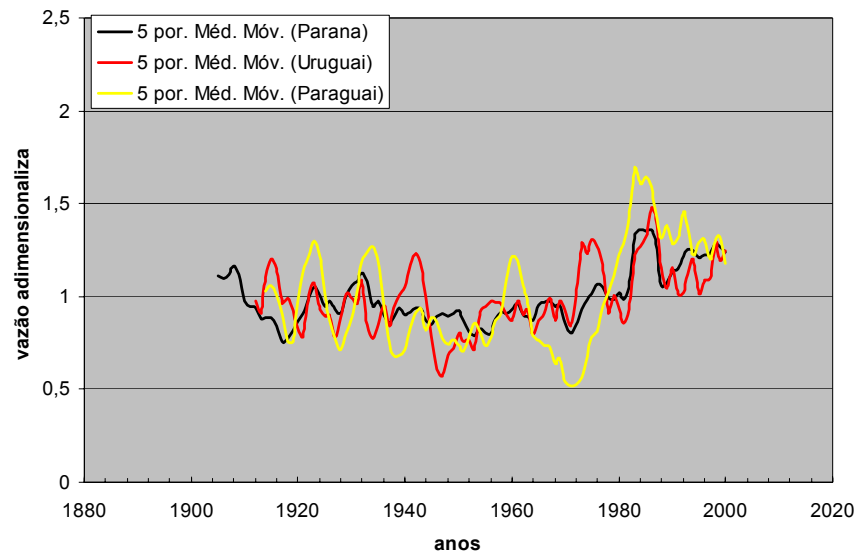


Figura 3.34 Média móvel de cinco anos das vazões no rio Paraguai em Pilcomayo, Uruguai em Paso de Los Libres e Paraná em Posadas.

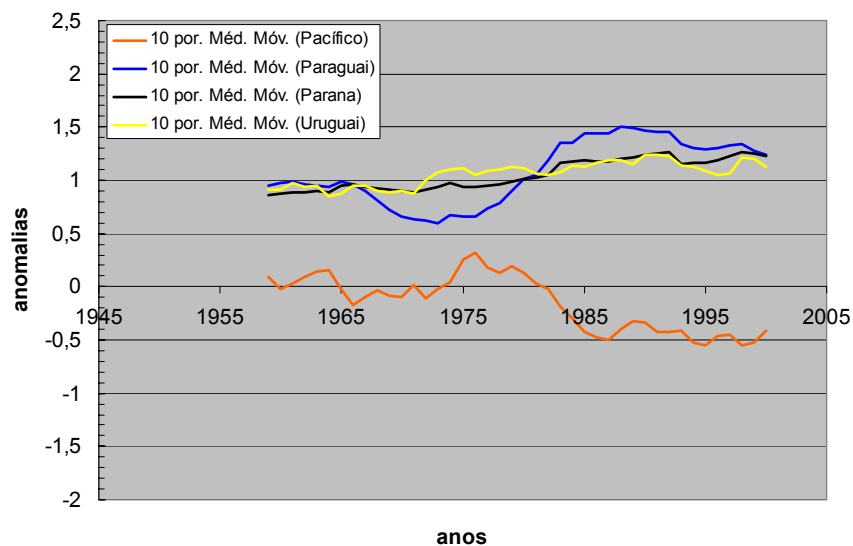


Figura 3.35 Comparação das anomalias de vazão com diferença de pressão do Tahiti e Austrália no Oceano Pacífico.

Observe a figura 3.36 onde se destacou a anomalia de pressão do Pacífico. Nesta figura os valores são negativos (temperaturas mais altas) ou com tendência decrescente desde parte da década de 70, oscilando nesta faixa até 2001. Este período coincide aproximadamente com o período de vazões acima da média das vazões observadas no rio Paraguai, Uruguai e Paraná. No período anterior existe também tendências inversas. O período de valores negativos indicam de tendência de temperatura do mar mais alta do que quando estão positivos. Neste cenário maior evaporação do mar e maior umidade na atmosfera, potencializando maior quantidade de precipitação.

A média móvel de cinco anos na figura 3.36 mostra que nos últimos anos esta tendência poderia estar diminuindo, sendo que em 1999 e 2000 o valores foram positivos e 2001 levemente positivo com tendência decrescente. Na figura 3.36 a média de cinco anos mostra uma tendência crescente até 2000 e pequena redução em 2001. A observação desta anomalia pode ser um indicador importante da tendência do escoamento nas bacias da região, visando antecipar ocorrência de períodos secos e úmidos.

Na figura 3.37 pode-se observar a relação entre as médias móveis de 10 anos do rio Paraná e das diferenças de pressão no Pacífico. O coeficiente de regressão para a tendência retilínea é de 0,71 ($R^2 = 0,51$). Pode-se observar que o grupo de pontos inferior, que retrata os últimos anos apresenta menor desvio. O uso de médias móveis permite analisar como se comportam as tendência de um período mais longo, já que o processo de interação clima, atmosfera pode possuir inércia. No entanto, deve-se considerar que médias carregam consigo valores correlacionáveis.

Estas relações podem ser utilizadas para previsão de longo prazo das tendências de aumento e diminuição da umidade nas bacias brasileiras do rio da Prata. Collishonn et al (2001) mostraram a complementaridade das séries de vazões entre a África e a América do Sul. Enquanto na África., desde de 1970 os períodos são muito secos, parte da América do Sul (bacia do Prata) passa por período úmido acima da média. Condições como estas levam a pergunta óbvia: será um comportamento da variabilidade natural ou impacto climático? Uma pergunta simples para um problema complexo que exige ainda muita avaliação detalhada e entendimento do que está ocorrendo.

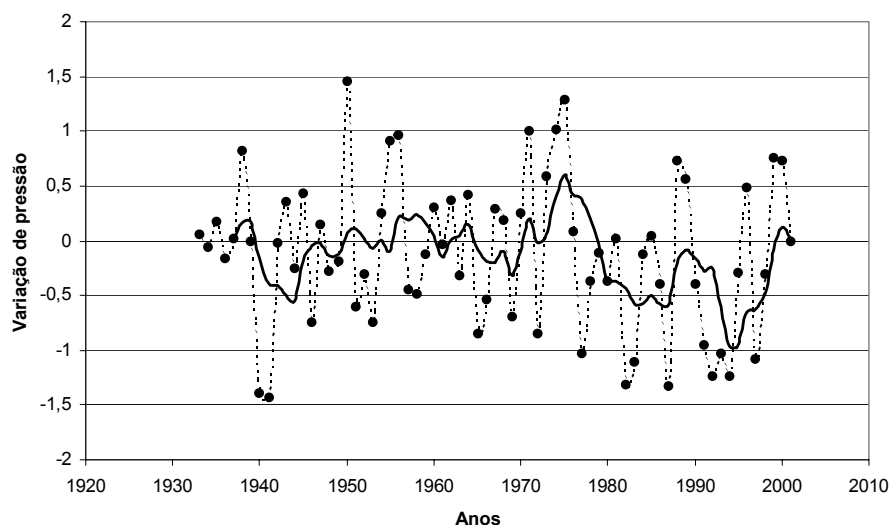


Figura 3.36 Anomalias da diferença de pressão entre Tahiti e Darwin no Oceano Pacífico e sua média móvel de 5 anos

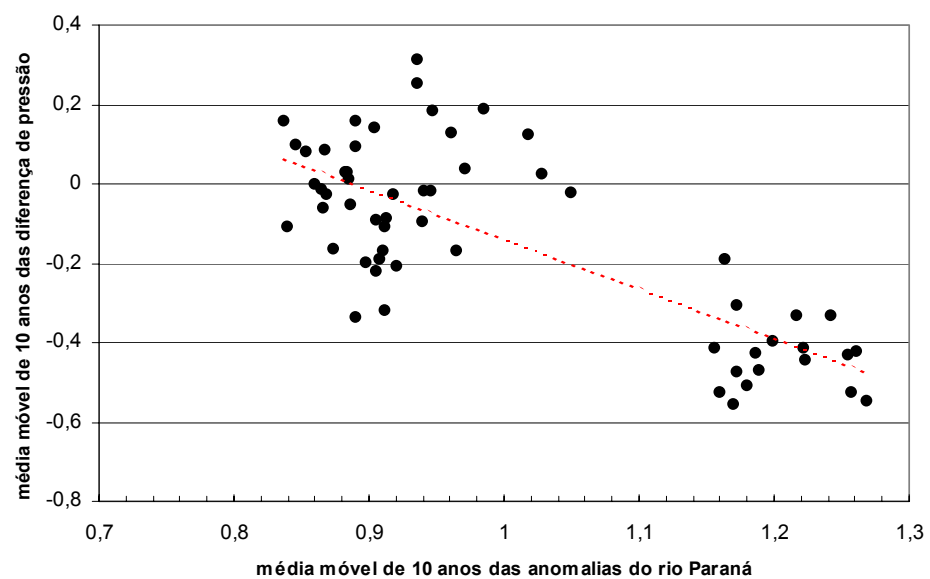


Figura 3.37 Média móvel de 10 anos das Anomalias do rio Paraná e diferença de pressão no Pacífico

4. PREVISÃO DE VAZÃO

A *previsão* de vazão num sistema hídrico envolve a estimativa num determinado período de tempo desta variável. A *predição* é a estimativa da vazão sem relação com um período de tempo definido, como a vazão com um determinado nível de probabilidade de ocorrência num determinado local.

A previsão tem sido classificada em *curto prazo* ou tempo real ou previsão de *longo prazo*. A *previsão de curto* ou previsão em tempo real (tradução mais fiel seria previsão em tempo atual) é realizada para antecedências de horas e dias em função do tempo de resposta das bacias hidrográficas e do conhecimento antecipado da precipitação, sua distribuição temporal e espacial. Este tipo de previsão é utilizada para o alerta das inundações ribeirinhas e da população, operação de obras hidráulicas como barragens, sistemas de comportas, entre outros.

Para caracterizar a previsão de longo prazo pode-se distinguir a antecedência de semanas, meses ou anos baseada em informações indiretas ou estatísticas locais (geralmente denominadas de predição). Recentemente, em função da ampliação da capacidade dos modelos climáticos pode-se distinguir a previsão de alguns meses com o uso interrelacionado de modelos climáticos e hidrológicos e a previsão de alguns anos que são mais uma predição do que uma previsão. A literatura internacional define longo prazo como a previsão de 9 meses.

Este tipo de previsão é utilizada para o planejamento energético e formação de preço, para previsão de umidade do solo, condições básicas de navegação, inundações e secas em regiões críticas. Este tipo de previsão vem revolucionar a gestão dinâmica dos recursos hídricos.

A previsão com antecipação de vários anos, como a que vem sendo realizado sobre o impacto da modificação climática (veja capítulo 3), tem a finalidade de analisar potenciais efeitos de variabilidade climática e modificação climática e seus efeitos sobre a sociedade. A análise de tendência de longo prazo são essenciais para preparar a sociedade para potenciais efeitos dos condicionantes climáticos. A história é pródiga em exemplos mostrando como as sociedades foram afetadas por períodos longos de secas ou inundações sobre a sua sustentabilidade e características (Diamond, 1997). No capítulo seguinte são discutidos estes aspectos.

No capítulo anterior foram destacadas tendências que mostram a variabilidade da diferença de pressão do Pacífico com as vazões de três grandes rios da Bacia do Prata. A análise deste tipo de tendência é importante para buscar responder questões relacionados com as tendências de longo prazo.

4.1 Previsão de Curto Prazo

4.1.1 Conceitos

A previsão de vazão de curto prazo ou tempo atual é entendida aqui como a *previsão com uma antecedência estipulada de algumas horas e dias a partir de informações hidrológicas e/ou climáticas conhecidas ocorrência da vazão*.

Esta previsão pode ser **contínua** ou **eventual**. Quando a previsão é realizada ao longo do tempo, independentemente das condições hidrológicas a mesma é dita contínua. Por exemplo, a operação de uma usina hidrelétrica requer a previsão do volume afluente para regular o nível do reservatório para maximizar a produção de energia.

A previsão **eventual** é denominada neste texto como a previsão realizada em épocas definidas do regime hidrológico, enchentes ou estiagens em que as condições são críticas para o usuário da água. A previsão e o alerta de enchentes de um determinado local somente é realizado quando os níveis do rio atingem valores próximos dos críticos. A previsão de níveis para navegação somente é realizada nos períodos de estiagem, quando existem riscos do rio não ter calado suficiente para a navegação. A previsão eventual pode ser realizada para períodos de estiagem ou de enchentes, dependendo do objetivo.

A previsão de vazões geralmente é realizada para eventos chuvosos, onde as dificuldades de antecedência são maiores. Num período de estiagem, toda a água disponível já se encontra dentro da bacia e a previsão depende de metodologia determinista, que envolve principalmente o escoamento subterrâneo na bacia e a propagação do escoamento existente nos rios.

A previsão de cheia em tempo atual, pode ser classificada de acordo com a antecedência desejada e as características da bacia que drena para o local de interesse. Uma pequena bacia possui um tempo de ocorrência muito pequeno entre a precipitação e seu efeito na seção principal. Numa bacia grande este tempo é muito maior. Normalmente, deseja-se a maior antecedência possível na ocorrência de uma enchente, no entanto com algumas horas de antecedência já é possível atuar sobre seus efeitos, minimizando os danos. Uma bacia com tempo de concentração pequeno (bacia pequena) tem como opção, somente a previsão com base numa precipitação ocorrida. Uma bacia grande pode utilizar a observação do nível a montante, para efetuar esta previsão, pois a antecedência pode ser suficiente para as medidas mencionadas. A maior vantagem de se utilizar um posto a montante, é que os erros de previsão são muito menores que aqueles da previsão de um modelo chuva-vazão. No entanto, esta situação somente pode ser utilizada, quando o tempo de deslocamento atende os objetivos da previsão e a contribuição lateral entre os postos não é mais importante que o volume da bacia do posto de montante.

A classificação dos procedimentos e modelos que podem ser utilizados é a seguinte:

- *Previsão meteorológica da precipitação, integrada a um modelo precipitação-vazão*, para estimar a vazão ou o nível. Nesta situação obtém-se a maior antecedência possível a partir do início dos eventos, mas os erros potenciais são maiores, já que são agregados os erros da previsão da precipitação e do processo de transformação da mesma em vazão;
- *Estimativa da precipitação com base em radar e rede telemétrica de pluviógrafos integrada a um modelo precipitação-vazão*. Esta alternativa é uma das mais promissoras dentro do âmbito de pequenas e médias bacias hidrográficas, devido a pequena antecedência dos eventos chuvosos. Deve-se considerar que um radar não dispensa a rede telemétrica terrestre;
- *Estimativa da precipitação com base em rede telemétrica e transformação em vazão através de modelo hidrológico*. Esta alternativa é inferior a anterior, mas na maioria das bacias não existe radar e a rede telemétrica bem distribuída pode permitir bons resultados. A dificuldade normalmente reside na estimativa da precipitação futura, que deve ser inserida dentro do modelo hidrológico. As alternativas são o uso de previsões meteorológicas e/ou modelos estatísticos para previsão da precipitação.
- *Previsão da vazão com base em níveis ou vazões do rio a montante e dos seus afluentes*. Esta situação é possível, quando existe antecedência e a contribuição lateral é pequena;

- *Previsão da vazão com base em níveis ou vazões a montante* e com uma das alternativas a, b ou c para a bacia de contribuição lateral. Esta alternativa contempla a defasagem do deslocamento de montante e a rapidez da contribuição lateral mais próxima a seção principal da bacia.

Estas alternativas são definidas examinando os objetivos da previsão, a disponibilidade de dados na bacia, os recursos para investir na coleta dos dados e o tempo de antecedência para minimizar os impactos das cheias. Na figura 4.1 são apresentadas as previsões da fase hidrológica.

4.1.2 Modelos de previsão

Os modelos utilizados na previsão podem ser organizados de acordo com certas características dos mesmos e das bacias hidrográficas.

Quanto ao sistema simulado: Neste caso, pode-se classificar em: (a) modelos de propagação que simulam somente os rios e utilizam apenas níveis e vazões dentro do rio principal ou afluentes (figura 4.1a); (b) modelos precipitação-vazão que simulam a partir da precipitação (figura 4.1b); (c) modelos precipitação-vazão com propagação em rios, que simulam o rio e as sub-bacias (figura 4.1c).

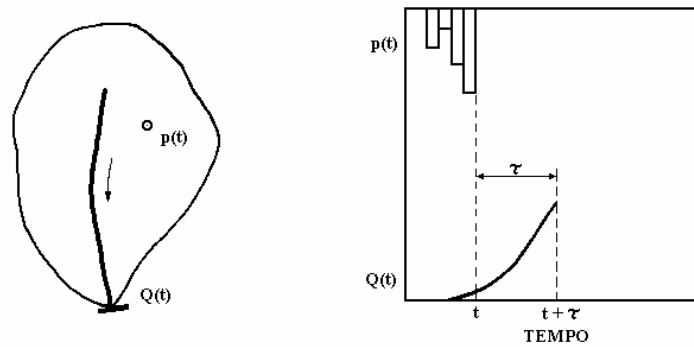
Quanto à utilização: modelos que atualizam os valores dos parâmetros e das variáveis de estado do modelo durante a previsão são ditos adaptativos ou com atualização. No caso contrário mantém os parâmetros fixos.

Quanto ao tipo de modelo: os modelos são em geral classificados em empíricos, conceituais ou combinados. Os conceituais podem ser distribuídos e concentrados. Os modelos empíricos não utilizam conceitos dos processos hidrológicos. A vantagem do modelo empírico é a fácil atualização dos parâmetros em tempo real, enquanto que os modelos conceituais têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas e menor capacidade de atualização. O modelo combinado busca aproveitar as vantagens dos dois tipos de modelos.

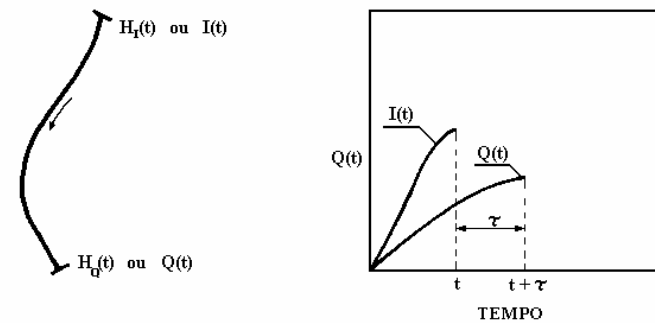
Quanto aos objetivos: A previsão pode ser contínua, envolvendo períodos secos e de estiagem, como a operação de hidrelétricas ou navegação de uma via. A previsão de cheia envolve períodos específicos, onde a rapidez e a precisão são essenciais para dar confiabilidade ao sistema.

Na figura 4.2 são apresentadas as duas fases do uso do modelo. A fase de ajuste *off-line* onde os parâmetros são determinados por ajuste. Na fase *on-line* o modelo é utilizado para previsão e após a obtenção da leitura dos valores e verificado o erro, os parâmetros são atualizados para a nova previsão. Nesta situação o modelo é ajustado em tempo real, denominado aqui de atualização. Na primeira são utilizados dados históricos representativos (enchentes ou períodos contínuos) na qual os parâmetros são ajustados. Na segunda fase, as previsões ocorrem durante a ocorrência dos eventos, na qual os parâmetros podem ser revistos a medida que novos dados chegam.

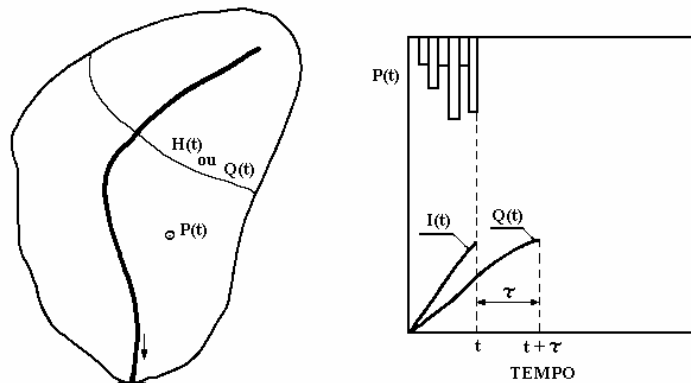
Os procedimentos de atualização podem ser utilizados tanto aos parâmetros dos modelos quanto às variáveis de estado. Estas atualizações são importantes devido as incertezas envolvidas no ajuste dos parâmetros e na estrutura dos modelos. Por exemplo, um modelo linear tende a apresentar bons resultados para as vazões no qual os parâmetros foram ajustados, quando estas vazões ficam longe desta faixa, o modelo tende a subestimar ou superestimar, de acordo com as características do sistema real.



a) Previsão com base na precipitação



b) previsão com base no nível ou vazão



c) previsão com base na precipitação ou vazão

Figura 4.1 Tipos de previsão em tempo real para uma seção de um rio

A atualização também deve ter um sistema de crítica dos dados medidos, já que a chegada de uma nova informação errada, seja de precipitação ou vazão, pode distorcer a estimativa dos parâmetros e comprometer a previsão futura.

Os modelos de atualização podem utilizar técnicas como filtros de Kalman e métodos baseados em ondas neurais. Estas técnicas matemáticas permitem que o modelo aprenda com a informações obtidas ao longo da previsão.

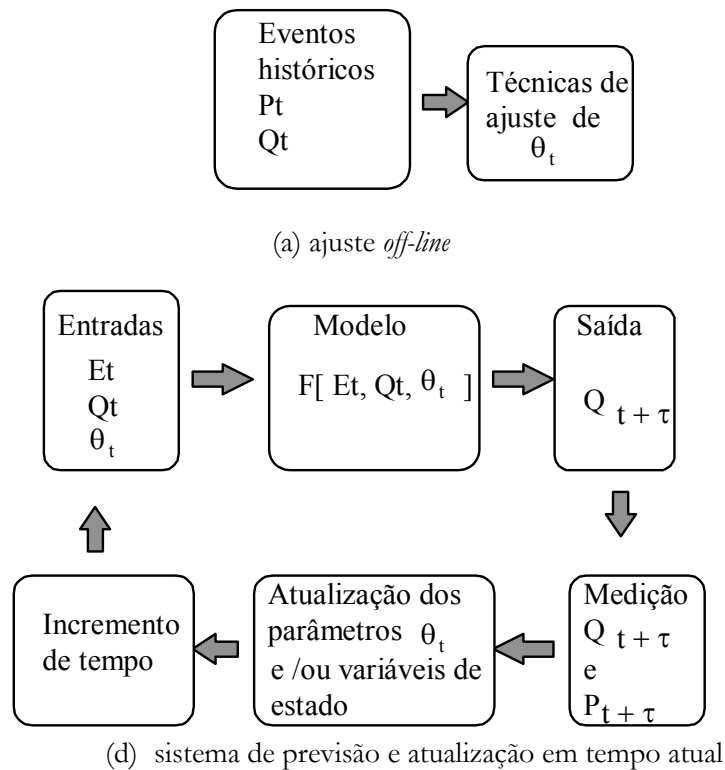


Figura 4.2 Utilização dos modelos

Os modelos podem também ser combinados com modelos de otimização para operação de sistemas hidráulicos como barragens e comportas de sistemas de distribuição de água e/ou controle de sistemas de drenagem.

A previsão de curto prazo também permite o uso conjunto de um reservatório para produção de energia, irrigação e controle de inundação na medida que a previsão auxilia a previsão

4.1.3 O uso da previsão de curto prazo

A previsão em tempo real praticamente não existe no Brasil, com raras exceções existem alguns sistemas funcionando em trechos de rios com previsão de pequena antecedência. Na década de 80 algumas empresas do setor elétrico implementaram sistemas de previsão como no caso da CESP em São Paulo, CEMIG em Minas Gerais e CHESF no São Francisco visando permitir gerenciar o volume de espera dos reservatórios hidrelétricos em face das exigências adotadas para compatibilizar inundações e produção de energia.

A previsão em tempo real é uma das principais medidas não-estruturais para controle de inundações e segurança de obras hidráulicas. No entanto, a prática brasileira tem sido de implementação de redes telemétrica, sem uma utilização desta informação associada a modelos matemáticos hidrológicos e climáticos, Centro de Previsão e Defesa Civil.

Neste documento serão apresentados resultados de alguns usos da previsão em tempo real muito mais para caracterizar alguns aspectos que podem se interrelacionar com os aspectos de previsão de longo prazo.

Previsão com base em leitura de montante

Em rios de grande porte onde a antecedência da previsão é suficiente para gerenciar os riscos decorrentes da inundação, modelos de previsão que representam o escoamento em rios geralmente permitem uma resposta adequada. Neste caso, pode-se utilizar técnicas empíricas com componentes estatísticos ou modelos determinísticos, ou ainda combinação dos mesmos. Geralmente o modelo baseado na anomalia dos valores apresenta resultados adequados, mas depende do tempo de transito entre as seções e o intervalo de tempo dos dados observados. Alguns exemplos são os seguintes:

Rio São Francisco entre Porto Alegre e Manga : O trecho tem uma extensão de 240 km. No início do trecho o São Francisco recebe o rio Urucuia. A bacia hidrográfica em São Romão é de 153.320 km². O rio Urucuia contribui com 25.127 km². A bacia do rio São Francisco em Manga é de 200.364 km². A bacia intermediária é de 21.918 km². A vazão contribuinte é pequena pelas características semi-áridas da sub-bacia contribuinte.

Na figura 4.3 são apresentados os resultados de previsão para antecedência de 1 dia durante 60 dias. Na referida figura pode-se observar o valor esperado e o intervalo de confiança com 95%.

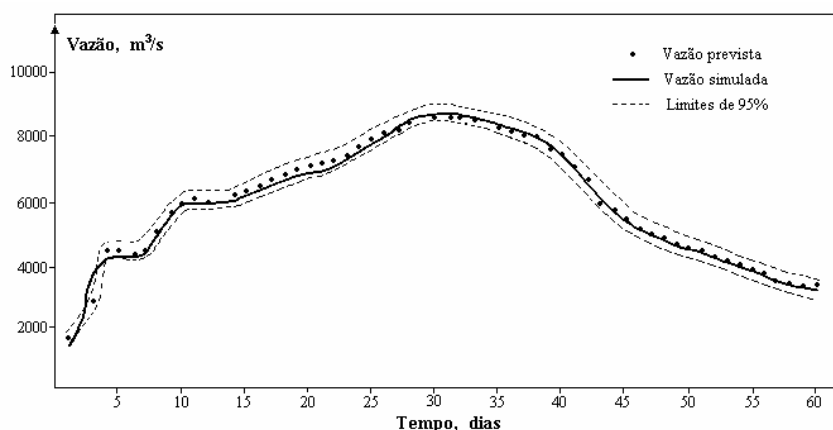


Figura 4.3 Resultados da previsão com 1 dia de antecedência no rio São Francisco em Manga a partir de São Romão.

Rio Paraná entre El Dorado e Corrientes : O trecho em estudo compreende o rio Paraná desde El Dorado e o rio Paraguai desde Pilcomayo, até Corrientes após a junção destes dois rios.

Um modelo de diferenças (variação no intervalo de tempo) foi utilizado para algumas antecedências de previsão. Na tabela 4.1 são apresentados os valores estatísticos da previsão de um período de seis meses em 1983, ano de uma das maiores inundações observadas. O ajuste dos parâmetros foi realizado para dois meses de 1982. Os parâmetros são atualizados em tempo real. Pode-se observar que o erro padrão reduz com a antecedência, chegando a 6 cm para 1 dia. O valor de $R^2 = 0,99$ para esta antecedência é enganoso, pois o valor de R_d é negativo, o que indica que para esta antecedência é melhor prever o valor do dia anterior. O melhor resultado de R_d ocorre para a antecedência de 5 dias.

Tabela 4.1 Estatísticas para diferentes valores de antecedência para os modelos de diferenças - separado no rio Paraná entre El Dorado e Corrientes para a cheia de 1983

T	R ²	R _d	erro padrão m
1	0,99	-0,187	0,056
2	0,97	0,135	0,086
3	0,95	0,284	0,112
4	0,94	0,461	0,124
5	0,94	0,638	0,122
6	0,92	0,620	0,145
7	0,81	0,328	0,216
8	0,57	-0,240	0,326

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_{o,t+1} - Q_{c,t+1})^2}{\sum (Q_{o,t+1} - Q_m)^2}; R_d = \frac{\sum (Q_{o,t+1} - Q_{c,t+1})^2}{\sum (Q_{o,t+1} - Q_{o,t})^2}$$

Previsão com base na precipitação

Na previsão em tempo real com base na precipitação algumas características importantes devem ser consideradas pelos modelos: (a) capacidade de atualização dos parâmetros e das variáveis em tempo atual; (b) capacidade de representar a variabilidade das características da precipitação e da bacia; (c) previsão da precipitação.

A previsão com base na precipitação depende essencialmente muito do conhecimento da precipitação futura, que geralmente não está disponível. Desta forma, o modelo tende a subestimar as vazões a medida que aumenta a antecedência, principalmente quando é superior ao tempo de concentração da bacia. O uso de modelos precipitação-vazão, neste caso, apresenta contribui para intervalos pequenos e deverá contribuir de forma mais significativa na medida que as precipitações possam ser previstas por radar, satélite e/ou rede telemétrica.

Os modelos empíricos utilizados na previsão a partir da precipitação utilizam diferentes formulações que não consideram as características físicas do processo. Estes modelos são utilizados porque permitem bons resultados para bacias pequenas com antecedência pequena e seus parâmetros podem ser atualizados em tempo real com facilidade.

Os modelos conceituais utilizam a estrutura dos modelos precipitação-vazão existentes e executam a previsão em tempo real através de repetidas simulações com dados disponíveis de precipitação. Os modelos conceituais retratam bem a média dos eventos, mas em cada evento em específico apresentam limitações devido a variabilidade dos parâmetros. A atualização destes parâmetros em tempo atual é uma tarefa que envolve bom conhecimento do modelo e a definição de poucos parâmetros. Desta forma, houve a tendência de simplificar os modelos conceituais visando permitir uma fácil atualização dos parâmetros. Os resultados bons ficam limitados a pequenas bacias, já que a medida que se subdivide uma bacia devido as características físicas e de variação de precipitação, o número de parâmetros aumenta.

Existem três métodos para atualização em tempo – real dos parâmetros dos modelos conceituais: (i) adaptação do modelo à forma “estado-espaço” (Kitanidis e Bras, 1978), que

torna a modelagem muito complexa e depende das características do modelo; (ii) o uso de técnicas de otimização em tempo real (Tucci e Clarke, 1980; Bertoni et al 1992), que é uma técnica aplicável quando o número de parâmetros de ajuste é pequeno, o que dificulta o seu uso em bacias com muita subdivisão; (iii) otimização direta de uma função objetiva explícita (Chander e Shanker, 1984) que requer simplificação de algumas funções do modelo.

Previsão de vazões afluentes ao reservatório de Ernestina no rio Jacuí (Brun e Tucci, 2001): A bacia hidrográfica do reservatório Ernestina tem uma bacia de 1.046 km². O reservatório foi construído na década de 50 para produção de energia e entrou em operação em 1957. A capacidade de acumulação é de 258,6 hm³ no nível operacional, sendo 237,5 hm³ de volume útil. A área de inundação é de 40 km² no nível máximo. A simulação foi realizada para intervalo de tempo de 6 horas. O vazão total afluente foi estimada através de balanço hídrico do reservatório e leitura dos níveis no reservatório. A simulação constou de duas etapas: (a) ajuste dos parâmetros do modelo IPH II (Tucci et al, 1981) para os períodos com dados sem simulação em tempo real; (b) previsão em tempo real, quando os parâmetros anteriormente ajustados são fixados e a previsão é realizada com atualização das variáveis de estado.

A previsão de afluências ao reservatório de Ernestina foi realizada para vários anos e dentro de cada ano para as antecedências de 6, 12, 18, 24 e 30 h (1 a 5 intervalos de tempo). Com base nesta seleção do critério de atualização foram realizados estudos de três cenários: (a) com atualização e precipitação futura nula; (b) com atualização; e (c) precipitação conhecida (verdadeira), representando a situação de limite superior para a precipitação.

Na figura 4.4 é apresentada a simulação com antecedência de 12h para as alternativas e na figura 4.5 os resultados das estatísticas para as diferentes antecedências, mostrando a degradação dos resultados a medida que aumenta a antecedência e a precipitação não é conhecida. Neste caso, o importante é a previsão de volume, admitindo-se erros das vazões.

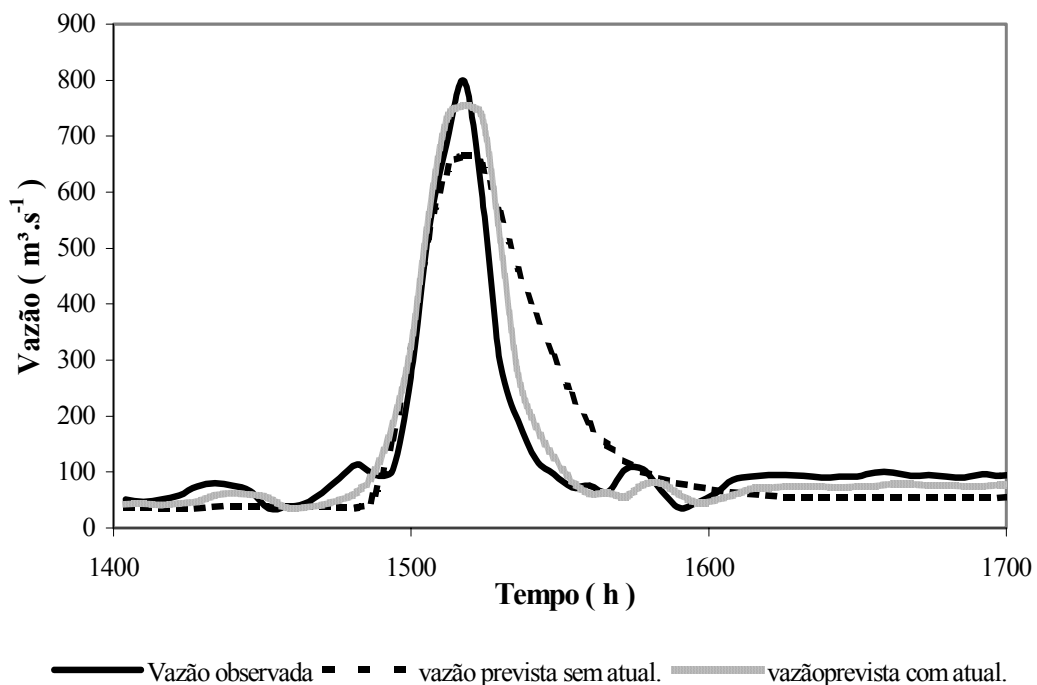


Figura 4.4 Previsão de Vazão em Ernestina com 12 h de antecedência (Brun e Tucci, 2001)

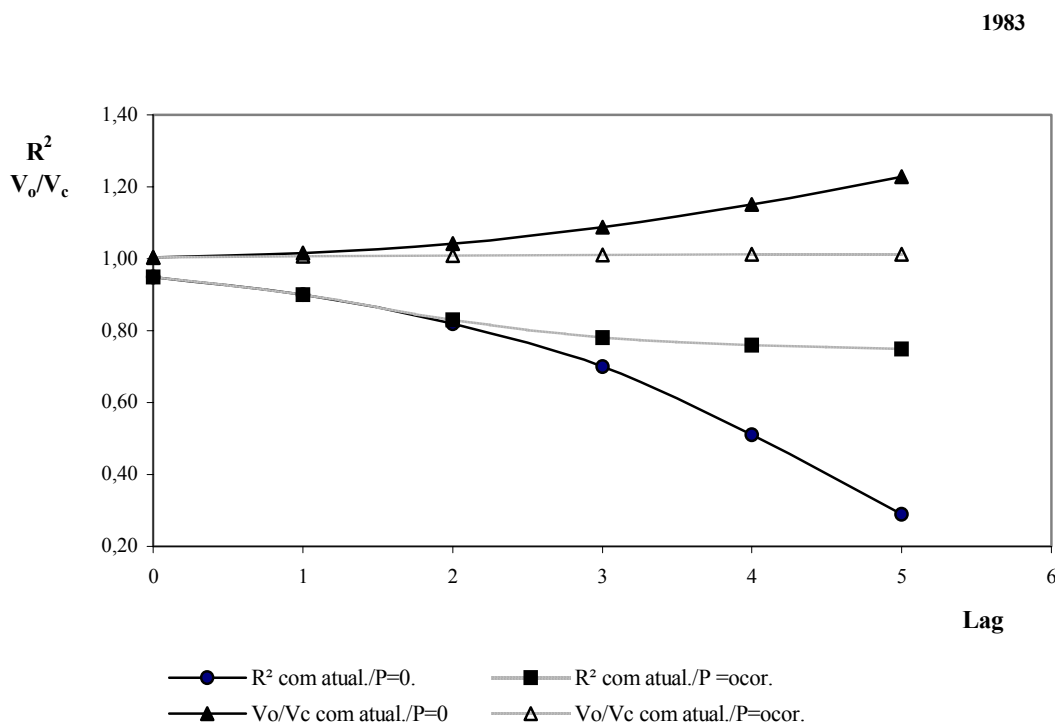


Figura 4.5 Previsão em Ernestina para várias antecedências no período chuvoso de 1983 (Brun e Tucci, 2001)

4.2 Previsão de Longo prazo

A previsão de longo prazo como citado no início deste capítulo pode ser realizado para antecedência de alguns meses que vamos denominar aqui de *longo prazo* e a previsão para vários anos que trata do entendimento da variabilidade decadal e geralmente procura muito mais analisar tendências para analisar o risco do planejamentos dos sistemas hídricos e a estacionariedade das séries hidrológicas vamos denominar aqui de *tendência ou predição de longo prazo*

4.2.1 Longo Prazo

A previsão de *longo prazo* pode ser realizada através de várias técnicas estatísticas, buscando similaridades com relação a sazonalidade regional. Por exemplo, numa bacia onde o período chuvoso é bem definido, após o período chuvoso as vazões podem ser previstas para os próximos meses (secos) apenas pelo esvaziamento do aquífero através da equação de regressão (Villanueva, et al 1987). Da mesma forma, em regimes hidrológicos com grande capacidade de armazenamento e sazonalidade bem definida a magnitude das vazões pode ser estimadas com pequeno erro de variância entre anos. Em sistemas muito lentos as vazões máximas ou mesmo o hidrograma podem ser estimados com base no tempo de traslado que pode levar alguns meses como rio Paraguai a jusante do Pantanal (Tucci e Genz, 1994). No entanto, na maioria dos sistemas hídricos que possuem memória de alguns dias e períodos chuvosos em grande parte do ano, as técnicas usuais de previsão de

médio prazo somente podem ser estatísticas quando não é possível prever a precipitação futura da bacia. Inicialmente foram utilizadas técnicas estatísticas para relacionar as anomalias de pressão e temperatura dos Oceanos com as vazões dos rios em algumas bacias como a do Pacífico e do rio Parana. Os resultados, apesar de promissores ainda apresentavam baixo grau de correlação para as práticas hidrológicas, no entanto, mostravam que existiam informações entre causa e efeito neste processo. Vários resultados na literatura mostram correlação entre as precipitações do Pacífico e o Sul do Brasil e recentemente com o Atlântico, mostrando que estes dois sistemas mostram sinais que poderiam explicar as vazões. Existem também estudos sobre a precipitação como mostra Barros et al (1995), no entanto, como foi demonstrado anteriormente a variabilidade da precipitação geralmente é menor que no escoamento, onde os sinais podem ser mais ampliados.

Com o uso de modelos climáticos para estimar as condições climáticas futuras foi introduzido recentemente a possibilidade de previsão de médio prazo através do uso da previsão da precipitação e evapotranspiração através do modelo climático e sua entrada no modelo hidrológico para previsão para alguns meses de antecipação. Desta forma, em resumo as alternativas de previsão aqui denominadas de *médio prazo* podem ser as seguintes:

- pela simples *estatística* sazonal das vazões num determinado local, prevendo-se sempre a sua média. Por exemplo, a média das vazões do mês de janeiro, fevereiro, março, etc seriam as previsões de vazões a serem utilizadas anualmente;
- por modelo *estocásticos* que consideram a sazonalidade, a interrelação temporal, os componentes aleatórios e mesmo variáveis de entrada como a precipitação para prever as vazões futuras;
- modelos *empíricos* que poderiam estar na classe anterior, mas que estabelecem relações entre variáveis climáticas indicativas, como temperatura ou diferença de pressão dos oceanos com a vazão dos rios;
- modelos determinísticos *climático* associados com modelos *hidrológicos*. O modelo climático estima as variáveis climáticas de entrada no modelo hidrológico que prevê as vazões.

Tucci et al (2002) utilizaram os quatro modelos citados acima compararam os resultados dos modelos acima para a bacia do rio Uruguai. O modelo hidroclimático utilizado foi o da composição do modelo do CPTEC para previsão climática com seis meses de antecipação com o modelo hidrológico de grandes bacias (Collischonn e Tucci, 2001).

O modelo hidrológico foi discretizado dentro de uma malha de 10 x 10 km, considerando o uso e tipo de solo, além de outras características fisiográficas e ajustado para cinco postos fluviométricos com base num algoritmo de otimização de função multi-objetivo. O modelo foi verificado para outros 12 postos fluviométrico, com resultados bons tanto nas estatísticas de ajuste como nas funções hidrológicas como o hidrograma e a curva de permanência.

O rio Uruguai tem alto potencial hidrelétrico pequena memória e baixa sazonalidade, onde os métodos estocásticos pouco contribuem. O modelo climático apresentou previsão de precipitação com erro sistemático o que motivou a inclusão de alteração de uma correção estatística das precipitações geradas pelo modelo CPTEC.

O conjunto dos dois modelos foi utilizado para previsão de médio prazo segundo as seguintes situações:

- precipitação conhecida (Mod 3): Esta situação permite identificar o componente do erro do modelo hidrológico na previsão e o patamar superior de redução do erro da estimativa do aprimoramento dos modelos climáticos;
- modelo CPTEC + modelo hidrológico (Modelo CH): situação da utilização das precipitações do modelo climático diretamente como entrada no modelo hidrológico e a simulação da vazão de saída;
- modelo CPTEC corrigido + modelo hidrológico (Modelo CHc): considerando que a maioria dos modelos climáticos tendem a subestimar a precipitação, foi adotada uma correção estatística, baseada em cada quadrícula do modelo hidrológico e para cada mês do ano. Esta técnica foi utilizada para um período e verificada para um período posterior.

As previsões realizadas pela junção dos modelos climáticos e hidrológicos foi baseada em cinco realizações do modelo climático e obtida a média. Portanto, os valores apresentados nos itens a seguir como resultados destes modelos é a média das cinco realizações.

A análise comparativa entre os modelos foi realizada para dois períodos:

- período 1: dezembro de 1995 a dezembro 1998 : utilizado para previsão
- período 2: junho de 1999 a outubro de 2001: utilizado para verificação dos modelos. Neste período ocorreram dois eventos importantes que foi o enchimento dos reservatórios de Itá e Machadinho, distorcendo os resultados. Além disso, o modelo hidrológico não representou o funcionamento dos reservatório, o que influencia as previsões dos modelos.

Nas tabela 4.2 é apresentado o erro padrão da estimativa dos valores mensais de previsão para os dois períodos e para a série total com os diferentes modelos. Pode-se observar que utilizando a média mensal dos valores históricos como base para comparação (coluna três), ou seja, modelo disponível e atualmente utilizado, o modelo climático –hidrológico (CH) (coluna 4) apresenta resultado pior para todas as séries. Isto indica que não existe ganho no uso direto destes dois modelos. Isto ocorre porque o modelo climático tende a subestimar a precipitação ocorrida. No entanto, para o modelo climático-hidrológico corrigido (CHc), que introduz a correção estatística na precipitação do modelo climático (coluna 5) observa-se redução do erro padrão da estimativa. Isto indica que como o erro da previsão de precipitação é sistemático é possível corrigir seu resultado e obter uma redução importante do erro padrão da estimativa. A última coluna, mostra que se conhecêssemos a precipitação (previsão perfeita pelo modelo climático) a redução máxima do erro padrão seria obtida. Observa-se que existe espaço para melhora tanto do modelo climático como para o modelo hidrológico.

A previsão com o modelo empírico é apresentada na tabela 4.3 juntamente com os demais modelos para valores trimestrais (intervalo de previsão deste tipo de modelo). Pode-se observar da referida tabela que os modelos apresentam a mesma tendência, com redução do erro padrão da estimativa para os valores trimestrais, como era de se esperar. O modelo empírico apresenta redução na estimativa para o período de ajuste e piora para o período de previsão. Os resultados do modelo empírico são inferiores aos obtidos pelo modelo climático-hidrológico corrigido (CHc).

Nas tabelas 4.4 e 4.5 são apresentados os resultados na forma de redução da variância pelo uso do modelo escolhido se comparado com o valor médio esperado em cada mês, que é o cenário atualmente utilizado. Da mesma forma, a tabela 4.4 apresenta os resultados mensais e a tabela 8.4 os valores trimestrais. Quando os valores são negativos indicam que o modelo não melhora os resultados se comparado com prever sempre a média mensal (ou trimestral) estatística do local. Desta forma, verifica-se que o ganho total do modelo climático-

hidrológico corrigido (CHc) é de 54% para o período total, retirando o período de enchimento dos reservatórios. No período de ajuste o ganho foi de 59% e no período de verificação de 49%, mostrando que o ajuste estatístico das precipitação é consistente e pouco dependente do período de estimativa. Na última coluna, observa-se que o ganho em conhecer a precipitação pode chegar a uma redução da variância do erro de 93%, o que é significativo.

Tabela 4.2: Resumo de comparação das previsões em termos de erro da previsão de vazão mensal (RMSE – m³/s) (Tucci et al, 2002)

Período	Observação	média mensal	CH	CH _c	Mod3
dez/1995 a dez/1998	período completo	2069	2178	1331	558
jun/1999 a out/2001	período completo	1299	1661	1198	–
	sem Itá e Machadinho	1369	1818	1087	–
dez/1995 a out/2001	período completo	1785	1976	1276	–
	sem Itá e Machadinho	1839	2051	1245	–

Tabela 4.3: Resumo de comparação das previsões em termos de erro da previsão de vazão trimestral (RMSE) (Tucci et al 2002)

Período	Observação	média mensal	CH	CH _c	Mod 3	Empírico TSM
dez/1995 a dez/1998	período completo	1570	1736	733	508	1153
jun/1999 a out/2001	período completo	808	1243	771	-	1154
	sem Itá e Machadinho	900	1266	638	-	1086
dez/1995 a out/2001	período completo	1295	1541	750	-	1157
	sem Itá e Machadinho	1373	1587	701	-	1134

Tabela 8.3: Resumo de comparação das previsões em termos redução da variância do erro da previsão de vazão mensal (RV - %). Valores positivos significam que a previsão é melhor do que a previsão com base na média mensal (Tucci et al, 2002)

Período	Observação	CH	CH _c	Mod3
dez/1995 a dez/1998	Período completo	-11	59	93
jun/1999 a out/2001	Período completo	-63	15	-
	sem Itá e Machadinho	-76	37	-
dez/1995 a out/2001	Período completo	-23	49	-
	sem Itá e Machadinho	-24	54	-

Na tabela 4.5 pode-se observar que o ganho do modelo climático-hidrológico é de 74%, o modelo empírico tem um ganho no período total, mas pobre previsão no período de verificação, onde os resultados são piores do que prever a média.

Tabela 4.5: Resumo de comparação das previsões em termos redução da variância do erro da previsão de vazão trimestral (RV - %). Valores positivos significam que a previsão é melhor do que a previsão com base na média mensal (Tucci et al, 2002).

Período	Observação	CH	CH _c	Mod3	Empírico TSM
Dez/1995 a dez/1998	período completo	-22	78	90	45
Jun/1999 a out/2001	período completo	-137	9	-	-104
	sem Itá e Machadinho	-98	50	-	-46
Dez/1995 a out/2001	período completo	-42	66	-	20
	sem Itá e Machadinho	-34	74	-	32

4.2.2 Predição do Impacto Climático

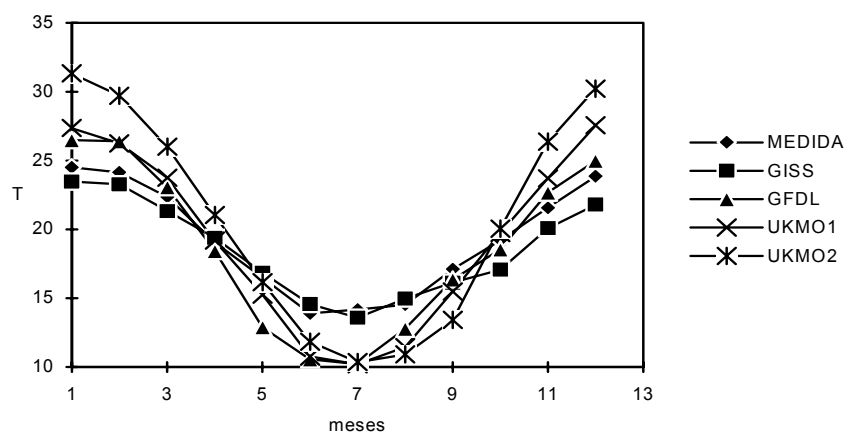
A avaliação do impacto climático é realizada com base no uso de modelos GCMs (Modelos Globais Climáticos) entre cenários de aumento dos gases do efeito estufa na atmosfera. Estes estudos tem sido realizados para diferentes bacias a nível mundial. No Brasil, Damiani e Tucci (1994) apresentaram um estudo desta natureza para a bacia do rio Uruguai que é reproduzido a seguir nos seus aspectos mais importantes.

Previsão climática dos modelos GCMs : As saídas utilizadas no estudo são dos modelos GISS (Goddard Institute for Space Studies), GFDL (Geophysical Fluid Dynamic Laboratory) e UKMO (United Kingdom Meteorological Office). Na discretização do Globo, apenas uma "caixa" representa a bacia do rio Uruguai nos dois primeiros modelos e no segundo duas "caixas", denominadas aqui de UKMO1 (Alto Uruguai) e UKMO2 (Médio e Baixo Uruguai). Estes modelos simularam dois cenários: 1x CO₂, que representa a quantidade de CO₂ existente na atmosfera nos anos sessenta e; 2xCO₂ a duplicação do CO₂ na atmosfera, previsto para a metade do próximo século. O modelo GISS apresentou também um cenário intermediário previsto para a primeira quarta parte do próximo século, chamado aqui de GISS-T. A duplicação do CO₂ inclui a adição de outros gases e é baseada na permanência da atual tendência de emissão de gases.

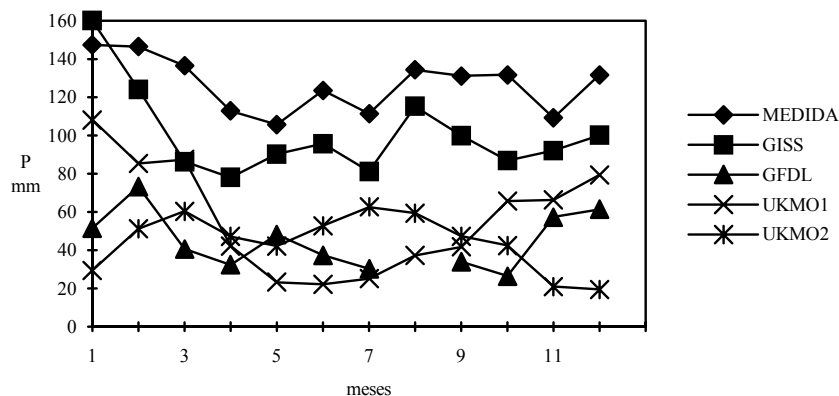
Os resultados fornecidos pelos modelos foram na forma de valores médios mensais de cada cenário para cada "caixa" geograficamente localizada. Na figura 4.6 são apresentadas as comparações da temperatura média e da precipitação média atual da bacia. Os valores observados foram obtidos pela média de 10 estações para um período de 20 anos e os valores dos modelos correspondem à previsão do cenário de 1xCO₂ para a bacia do Rio Uruguai. Os resultados mostraram o seguinte: a) o modelo GISS apresentou o melhor resultado tanto para temperatura como para precipitação; b) todos os modelos subestimam significativamente a precipitação.

Os resultados de temperatura e precipitação prognosticados para o cenário futuro foram em acréscimo de temperatura média e aumento percentual médio da precipitação para cada

mês. Pode-se observar o seguinte: a) o modelo GFDL apresenta resultados muito discrepantes de precipitação para os meses de outubro e dezembro, indicando na média anual um acréscimo de 19% na precipitação. Na temperatura este modelo previu um acréscimo médio de 3,6°C; b) O modelo GISS apresentou uma redução média de 2% na precipitação, sendo os meses de abril e maio os que apresentaram maior redução (17 e 14%, respectivamente). Na temperatura o modelo previu acréscimo médio de 4,5 °C; c) O UKMO1, que representa o Alto Uruguai, apresentou acréscimo médio de 19% na precipitação e 5,6 °C na temperatura; d) O UKMO2, que representa o médio e baixo Uruguai, apresentou um acréscimo de 4% na precipitação e 6,0 °C na temperatura. Como se observa, estes resultados apresentam uma tendência conflitante na precipitação. Atualmente existem previsões mais atualizadas destes modelos, no entanto os resultados a seguir apresentados permitem: (a) analisar a transferência de impacto destes processos; (b) caracterizar a metodologia que pode ser utilizada com previsões atualizadas.



a - Comparação entre temperaturas previstas pelos modelos e observada para o cenário atual.



b - Comparação entre precipitações previstas pelos modelos e medida para o cenário atual

Figura 4.6 Comparações para o cenário atual

Previsão de Vazão: Para estimar o escoamento resultante das modificações climáticas é necessário transformar a precipitação prevista pelos modelos GCMs em escoamento. Cobertura da bacia, solo e balanço de temperatura são fatores que também interagem com o clima e consequentemente na sua previsão. Estes fatores foram levados em conta nos

modelos GCMs de forma simplificada e numa discretização global. O uso de um modelo hidrológico nesta fase das estimativas objetiva melhorar uma parte das simplificações anteriormente existentes. O modelo hidrológico IPH-II (Tucci et al, 1981) foi utilizado neste estudo para simular o processo que transforma precipitação em escoamento.

Algumas sub-bacias do rio Uruguai foram escolhidas com base nos critérios seguintes: a) séries longas de precipitação e vazão; b) postos de precipitação com boa representação espacial na bacia; c) sub-bacias que forneçam uma boa representação espacial da bacia do rio Uruguai e suas condições. As principais características das sub-bacias são apresentadas na tabela 4.6.

O modelo utilizou dados de precipitação e vazão com intervalo diário, enquanto que a evaporação foi calculada mensalmente e distribuída uniformemente ao longo do mês. O método de cálculo da evapotranspiração foi o de Penman. Parte da série foi utilizada para ajustar o modelo e a parte restante para verificação. Os critérios de ajuste do modelo foram os seguintes: a) variação de volume e coeficiente de determinação; b) observação visual da qualidade do ajuste entre os hidrogramas observados e calculados; c) verificação do ajuste das funções hidrológicas. O ajuste e a verificação visual e das estatística foi satisfatório para todas as bacias.

A precipitação prevista pelos modelos GCMs e a evapotranspiração potencial calculada com base na temperatura, foram utilizadas como entrada nos modelos hidrológicos. A relação entre a precipitação dos dois cenários foi obtida por

$$RP_i = P_i (2xCO_2) / P_i (1xCO_2) \quad (4.1)$$

onde $P_i (2xCO_2)$ e $P_i (1xCO_2)$ são as precipitações do mês i para os dois cenários. A precipitação mensal prevista é obtida por

$$RF_i = R_i . RP_i \quad (4.2)$$

onde R_i = precipitação registrada.

A temperatura para o cenário futuro é obtida por

$$TF_i = Tr_i + DT_i \quad (4.3)$$

onde Tr_i = é a temperatura registrada no mês i e DT_i = a variação de temperatura entre os dois cenários prognosticada para o mês i .

A evapotranspiração para o cenário futuro é obtida pela equação modificada de Penman com base somente na modificação da temperatura, ou seja

$$EF_i = Ei + DEi \quad (4.4)$$

onde Ei = evapotranspiração calculada pelo método de Penman para o cenário atual; $DEi = F(TF_i) - Ei$; $F(TF_i)$ = cálculo da evapotranspiração pelo referido método com base na alteração somente da temperatura.

A precipitação é calculada diariamente como uma proporção dos valores ocorridos no passado, de acordo com o índice de correção prognosticado em cada mês pela equação 4.2. Portanto, admite-se que a distribuição temporal dos dias chuvosos é mantida, numa proporção linear com as ocorrências do passado. Esta é uma condição provavelmente irreal a nível diário, mas estes erros podem ser filtrados a nível anual ou mensal. Para melhorar este aspecto é necessário integrar os modelos hidrológicos e climáticos com intervalos de tempo e discretização compatíveis. Portanto, os resultados aqui obtidos devem ser encarados como uma previsão relativa e não absoluta destes cenários.

Na tabela 4.7 são apresentados os valores médios prognosticados por cada sub-bacia de acordo com o modelo GCM utilizado. Pode-se observar o seguinte, sobre a vazão média: a) o modelo GISS prevê uma redução de 9,62 a 14,14%; b) o modelo GISS-T apresenta uma redução de 6,9 a 14,1%; c) o modelo GFDL prevê aumento de 13,9 a 32,5% (principalmente devido ao aumento significativo da precipitação de outubro) e; d) UKMO prevê redução de 2,4 a 2,6 % para as bacias de montante e aumento de 4,8 a 21,2% para as bacias de jusante. Estes resultados apresentam conflitos de tendências quanto ao impacto.

Tabela 4.7 Variação percentual da vazão média entre os dois cenários

Bacia	GISS	GISS-T	GFDL	UKMO
Potiribu	-13,7	-14,3	15,6	10,8
Conceição	-11,1	-15,9	13,9	4,8
S. Angelo	-12,2	-14,3	20,0	9,5
P.A. do Sul	-9,62	-9,5	23,6	-2,6
Bonito	-10,4	-6,9	24,9	-2,6
Marombas	-10,4	-12,1	32,5	-2,4
Cachoeira	-12,4	-12,4	16,4	12,5
V. Clara	-14,1	-8,6	25,2	21,2

Para visualizar a variabilidade temporal da resposta dos modelos utilizou-se a vazão específica de cada sub-bacia. Obteve-se para cada mês a vazão específica média de todos os postos. Nas figuras 4.7 e 4.8 são apresentadas a precipitação e as curvas de vazões médias específicas para dois cenários para prognósticos dos modelos GISS e GFDL. As principais observações sobre estes resultados são: a) O modelo GISS prevê redução de vazão de abril até o final do ano, o que significa a redução de vazão média do início da estação chuvosa até dezembro, quando já iniciou a estação seca. Isto pode deslocar o período crítico de estiagem para outubro-dezembro; b) a versão GISS-T prevê valores semelhantes aos da versão GISS, o que indica que as consequências climáticas poderão ocorrer antes do horizonte esperado; c) o modelo GFDL apresenta resultados no sentido contrário ao do GISS, prevendo um aumento substancial na vazão média. Isto é decorrência do valor singular de outubro; d) as previsões do Alto Uruguai e Médio/Baixo Uruguai (UKMO1 e UKMO2) apresentam tendências temporais diferentes nas vazões médias. UKMO1 apresenta flutuações com relação ao cenário atual ao longo de todo ano e UKMO2 apresenta tendência de aumento na maioria dos meses.

Considerando que o Baixo/Médio Uruguai tem precipitações e vazões menores, estes resultados indicariam uma tendência de aumento de disponibilidade hídrica onde a falta é maior. Com o modelo há indicação de grande redução de vazão em novembro e dezembro.

Regionalização das funções hidrológicas: A regionalização de funções hidrológicas do escoamento permite a estimativa das mesmas em locais sem dados e a generalização do comportamento hidrológico numa região. Desta forma, para que fosse possível estimar o impacto sobre os recursos hídricos na bacia, foram regionalizadas as funções hidrológicas utilizadas no planejamento dos recursos hídricos e no controle ambiental. A regionalização foi realizada com base nas vazões das oito bacias para o cenário atual e os prognosticados. As funções hidrológicas utilizadas são as seguintes: a) curva de probabilidade de vazões médias: distribuição estatística das vazões médias anuais; b) curva de probabilidade de vazões mínimas para a duração de t dias: distribuição estatística das vazões mínimas anuais com t dias de duração; c) curva de probabilidade de vazões máximas anuais: distribuição estatística das vazões máximas anuais; d) curva de permanência ou de duração de vazões diárias: curva que relaciona a duração em que vazões maiores ou iguais ao valor da

ordenada ocorrem durante o período de análise; e) curva de regularização: relaciona a vazão e o volume de reservatório necessário para regularizá-la.

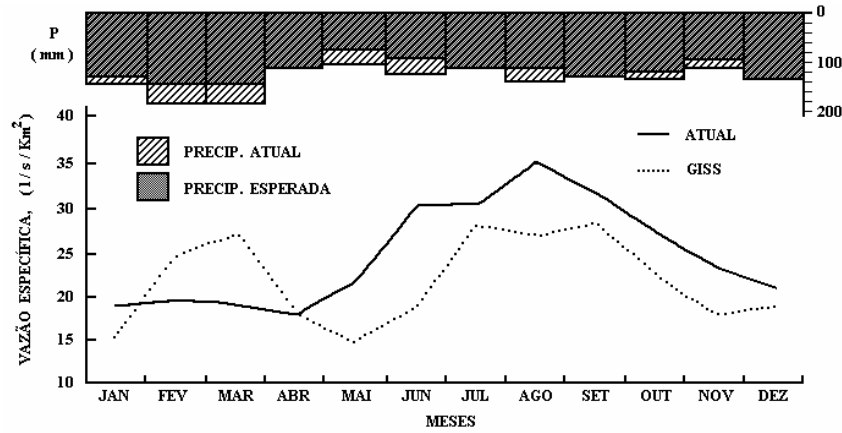


Figura 4.7 Cenário de alteração da vazão específica média do rio Uruguai com base nas previsões do GISS

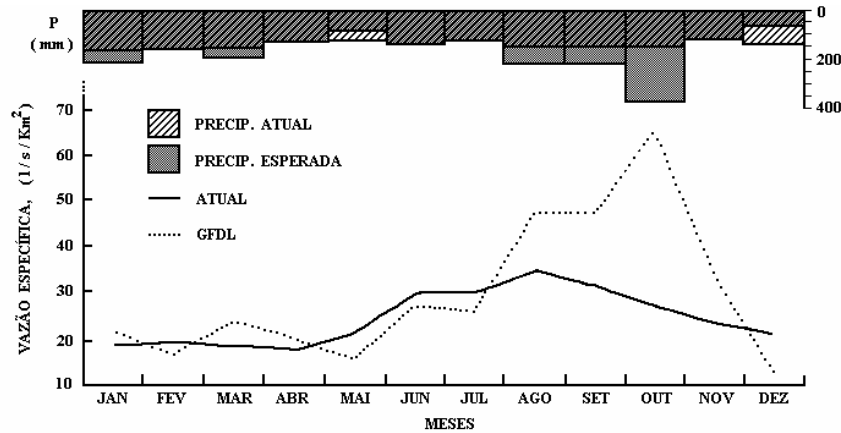


Figura 4.8 Cenário de alteração da vazão específica média do rio Uruguai com base nas previsões do GISS

A metodologia de regionalização utilizada para cada uma destas funções foi apresentada em Tucci (1993) e consiste no seguinte:

A curva de probabilidade relaciona vazão anual (máxima, média ou mínima) com a probabilidade de valores maiores, no caso de máximos e médios, e menores, no caso de vazão mínima num ano. A curva de probabilidade pode ser expressa por

$$F1(Q) = 1/T \quad (4.5)$$

onde $F1(Q)$ é função de distribuição de probabilidade e T o tempo de retorno. As vazões observadas em cada posto podem ser transformadas numa variável adimensional dividindo-as pela vazão média dos valores da curva, Q_m . A equação (5) se transforma em

$$F2(Q_T / Q_m) = 1/T \quad (4.6)$$

Utilizando a curva adimensional dos postos da região com o mesmo comportamento é possível estabelecer uma curva regional para a expressão (4.6) de forma gráfica ou ajustada matematicamente.

A vazão média Q_m é relacionada com características físicas e climáticas das bacias que podem ser mapeadas e facilmente estimadas pelos usuários. Para a região do rio Uruguai observou-se que apenas a área da bacia pode explicar grande parte das vazões de adimensionalização utilizadas. A equação pode ser expressa por

$$Q_m = aA^b \quad (4.7)$$

onde A = área da bacia; a e b são parâmetros que dependem da região e do tipo de vazão adimensional regionalizada. Quando a vazão de adimensionalização é a vazão mínima média de uma duração t , no termo da direita aparece a duração como variável.

Para uma bacia sem registros, Q_m é estimado pela equação 4.7 após a medição da área da bacia. Escolhido o tempo de retorno ou a probabilidade desejada, obtém-se Q_T/Q_m da equação (4.6). Multiplicando-se o valor do adimensional por Q_m , obtém-se a estimativa de Q_T . Este procedimento foi utilizado para estimativa da vazão máxima, média e mínima nos dois cenários mencionados.

A curva de permanência: Esta curva relaciona a vazão e sua probabilidade de ser maior ou igual a um certo valor. Normalmente esta curva é construída com vazões médias diárias. As vazões são classificadas em intervalos e calculadas as frequências de ocorrência em termos probabilísticos. As frequências são acumuladas no sentido da vazão maior para a menor, produzindo a função desejada. Esta curva é utilizada em estudos de hidrelétricas, navegação e qualidade da água, entre outros.

A curva pode ser expressa na forma de tabela ou ajustada a uma equação exponencial. Na metodologia utilizada adotou-se a seguinte seqüência: a) determine a curva de permanência de cada posto e estime as vazões de 50% (Q_{50}) e 95% (Q_{95}); b) relacione através de regressão estas vazões com a área da bacia utilizando a equação do tipo (7); c) utilize as vazões mencionadas para ajustar a equação exponencial, resultando na seguinte expressão (Tucci et al,1991).

$$Q = \exp (r P + s) \quad (4.8)$$

onde P é a probabilidade no intervalo 0-1; $r = - [\ln(Q_{50}/Q_{95})]/0,45$ e $s = \ln Q_{50} - 0,5 r$.

Curva de regularização: A curva de regularização relaciona a vazão q e o volume do reservatório V que permite a regularização deste escoamento com um certo nível de falha. Esta função pode ser adimensionalizada pela vazão média de longo período Q_l , resultando numa expressão do seguinte tipo

$$V/(Q_l \Delta t) = F(q/Q_l) \quad (4.9)$$

Esta relação é obtida para cada posto e regionalizada pelo ajuste de uma curva média dos postos da região desde que apresentem tendências semelhantes.

Regionalização das funções hidrológicas para os cenários de modificação climática: Probabilidade de vazões máximas médias e mínimas: Utilizando os dados de vazões registrados e dos cenários gerados pelos modelos GCMs-IPHII, foram regionalizadas as curvas de probabilidades das vazões máximas, médias e mínimas. Observou-se que a curva de probabilidade adimensional em todos os casos não se modificou significativamente entre o cenário atual e o futuro devido a linearidade de modificação adotada entre as séries de precipitações. Esta é uma limitação destes resultados, já que dificilmente este tipo de proporcionalidade ocorrerá em processos físicos que são nitidamente não-lineares. As modificações ocorreram principalmente nas

equações de regressão. Na tabela 4.8 são apresentados os coeficientes das equações de regressão para a série observada (cenário atual) e as previstas pelos modelos utilizados.

Quanto às vazões médias, observa-se que em todos os cenários ocorre aumento no expoente da área de drenagem, mesmo que ocorra diminuição do coeficiente multiplicador, como no GISS, GISS-T e GFDL. Isto pode ser resultado da deficiência da amostra ou que a vazão tende a aumentar mais com o tamanho da bacia. Para bacias entre 100 e 10.000 km², os modelos apresentam os seguintes resultados: GISS, redução de 15 a 11%; GISS-T%, redução de 20 a 11%; GFDL, aumento de 6 a 29%; UKMO, aumento de 11 a 3%.

Quanto às vazões máximas, observou-se que o cenário GFDL aumenta significativamente as vazões de cheia devido ao acréscimo exagerado da precipitação de outubro. Nos cenários previstos pelo GISS e GISS-T observa-se uma pequena redução dos picos de vazão. Resumindo, para bacias entre 100 e 10.000 km², obteve-se os seguintes resultados para os cenários: GISS, redução entre 4 e 10%; GISS-T aumento de 25% para a bacia menor do intervalo acima (100km²) e redução de 14% para a bacia maior (10.000km²); GFDL aumento entre 11 e 54%; UKMO, aumento entre 58 e 3%. Esta grande variabilidade pode ser resultado de distorções na amostra utilizada.

Tabela 4.8 Coeficientes e estatística das regressões da vazão de adimensionalização

Variáveis	Cenário atual	GISS-T	GISS	GFDL	UKMO
Vazão média					
A	0,0323	0,0234	0,0263	0,0280	0,0389
B	0,964	0,987	0,974	1,007	0,947
Coef. Determ.	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Vazão máxima					
A	0,56	1,0215	0,5673	0,4518	1,3689
B	0,85	0,768	0,838	0,920	0,7562
Coef. Determ.	0,85	0,83	0,82	0,87	0,80
Vazão mínima*					
A	0,00609	0,00648	0,00508	0,00579	0,00764
B	0,939	0,918	0,947	0,941	0,883
C	0,158	0,167	0,150	0,166	0,195
Coef. Determ.	0,97	0,98	0,97	0,97	0,95

* $Q_m = aA^b t^c$, onde t = duração

Para as vazões mínimas observou-se uma tendência geral de redução, ou seja agravamento da estiagem. Considerando a duração de 7 dias e o intervalo do tamanho de bacia entre 100 e 10.000 km² os resultados foram os seguintes: GISS, redução entre 15 e 12%; GISS-T, redução entre 2 e 11%; GFDL, redução entre 3 e 2 %; UKMO, acréscimo de 4%para a bacia menor (100 km²) a redução de 20%para a bacia maior (10.000 km²).

Curva de Permanência ou de duração: As curvas de permanência são obtidas com base nas vazões de Q50 e Q95. A regressão destas variáveis com a área da bacia para cada cenário foi elaborada com os dados de vazão e seus coeficientes apresentados na tabela 4.9. A vazão Q50 é muito próxima da vazão média de longo período, enquanto que a vazão Q95 caracteriza o ramo inferior da curva de permanência. Os resultados sobre esta variável para bacias entre 100 e 10.000 km² mostraram o seguinte: GISS, redução de 4 a 22%; GISS-T, redução de 6 a 12%; GFDL, redução de 13% para a bacia de 100 km² e aumento de 4%para a bacia de 10.000km²; UKMO, redução de 1 a 6%.

Curva de Regularização: A curva de regularização é obtida neste estudo com base em vazões mensais com um risco de 5% de falha de atendimento a demanda. As curvas de cada posto foram obtidas com base nas vazões dos diferentes cenários. A curva regional de cada cenário foi obtida pelo ajuste de uma curva média adimensional de regularização. As curvas regionais obtidas são apresentadas na figura 4.9

Tabela 4.9 Coeficientes das equações de regressão de Q50 e Q95

Variáveis	Cenário Atual	GISS-T	GISS	GFDL	UKMO
Q50					
A	0,02	0,0191	0,0212	0,0126	0,0289
B	0,965	0,953	0,931	1,035	0,914
Coef. Determ.	0,98	0,97	0,96	0,98	0,99
Q95					
A	0,0065	0,0065	0,0077	0,0047	0,0076
B	0,975	0,961	0,930	1,014	0,939
Coef. Determ.	0,97	0,98	0,97	0,98	0,95

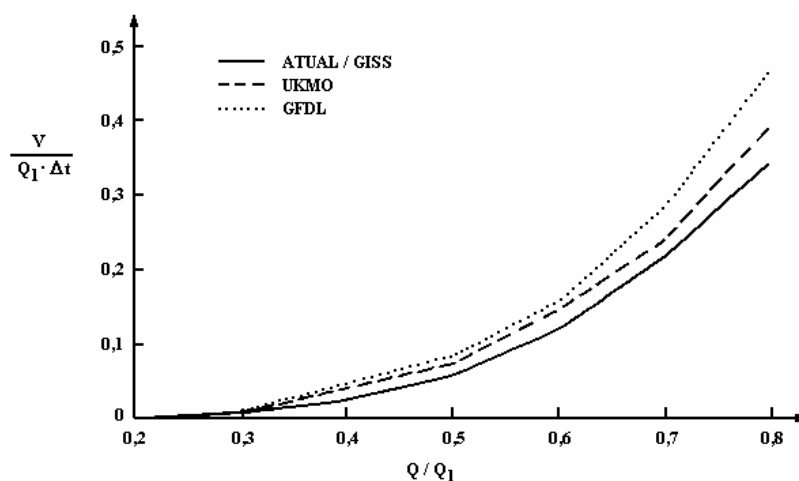


Figura 4.9 Curvas adimensionais de regularização para os cenários

Pode-se observar que a curva adimensional correspondente ao modelo GISS é aproximadamente igual a curva baseada no cenário atual. Como as curvas são adimensionais as diferenças entre cenários dependem da variação da vazão média de longo período, que para este modelo mostra redução de 15 a 11%. Utilizando uma bacia de 1000 km² de área de drenagem e uma vazão regularizada de 15 m³/s, correspondente a 60% da vazão média de longo período, obtém-se os seguintes resultados: GISS aumento de volume de regularização em 50%; para os cenários GFDL e UKMO o volume necessário não aumenta significativamente.

5. VARIAÇÕES DE LONGO PRAZO E SEUS IMPACTOS NOS SISTEMAS HÍDRICOS

5.1 Características

O desenvolvimento dos recursos hídricos ao longo do século vinte foi baseado em técnicas desenvolvidas por engenheiros para o dimensionamento e planejamento de sistemas hídricos. A base de todas estas técnicas é a estatística da série histórica das vazões medidas nos rios. Portanto, admite-se de início os seguintes princípios básicos:

- As séries de vazões são homogêneas ou estacionárias, ou seja as suas estatísticas não variam com o tempo;
- as amostras utilizadas são representativas.

A série é estacionária quando as estatísticas da série não se alteram com o tempo. A não-estacionariedade pode ocorrer por um ou mais dos seguintes fatores:

- variabilidade climática no período de amostra;
- modificação climática;
- modificação do uso do solo.

5.1.1 Variabilidade e representatividade

A histórica tem mostrado que o clima é um condicionante fundamental no desenvolvimento da população em diferentes partes do globo (Diamond, 1997). Mesmo considerando o avanço no último século da tecnologia, a variabilidade climática pode produzir impactos significativos no desenvolvimento dos países e comprometer a sustentabilidade das populações.

A variabilidade climática e a representatividade da amostra são condicionantes semelhantes, já que a falta de representatividade de uma amostra de dados observados pode não mostrar todas as variabilidades da população estatística da série. Os dois últimos fatores representam efeitos antrópicos sobre o sistema.

O que se observa é que existem poucas séries com período superior a 80 anos e somente nas últimas décadas aumentaram em diferentes partes do globo o número de séries longas, evidenciando as características interdecadal dos processos climáticos e hidrológicos. Existem séries de variáveis climáticas como temperatura obtidas por correlação com amostras de gelo ou de precipitação estimadas com base nos anéis de árvores, no entanto são informações indiretas que permitem uma idéia do comportamento, mas se diferenciam dos valores efetivamente observados.

O conhecimento do comportamento climático tem sido avaliado com base em séries de dados, na maioria de 20 a 50 anos de dados hidrológicos. São raras as séries com tamanho próximas de 100 anos. Desta forma, grande parte das pesquisas da variabilidade e comportamento do clima se basearam em amostras de períodos curtos que podem ser tendenciosos.

Na bacia do rio Uruguai e grande parte do Rio Grande do Sul o período entre 1942 e 1951 foi mais muito seco, se comparado com o restante da série. Isto pode ser observado em

diferentes locais do Estado. Utilizando a série após 1951, por exemplo 1951-2000, com 50 anos para dimensionar o volume útil de um reservatório o seu volume é 50% menor que o volume estimado considerando a série após 1942. O impacto neste caso ocorrerá sobre a infra-estrutura do Estado quando um período seco como este se repetir no futuro. Neste tipo de situação a amostra depois de 1950 não é representativa dos períodos úmidos e secos que aparecem em séries longas. Outra situação deste tipo foi observada na série do rio Paraguai em Ladário, quando na década de 60 (1960 a 1973) ocorreram níveis muito abaixo do período anterior (veja capítulo 5).

Em Blumenau em Santa Catarina desde 1852 são observadas as cotas máximas de inundação (a série de cotas de inundações mais longa do país). A série de observação contínua iniciou em 1935, mas foram registradas todas as cotas acima de 9,0 m (cota do leito maior) desde de 1852, portanto pode-se considerar como uma série contínua de cotas de inundação. No período de 1912 a 1982 as cotas ficaram muito abaixo ($< 13,0$ m) das inundações que ocorreram antes e depois deste período (várias cotas entre 15 e 17,1 m, a máxima em 1880). Analisando a série de dados contínua desde 1935-2000, a mesma poderia ser considerada estatisticamente não-estacionária, mas como se observa estes condicionantes se referem a variabilidade de longo período e amostra pouco representativa (período de registro).

Este tipo de comportamento tem sido observado pelos hidrológicos ao longo do tempo e denominado como o efeito de José e Noé . Geralmente estas observações se prendiam a décadas específicas, como realmente se destacam os dados de muitas regiões do globo. No entanto não tem sido observado se existem ciclos de maior longo prazo porque a maioria séries não são suficientemente longas.

Tucci e Clarke (1998) e Collischonn et al (2001) mostraram, que bacias de grande porte na América do Sul (rio Paraguai e Paraná) e na África apresentavam períodos longos com tendências diferentes. Enquanto na América do Sul apresentou aumento de precipitação e vazão após 1970, na África houve redução substancial. As questões que facilmente aparecem quanto as causas são: serão estas tendências de longo prazo que a ciência não conseguiu identificar devido aos períodos curtos das informações ? Este comportamento pode ter sido influenciado por condições antrópicas como o uso do solo ou o aquecimento devido ao efeito estufa? As respostas a estas questões requer um esforço importante de ciência dentro de uma visão integrada e global dos processos hidroclimático a nível global e de mesoescala. No capítulo 4 foi analisado este aspecto dentro da bacia do Prata, onde ficou evidente que ocorreram efeitos combinados do clima e do uso do solo, de difícil separação.

De outro lado, mesmo que não exista um entendimento completo e não seja possível prever com antecedência estes processos é necessário entender os impactos que a sociedade está sujeita devido a estas variabilidades para que sejam planejadas medidas mitigadoras.

5.1.2 Efeitos antrópicos

Alguns profissionais questionam o uso de séries históricas longas devido aos diferentes efeitos antrópicos ou inconsistência de dados a seguir listados:

- alterações no uso do solo como desmatamento, e uso de diferentes práticas agrícolas;
- construção de reservatórios de diferentes portes a montante na bacia, aumentando a evaporação do lago;

- modificação climática devido ao efeito estufa;
- inconsistência nos dados hidrológicos ao longo de muitos anos de medida e/ou alteração no leito do rio na seção de medição;
- retirada de água para usos consuntivos.

Todos estes fatores são importantes e devem ser analisadas os condicionantes que possam alterar as séries hidrológicas, principalmente porque o uso das mesmas não será para o passado, mas para o futuro onde são planejados e gerenciados os sistemas hídricos. No entanto, deve-se considerar que o exame do cenário de projeto realizado no passado pode ser alterado, comprometendo o funcionamento dos sistemas existentes.

O desenvolvimento de modelos hidrológicos permite analisar o efeito da maioria dos itens acima dentro de alguns limites de precisão e futuramente os modelos climáticos poderão também permitir examinar o efeito da modificação climática nas séries hidrológicas.

A principal conclusão retirada desta análise é de que **é necessário revisar as práticas de projeto e planejamento baseada no conceito de séries estacionárias. As séries devem ser revistas e desenvolvidas práticas de tratamento de séries não-estacionárias.**

5.2 Impacto sobre os diferentes setores dos recursos hídricos

A variabilidade climática afeta em maior ou menor grau todos os usos dos recursos hídricos e a conservação ambiental associada. Na história das civilizações é comum a identificação do movimento e sustentabilidade de povos em função da disponibilidade hídrica ou combinações de fatores de clima, solo, água e outros fatores físicos. As freqüentes secas que ocorrem no Nordeste explicam muito da história desta região do país e inclusive o movimento da população atingida para outras partes do país.

O efeito existe, mas é necessário analisar quais são as principais fragilidades em cada setor dos recursos hídricos associado com o desenvolvimento econômico regional, discutido a seguir.

5.2.1 Abastecimento urbano

O abastecimento de água de comunidades pode ser realizado através de poços para populações de até 5000 habitantes, por pequenas bacias de acordo com a disponibilidade e demanda a fio d'água ou por regularização ou ainda por grandes bacias em função da localização da demanda. A fragilidade maior a variabilidade climática estão nas comunidades que atualmente possuem seu abastecimento nas seguintes condições:

- Regiões semi-áridas onde a disponibilidade é pequena, independentemente da regularização;
- localidades abastecidas por rios de pequena bacia sem regularização, mesmo tendo uma vazão média alta. Nas cabeceiras do rio Uruguai é comum encontrar comunidades nestas condições que sofrem freqüentes racionamento por falta de regularização;

- mananciais urbanos com demanda acima da capacidade da disponibilidade hídrica, como em parte da Região Metropolitana de São Paulo, onde a demanda retirada para abastecimento é superior a disponibilidade de alguns mananciais;
- redução da disponibilidade pela poluição dos sistemas hídricos devido ao ciclo de contaminação urbano (Tucci, 2002).

A grande fragilidade dos sistemas de abastecimento urbanos estão relacionados com a falta de monitoramento por parte da maioria das companhias de abastecimento da disponibilidade hídrica dos mananciais, ficando sempre sujeita a variabilidade interanual e ao racionamento. Estas companhias geralmente estão focadas no tratamento da água e de alguma forma no tratamento de esgoto (com pouco sucesso) e geralmente não tratam de conhecer a disponibilidade do seu insumo básico que é água. Este cenário gera maiores incertezas a sustentabilidade da quantidade e qualidade da água de abastecimento, já que qualquer anomalia maior sobre o sistema hídrico poderá gerar impactos significativos.

Observou-se em extensa região do país houve aumento na vazão depois dos anos 70, considerando que grande parte das séries hidrológicas utilizadas no planejamento de novas instalações, quando existem, iniciaram depois desta data, é provável que grande parte dos sistemas de abastecimento podem estar sub-dimensionados para disponibilidades registradas antes deste período. O Rio Grande do Sul é um exemplo desta situação, já que a década de 40 (42-52) foi muito seca e são poucas as séries que englobam este período. Dimensionando reservatórios com a série que não considera a década de 40, o reservatório pode estar sub-dimensionado em 50% (Rio Uruguai, como citado anteriormente). Repetindo-se uma estiagem prolongada, a economia do Estado ficará comprometida.

A forma de mitigar estes cenário é desenvolver estudos que analisem as alternativas emergenciais destes cenários e estudem mecanismos de segurança para atender este tipo de cenário.

6.2.2 Irrigação

Com a implementação da regulamentação do uso da água e da cobrança, poderão ocorrer dois processos opostos na área rural: (a) redução da demanda da irrigação nos projetos existentes devido à cobrança e à racionalização do uso da água, criando melhores oportunidades para a sustentabilidade regional da atividade, com obediência aos acordos e às decisões dos comitês de bacia; (b) aumento de conflitos, com dificuldades na implementação das decisões dos comitês e de restrições de diferentes naturezas. Provavelmente, o País deverá registrar os dois tipos de processos, mas é esperado que o primeiro predomine.

A irrigação é um dos grandes consumidores de água, principalmente no Sul com a irrigação de arroz que consome o equivalente a cerca de 800 pessoa/ hectare, com pouca racionalização do seu uso. A tendência é de que num cenário crítico de disponibilidade hídrica aumente o conflito entre a irrigação e o abastecimento de água, que já ocorre. Como a irrigação geralmente ocorre distribuída pelas propriedades e a ação envolve proprietários privados e as empresas de abastecimento de água são empresas com maior inércia e estão a jusante destas propriedades, num período crítico o abastecimento será penalizado e exigirá medidas fortes para inverter a prioridade prevista na legislação para o abastecimento humano.

No Nordeste grande parte da irrigação é realizada à partir do rio São Francisco, que por ser uma bacia muito grande, normalmente não apresenta limitações de disponibilidades apesar

do conflito com a energia. No entanto, este cenário será sempre crítico para os perímetros fora do São Francisco onde as garantias são limitadas e dependente da variabilidade interanual para a garantia da sustentabilidade. Para aumentar a garantia são necessário reservatórios que garantam a disponibilidade entre anos secos, mas reservatórios de maior volume se comparado com a vazão média, possuem grande tempo de residência nos anos secos, o que tende a salinizar devido a alta evaporação. Este cenário pode ser minimizado em parte com uso de conjuntos de reservatórios ou práticas locais como reservatórios subterrâneos. Aqui também o conflito entre o uso humano e a é significativo.

Nesta região do país observa-se uma tendência uma média móvel declinante da precipitação e de aumento da evapotranspiração nos últimos anos 13 anos, agravando ainda mais a sustentabilidade da população. A avaliação da tendência interdecadal e os efeitos climáticos para esta região são fundamentais para o planejamento de ações.

Na região Semi-Árida a tendência é do uso agrícola na vizinhança dos grandes mananciais seja voltado para produtos de maior rentabilidade e para agricultura de subsistência nas áreas de pouca disponibilidade de água. A fruticultura e o café em algumas regiões têm mostrado rentabilidade que tornam viáveis o investimento, principalmente pela maior número de safras em um mesmo ano. Por outro lado, esses empreendimentos exigem regularização da água sem falhas durante períodos longos, já que o plantio é permanente. Pode-se, assim, esperar uma tendência de investimento de empresas agrícolas na região do São Francisco, com crescimento econômico da região por meio de investimentos privados. A sustentabilidade desse processo a longo prazo dependerá do aprimoramento tecnológico. Nas áreas agrícolas fora da cobertura da disponibilidade hídrica sem riscos, onde os rios não foram perenizados, o potencial de água é pequeno, sendo pouco eficiente e conflituoso o recurso sistemático à irrigação de baixo valor agregado. De acordo com as condições atuais, o desenvolvimento se dará muito mais no sentido de buscar a sustentabilidade social da população por meio da melhora dos indicadores sociais a partir de investimentos sociais não necessariamente relacionados à água. O cenário potencial é de gradual solução de alguns problemas críticos de sustentabilidade social, como mencionado, por meio de investimentos externos à região, proporcionando atendimento a uma maior demanda por água para irrigação, sobretudo para a fruticultura irrigada praticada no raio de ação dos rios perenes ou perenizados.

Na região Sul e Sudeste do país a irrigação não abrangem grandes áreas até porque os períodos secos não têm sido muito longos desde a década de 70 o que leva parte dos agricultores a não optarem pela irrigação. No entanto, se houver uma modificação de tendência poderá aumentar a demanda por irrigação, tornando-se viável a sua implantação em função de um maior resultado econômico e da diminuição da disponibilidade nos períodos secos. O Centro-Oeste onde se encontra grande parte do cerrado brasileiro, área de grande potencial agrícola depende muito da regularização da água já que os lençol freático é profundo (Planalto) e a sazonalidade anual da precipitação mostra vários meses (maio a agosto) praticamente sem precipitação. Portanto, a viabilidade da expansão agrícola desta área está relacionada com a disponibilidade hídrica e sua regularização.

Quanto aos programas de conservação do solo, deve-se observar que ainda ocorrerão grandes discrepâncias regionais de ações. As regiões em que o agricultor é mais bem treinado e em que há uma ação mais presente da extensão rural deverão apresentar resultados bons como já acontece hoje. Em outras regiões, prevê-se uma ação federal mais efetiva para garantir investimentos em capacitação do homem do campo, em pesquisa aplicada e em extensão rural. Os grandes desafios deverão envolver no controle da ocupação dos limites da Amazônia e o desenvolvimento do Cerrado. Esse processo dependerá muito das políticas governamentais de apoio de investimento.

6.2.3 Energia

Planejamento de longo prazo

Em termos mundiais, o Brasil é um dos grandes produtores mundiais de energia hidrelétrica com 10% da produção mundial. O sistema de produção energético brasileiro depende 91% da energia hidrelétrica e tem planejada sua diversificação com termelétricas a gás para os próximos anos. Mas mesmo com a diversificação, até 2003 o sistema dependerá 83% da energia hidrelétrica.

Desta forma, este sistema é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazo, para a produção de energia firme e, portanto, da garantia de atendimento do sistema. O sistema foi projetado com base na probabilidade de falha estimada através do uso de séries históricas de vazão que iniciaram em 1930 e incorporam mais informações anualmente.

Silveira e Guerra (2001) avaliaram a crise de energia atual do setor elétrico e mostraram que os investimentos no setor entre 1985 e 1995 foram inferiores à demanda (veja figura 5.1) o que resultou no rebaixamento do reservatório equivalente do sistema Sudeste Centro Oeste como pode ser observado na figura 5.2, transformando um sistema de regularização interanual em um sistema de regularização intra-anual.

Apesar do sistema hidrelétrico apresentar uma grande interligação energética, o que reduz o risco de falha do sistema como um todo, grande parte do conjunto de usinas hidrelétricas está localizado na região Sudeste, o que concentra o risco de falha do ponto de vista espacial, porque as diversas usinas estão sujeitas a variabilidades climáticas simultâneas.

Desde 1970 as regiões Centro – Oeste, Sul e Sudeste apresentam vazão média cerca de 30% superior a do período anterior (veja capítulo 4), o que significa que, para a mesma capacidade instalada, é possível gerar mais energia, com menor risco de falha. Isto tem permitido, ao longo do tempo, aumentar a energia firme das usinas.

O aumento de vazões ocorre, pelo menos parcialmente, como consequência de um aumento simultâneo, mas menos intenso, das precipitações na mesma região do Brasil. Enquanto isto, algumas regiões na África, como a bacia do rio Congo e a região subsahariana experimentam um longo período menos úmido do que o anterior, e a redução das vazões (ver capítulo 4).

Os processos que produzem alterações climáticas deste tipo, em regiões distintas, ainda são pouco explicados pelos climatologistas. Recentemente, Stevens (1999, reportagem do New York Times) citou as observações do oceanógrafo de Pasadena, na Califórnia, de que existem períodos longos, de aproximadamente 30 anos, de **variabilidade climática**, que deve ser diferenciada da modificação climática (veja análise no capítulo 4). O primeiro período observado se estendeu de 1940 a 1970, quando ocorreram seqüências de El Niños de fraca intensidade e La Niñas de forte intensidade, o que indica períodos mais secos em parte das regiões da América do Sul. O segundo período se estende de 1970 até 2000, quando ocorreram El Niños mais intensos e La Niñas menos intensas.

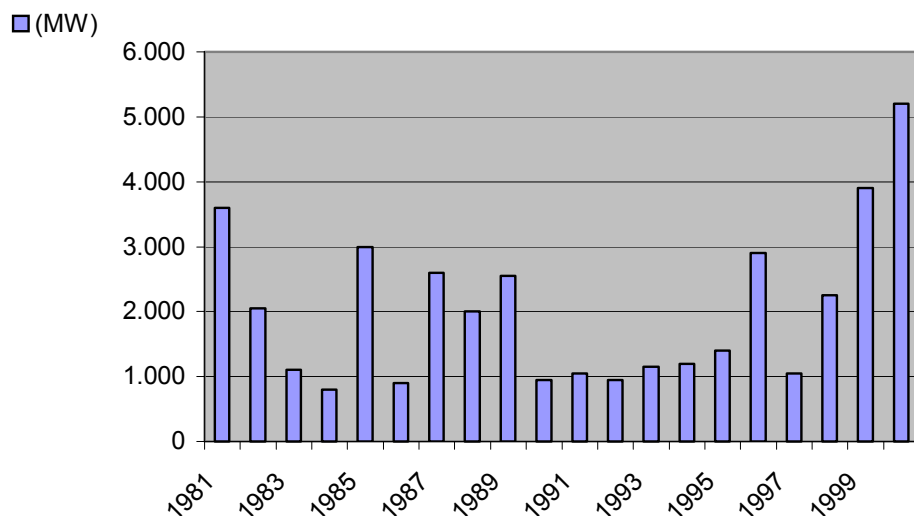


Figura 5.1 Incremento de anual de potência instalada (Aneel, 2001)

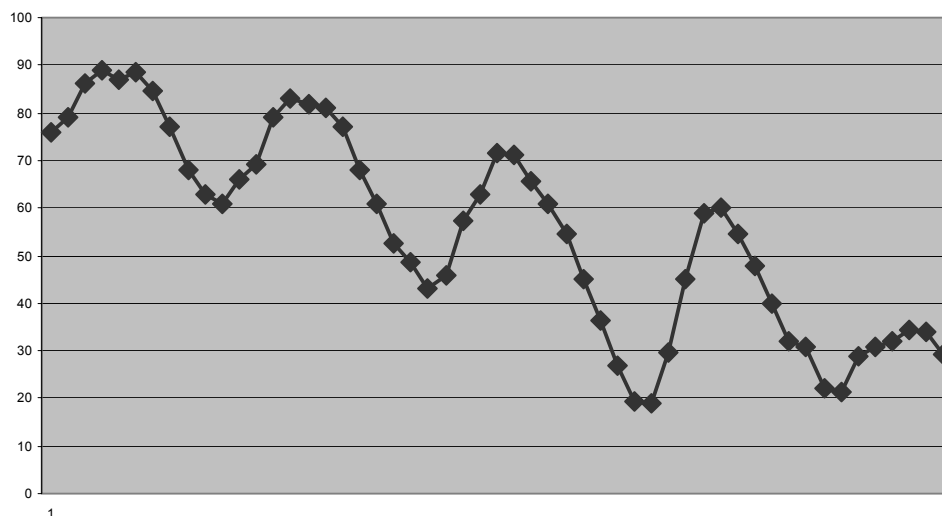


Figura 5.2 Nível de (%) de armazenamento do reservatório equivalente do sistema SE/CO de janeiro de 1997 a junho de 2001 (Aneel, 2001)

Este comportamento somente poderia ser observado estatisticamente com séries suficientemente longas e tem passado sem ser considerado. Somente agora, com mais conhecimento sobre o clima, e com séries de dados hidrometeorológicos que se aproximam dos 100 anos, é possível observar estes processos (veja comentário acima).

Em algum grau, parte desta variabilidade climática tem sido prevista com base em modelos de circulação atmosférica, em horizontes de aproximadamente 6 meses (capítulo 5). Estes modelos permitem prever, com relativo sucesso, se as variáveis climáticas estarão superiores ou inferiores à média climática de uma estação ou sequência de meses. Mais recentemente (Tucci et al 2002) estas previsões mostraram que é possível reduzir as incertezas nas previsões de até seis meses no rio Uruguai (capítulo 5).

O sistema elétrico brasileiro, mesmo com o período de vazões altas atual, está no limite de atendimento da demanda (como citado acima). Condições climáticas mais desfavoráveis resultariam em condicionantes críticos ao desenvolvimento econômico brasileiro, mantidas as tendências de aumento da demanda e de reduzida ampliação da oferta.

Além disso, o mercado atacadista de energia, que entrará em funcionamento nos próximos anos, dependerá, de forma significativa, da previsão das condições climáticas de curto e médio prazo. Provavelmente haverá um importante desenvolvimento tecnológico neste setor, em função do prêmio do conhecimento prévio dos condicionantes que norteiam os preços. Da mesma forma que existe a previsão de safras agrícolas, em função das condições climáticas e do plantio, a agência reguladora poderá se especializar para informar as condições previstas, de curto e médio prazo, de volume dos reservatórios, que devem regular os preços do setor.

A pergunta que naturalmente aparece é a seguinte: se soubermos com antecipação o que vai ocorrer, trará algum benefício, já que a instalação de sistemas de produção de energia requer anos para implantar? O benefício desta avaliação preditiva é de buscar conhecer o risco e minimizá-lo através de ações planejadas como uma reserva técnica energética para garantia do sistema.

Previsão de Curto prazo e volume de espera

Os reservatórios de hidrelétricos operam com base na programação de geração e previsão de vazões dentro de cenários mensais e semanais, com correções diárias. Dentro desta programação, nos reservatórios de maior porte são estabelecidos *volumes de espera* para controle de enchentes a jusante dos mesmos, tornando o sistema de uso de múltiplo. O volume de espera implica na redução de níveis do reservatório para amortecimento de cheias durante o período chuvoso. Quanto maior o volume, maior é a redução da energia produzida em detrimento ao controle de inundações. A sua determinação é realizada com base nas estatísticas das séries de vazões históricas afluentes do reservatório.

Esta metodologia tem o agravante de sub ou superdimensionar este volume quando os valores ficam acima ou abaixo das condições esperadas (flutuação estatística). Os resultados destas incertezas produzem de um lado maiores riscos de inundação e segurança do sistema e de outro ineficiência com perda de energia gerada, a medida que o nível é rebaixado e durante o período chuvoso não consegue recuperar o nível máximo normal.

A previsão de curto prazo pode contribuir para redução do volume de espera permitindo:

- maior segurança as barragens e aos trechos de jusante da mesma;
- Melhorar a produtividade da Usina mantendo a mesma condição de risco a jusante e para a barragem.

Atualmente os reservatórios hidrelétricos no Brasil não utilizam a previsão de curto prazo para reduzir o volume de espera. Estes procedimentos são puramente hidrológicos e dependem da ocorrência da precipitação sobre a bacia, portanto possuem uma antecedência máxima correspondente ao tempo de concentração da bacia. Além disso, agregam incertezas pela falta de conhecimento da precipitação futura sobre a bacia.

A previsão da precipitação e a sua inclusão integrada ou separada ao modelo hidrológico permitirá ampliar o tempo de antecedência da previsão de vazões afluentes aos reservatórios do sistema. Associado a esta previsão é possível gerenciar com maior eficiência a disponibilidade de energia.

Segurança das barragens

Deve ser analisada a eventualidade do rompimento da barragem e a área que pode ser atingida e a velocidade do escoamento como base para um plano de defesa civil a jusante do empreendimento. Cerca de 35% das falhas ocorridas no mundo são devido a sub-dimensionamento do vertedor em função, da representatividade das séries de vazão. O risco de rompimento das barragens geralmente é da ordem de 10^{-4} (baseado na probabilidade de dimensionamento do vertedor). Desta forma uma barragem durante sua vida útil de 100 teria a chance de 1% de romper. Nas últimas décadas, com o aumento da informação hidrológica, melhoria dos métodos construtivos, previsão e alerta de ocorrência das enchentes é de se esperar que este risco seja menor (Serafim, 1981). Marengo (1996) mostra que de acordo com o período de construção e a idade o risco de falha diminui, convergindo para valores de 10^{-5} .

Segundo Lave et al. (1990) e Serafim (1981) o uso de um sistema de alerta com pelo menos duas horas de antecedência pode reduzir o número de mortes a zero. Paté-Cornell e Tagaras (1986) mencionam que um sistema de monitoramento pode reduzir em 12% a chance de rompimento da barragem, o número de mortes em 44% e os prejuízos em 12%. Brown e Graham (1988) identificaram dois tipos enchentes: (a) tempo superior a evacuação, estimado em 90 minutos; (b) tempo inferior a 90 minutos. No primeiro caso a perda de vidas é estimada em 0,04 % da população ameaçada e no segundo 13%. Deve-se considerar que na seção de passagem da cheia, onde as velocidades são maiores é onde existem os maiores riscos.

São poucos os países que possuem um sistema legal que obrigue aos empreendimentos a prevenção para este tipo de ocorrência. Na Argentina este processo iniciou com a privatização do sistema elétrico. No Brasil ainda não existe nenhuma regulação para prevenção dos impactos resultantes desta situação. Na França um decreto de 1968 obriga a realização de um plano de emergência para todas as barragens com mais de 20 m de altura ou reservatórios com capacidade superior a 15 hm^3 (Benoist, 1989). Nos Estados Unidos existem barragens sob legislação federal e outras sob legislação estadual. Apenas as barragens administradas por órgãos federais ou barragens particulares que participam de projetos hidrelétricos estão sob lei federal. Na década de 90 o governo federal desenvolveu um padrão para segurança das barragens visando unificar as leis estaduais.

Tendências

O risco de um sistema hidrelétrico com pouca folga de oferta é o de ocorrência de externalidades climáticas, cíclicas e de longo prazo, que podem comprometer as atividades econômicas durante um longo período, dada a inércia de ajuste do sistema. Como é impossível prever as condições climáticas de longo prazo, torna-se necessário conceber e planejar o sistema não só para que ele possa ter um plano de emergência para esta situação como também incorporar duas premissas para planejamento diversificação : das fontes e da localização dos sistemas hidrelétricos.

No cenário tendencial espera-se que na matriz energética tenda a aumentar as térmicas, mas no horizonte previsto deverá possuir ainda grande predominância das Usinas Hidrelétricas (> 70%) devido ao potencial disponível. O mercado atacadista de energia, que entrará em funcionamento nos próximos anos, dependerá de forma significativa da previsão das condições climáticas de curto e médio prazo. Provavelmente haverá um importante desenvolvimento tecnológico no setor em função do benefício associado a um prêmio do conhecimento prévio dos condicionantes que norteiam os preços.

Como mencionado acima é necessário estabelecer uma estratégia para a eventualidade do impacto da redução da disponibilidade hídrica do sistema de produção hidrelétrico.

5.2.4 Navegação

O cenário do transporte do país está muito concentrado no rodoviário e a capacidade deste sistema está no limite. A tendência é de ampliação dos outros meios de transporte na medida que o país se sofisticava e cresce. Portanto, o transporte hidroviário interior deverá se incrementar, principalmente em função das grandes áreas de produção agrícola no Centro-Oeste do país. O transporte hidroviário é uma das importantes alternativas devido a sua economia de escala. No entanto, é fortemente dependente da variabilidade dos níveis dos rios e de sua previsão de curto e médio prazo, além das estatísticas destes níveis.

A carga transportada por um barco depende fundamentalmente do calado do rio. Como seu transporte pode demorar vários dias em rios como Paraná, Paraguai, Jacuí, Amazonas, entre outros é necessário prever com antecedência os níveis para estabelecer a carga a ser transportada. Da mesma forma em termos de condições médias futuras é possível avaliar os custos de transporte em função dos níveis de água e a capacidade de transporte das embarcações. Como a maioria dos rios não possuem regularização para navegação (com poucas exceções, como no Tietê e o Jacuí, ainda com conflitos com outros usos) o impacto de períodos longos acima ou abaixo dos conhecidos pode comprometer o preço e a viabilidade do transporte hidroviário.

5.2.5 Qualidade da água, meio ambiente

A qualidade da água é dependente da vazão nos rios. Quanto maior a vazão, maior será a capacidade de diluição dos corpos de água. No entanto, deve-se considerar outro efeito que é o aumento da demanda bentônica (carga no fundo dos rios) quando a vazão aumenta e a erosão do fundo incorpora esta carga no volume transportado pelo rio, reduzindo a sua qualidade. No rio Paraguai e seus afluentes, uma das condições mais críticas de qualidade da água ocorre durante o início do período chuvoso, em algumas lagoas e trechos de rios. Com início das chuvas, grande parte da parcela inicial de escoamento que chega nos rios, traz consigo grande quantidade de matéria vegetal. Este volume adicional e a erosão do fundo em alguns pontos traz aumento da carga de matéria vegetal para decomposição no rio. A matéria vegetal em decomposição utiliza grande quantidade de oxigênio (mesmo processo da inundação de mata em reservatórios construídos), reduzindo o OD (oxigênio dissolvido) dos rios, chegando a zero em muitos trechos, o que produz mortandade de peixes.

Na maioria dos sistemas hídricos as condições críticas de qualidade da água ocorrem durante as estiagens quando a vazão nos rios diminui e sua capacidade de diluição das cargas urbanas e rurais diminui. Nas áreas urbanas, início das inundações a carga do pluvial também gera condições críticas de qualidade da água.

A questão básica deste sistema é quais são as condições que podem ser agravadas com a variabilidade climática?

- Períodos mais secos como ocorreram antes de 70 podem representar um menor capacidade de diluição e, piora da qualidade da água dos rios;

- de outro lado, intensificando as precipitações nos centros urbanos devido ao efeito de aquecimento das superfícies urbanas e processos convectivos, as cargas pluviais representarão custos maiores para melhoria da qualidade da água;
- o desmatamento e a expansão das áreas agrícolas tenderão a ampliar a carga difusa rural sobre os sistemas hídricos, além de reduzir a capacidade de regularização natural das bacias. No entanto, a expansão do uso do plantio direto pode ser uma atenuante neste processo, apesar de ainda não se dispor de avaliação adequada das cargas de pesticidas e outros compostos.

Como condicionante ambiental para conservação da fauna e flora é muito mais importante a manutenção da variabilidade sazonal do que efetivamente um valor limite como discutido na qualidade da água. Evidentemente que um valor limite baixo pode comprometer a fauna do rio, mas a duração de valores acima ou abaixo de determinados patamares pode alterar significativamente a flora. No rio Paraguai a sustentabilidade do Pantanal depende muito mais da ocorrência do extravasamento da calha do rio, onde este volume alimenta os baixios com água e sedimentos que permite a sustentabilidade destas áreas como banhado. Alterando a magnitude das inundações reduzirá as áreas inundadas e o banhado pode se transformar em cerrado devido ao balanço hídrico negativo desta área, como de certa forma ocorreu entre 1960 e 1973.

A construção de um reservatório que regulariza a vazão a jusante, reduzindo sua amplitude altera os condicionantes ambientes a jusante em função da redução da amplitude de variação dos níveis e vazões. Neste sentido, o impacto potencial da variabilidade climática pode produzir alteração da paisagem e alteração ambiental de alguns ambientes. Somando-se a isto as ações antrópicas é necessário conhecer as conseqüência desta complexa realidade que o homem pode produzir.

O comprometimento ambiental de regiões como Amazônia, Pantanal, Cerrado, entre outros, pela variabilidade climática e ações antrópicas deve ser examinado para que medidas preventivas e mitigadoras possam ser planejadas, principalmente no zoneamento ecológico em desenvolvimento a nível de governo.

5.2.6 Inundações

A inundação ribeirinha é um processo natural em que o rio inunda o seu leito maior de acordo com a intensidade e duração das precipitações e condições iniciais de umidade. Quando ocorrem modificações no rio, como a construção de uma barragem os níveis de inundação podem se alterar em função das condições operacionais da barragem.

Os principais impactos sobre a população ocorrem devido a falta de:

- ❑ conhecimento sobre a ocorrência dos níveis de inundações e;
- ❑ do planejamento da ocupação do espaço de acordo com os riscos de ocorrência das inundações.

As medidas de controle são não-estruturais e estruturais. As medidas de controle não-estruturais envolvem a convivência da população com o rio através do alerta e do zoneamento das áreas de inundação e as medidas estruturais envolvem a modificação do rio construção de obras de proteção como diques, barragens, canalizações entre outras. Os custos do primeiro tipo geralmente são muito menores que os das medidas estruturais.

No Brasil não se observa nenhum programa sistemático de gerenciamento do controle das inundações, apenas ações isoladas de construção de obras de proteção, enquanto que medidas não-estruturais praticamente são reduzidas. Observa-se em alguns trechos de rios o Alerta de inundação pela simples informação dos níveis ou a previsão de curto prazo como no trecho inferior do rio Paraná, no trecho do Pantanal do rio Paraguai e no rio Iguaçu. Na cidade de São Paulo existe um sistema de previsão de alerta com base em radar meteorológico.

O cenário comum de impacto é decorrência do seguinte: a população ocupa a várzea de inundação quando ocorre uma sequência de anos de níveis anuais máximos pequenos, já que áreas planas são propícias ao assentamento. Quando retornam os anos com maiores inundações os prejuízos são significativos e a população exige dos governos uma ação no sentido de construir obras de controle como barragens, entre outros.

Exemplos deste cenário são apresentados a seguir:

- Na figura 5.3 pode-se observar os níveis de enchentes no rio Iguaçu em União da Vitória. Num período longo as inundações ficaram abaixo de 5 anos de tempo de retorno. As enchentes após 1982 produziram prejuízos significativos na comunidade (tabela 5.1)
- No rio Itajaí existem registros iniciando em 1852, com todas os níveis acima no leito menor do rio. Na figura 3 pode-se observar também a variabilidade destes níveis e observar que entre 1911 e 1983 não ocorreram níveis acima de 13,04 m (risco de aproximadamente 15 anos), enquanto antes e depois deste período verificou-se vários níveis que chegaram até 17,10 m. Tanto neste caso como no anterior as séries contínuas de registros que iniciaram em 1930 apresentaram tendenciosidade de amostra para avaliação do risco. Neste caso, também os prejuízos foram significativos, em 1983 (risco de cerca de 30 anos) os mesmos representaram 8% do PIB do Estado de Santa Catarina da época.

Tabela 5.1 Perdas por inundações em União da Vitória e Porto União (JICA, 1995)

Ano	Prejuízos US\$ milhões
1982	10.365
1983	78.121
1992	54.582
1993	25.933

- No alto rio Paraguai existe uma das maiores banhados do mundo, denominado Pantanal. Nesta região sempre houve uma convivência pacífica entre o meio ambiente e a população. Na figura 4 pode-se observar os níveis máximos de enchentes em Ladário desde o início do século. Na tabela 2 são apresentados valores do nível máximo médio de inundação e das áreas inundadas do Pantanal em três períodos distintos. Pode-se observar a grande diferença da década de 60 com relação as demais. Neste período houve ocupação dos vales de inundação. Esta população foi desalojada nas décadas seguintes e devido as alterações de leito a variabilidade dos fluxos no Pantanal teve que abandonar suas propriedades e estão vivendo na periferia das cidades da região em estado de pobreza.

Desta forma a variabilidade climática condiciona a ocupação do espaço rural e urbano quando não existe uma programa preventivo de controle de inundações, levando a grandes prejuízos por parte importante da sociedade brasileira que ocupa áreas de risco.

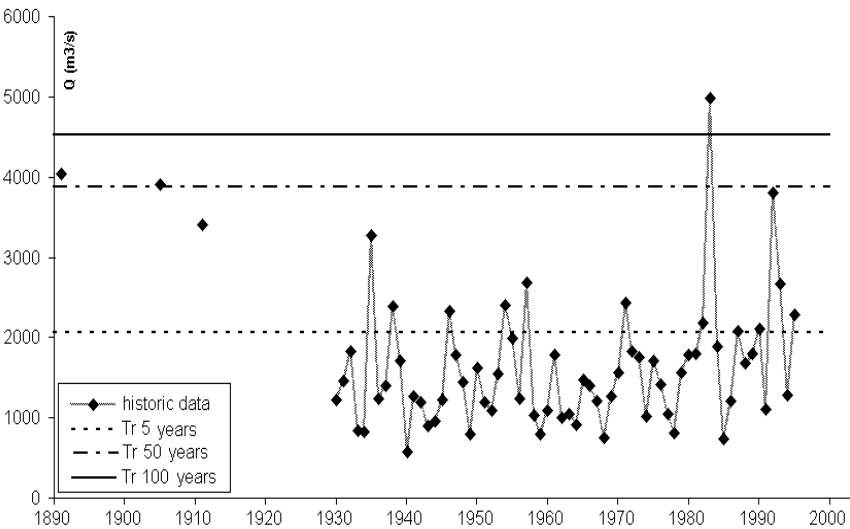


Figura 5.3 Níveis máximos de enchentes no rio Iguaçu em União da Vitória (bacia de cerca de 25.000 km²), (Tucci and Villanueva, 1997)

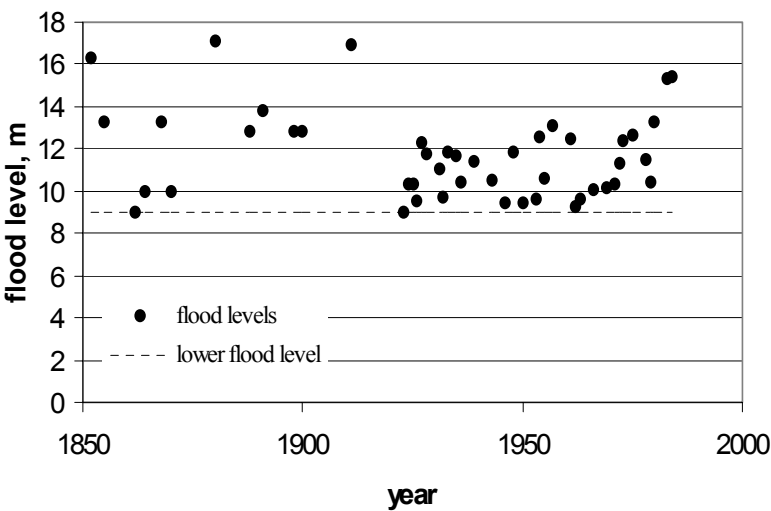


Figure 5.4 Níveis de cheia em Blumenau, SC,

Tabela 5.2 valores estimados de níveis e áreas inundadas no Pantanal (valores aproximados)

Período	Nível Máximo Médio	Área Inundada Média no Pantanal *
	M	1000. Km²
1900-1959	4,16	35
1960 – 1972	2,21	15
1973-1992	5,49	50

* valores aproximados obtidos de Hamilton (1995)

5.3 Estudo de Caso do impacto devido a modificação climática

Os resultados apresentados a seguir são transcritos de Tucci e Damiani (1994) que analisaram o impacto das modificações climáticas na bacia do rio Uruguai. No período desde que foi realizado o estudo, os modelos climáticos foram aprimorados, mas a metodologia utilizada continua atualizada e pode ser utilizada a medida que os modelos climáticos melhorem suas estimativas.

No capítulo anterior foram apresentados os resultados de estimativa das vazões e regionalização das funções hidrológicas para os dois cenários estudados: (a) cenário 1 xCO₂ representado pelo estado do final da década de 80; (b) cenário 2xCO₂ ou seja a duplicação da quantidade de Dióxido de Carbono na atmosfera esperado para metade do século atual.

O estudo analisou, através de amostragem, o impacto da modificação climática pelas estimativas dos dois cenários para os diferentes usos da água. Além da avaliação dos impacto foi também discutida as medidas mitigadoras.

O planejamento da bacia envolve a definição e a projeção do uso da água, impactos ambientais e controle de enchentes na sua área de contribuição. Na prática o planejamento pode ser visto como o estudo de alternativas de um projeto específico ou de vários projetos para um mesmo uso da água. O planejamento de toda a bacia envolve a integração dos esforços para identificar as necessidades e definir as prioridades do uso da água e do controle ambiental dentro de uma visão de múltiplos usos. Os usos dos recursos hídricos na bacia tem sido definidos dentro das prioridades nacionais como a produção de energia e abastecimento de água. Os reservatórios tem sido projetados de acordo com objetivos específicos que refletem benefícios tangíveis. Os principais usos e controles dos recursos hídricos na bacia são: produção de energia, controle de enchentes, abastecimento de água, irrigação e meio ambiente. A seguir serão apresentados os resultados da avaliação dos impactos da modificação climática sobre os aspectos mencionados.

Hidrelétricas: A produção de energia através de hidrelétricas pode ser dividida neste caso em: a) sistema de médio e grande porte; b) pequenas centrais hidrelétricas (PCH).

Grandes e Médios aproveitamentos: O rio Uruguai apresenta um grande potencial hidrelétrico com 40,5 KW/km². Os aproveitamentos podem ser classificados de acordo com os países envolvidos e em aproveitamentos bi-nacionais. A energia total inventariada na bacia é de 16.500 MW, com apenas 2.680 MW já aproveitada.

Para análise do impacto foram utilizados aproveitamentos planejados ou em operação para os quais os dados necessários para avaliar a potência estavam disponíveis. Estes aproveitamentos são apresentados na tabela 5.3. A avaliação da modificação climática foi realizada utilizando estes aproveitamentos como amostra de toda a região. Os dados utilizados foram as curvas de regularização dos inventários, a curva obtida a partir da alteração climática (capítulo 5) e as características do reservatório. Estas curvas foram usadas sem levar em conta a evaporação. Para aproveitamentos em cascata as condições relativas do projeto foram mantidas. Os resultados devem ser entendidos como relativos entre cenários.

Considerando a capacidade de produção projetada, na tabela 5.3 foram obtidas a produção para o cenário atual e aquele previsto pelos modelos climáticos. Resultados contraditórios foram obtidos de acordo com o modelo GCM. Aqueles obtidos com base no GISS estimam redução de produção de energia de 5%, o que significa redução de 1800 GWh/ano, equivalente a uma usina de 375 MW. Para recuperar esta energia o investimento ficaria da ordem de US\$ 560 milhões (1500 dólares/kW). O modelo UKMO estima

redução de 2,5% e 468 GWh/ano ou uma usina de 97 MW. Já o modelo GFDL prevê aumento de 17,3%, que poderia aumentar a produção em 4900 GWh/ano. Estes números se referem aos aproveitamentos analisados e não à totalidade dos aproveitamentos da bacia.

Tabela 5.3 Aproveitamentos hidrelétricos e cenários de produção

Usinas	Vazão média m³/s	Volume (hm³)	Potência (MW)	Atual Gwh/ano	GISS gw/ano	GFDL gwh/ano	UKMO gwh/ano
P. Fundo	51	1560	220	1061	993	1145	1068
S. Grande	4640	5000	1890	9112	8852	11032	8563
C. Novos	267	527	880	4243	3881	4543	4118
Machad.	664	4510	1200	5786	5465	6984	5742
Garabi	4640	8300	1800	8678	8639	10386	8493
Monjol.	115	9	72	347	330	382	356
B. Grande	256	3865	920	4436	4140	4990	4432
Garibaldi	250	1945	228	1099	1016	1245	1109
Pai-Querê	129	1742	288	1389	1287	1538	1404
Itá	883	3590	1620	7810	7266	9338	7565
Diferença (%)					-4,8	17,3	-2,5

Pequenos Aproveitamentos: As pequenas centrais hidrelétricas são usualmente utilizadas para suprir comunidades rurais ou pequenas cidades. Estas usinas tem pequena capacidade, menor que 10 MW. Estas centrais começaram a ser instaladas no início do século para suprir algumas cidades, porém com a implantação do sistema interligado, foram sendo abandonadas, além de sofrerem grande impacto devido ao inadequado uso do solo rural, que produziu grande quantidade de sedimentos assoriando e danificando alguns aproveitamentos. Com a eletrificação rural foram desenvolvidos alguns aproveitamentos. No Rio Grande do Sul existem apenas 35 MW de capacidade instalada de PCHs. Estes aproveitamentos tem como característica o pequeno volume, que em consequência se tornam muito vulneráveis a variação do escoamento. A curva de permanência é utilizada para o dimensionamento e avaliação econômica destes aproveitamentos. Como todos os modelos previram redução de vazão para o ramo inferior da curva de permanência é de se esperar que haverá um impacto maior sobre estes sistemas.

Para analisar este impacto foram utilizadas duas PCHs hipotéticas, uma no Alto Uruguai e outra no Médio Uruguai. Utilizaram-se os prognósticos dos modelos GISS e GFDL através das curvas de permanência. Os resultados indicaram que poderão ocorrer redução dos benefícios de 13,8% (GISS) e 0,9 % (GFDL) para o aproveitamento do Alto Uruguai. No aproveitamento do Médio Uruguai o impacto estimado pelos dois modelos é desprezível.

Enchentes: Os principais impactos devido as enchentes ocorrem nas áreas ribeirinhas próximas das cidades. Na bacia do rio Uruguai as principais cidades ribeirinhas são Uruguaiana, São Borja e Itaqui no Médio Uruguai e Marcelino Ramos no Alto Uruguai. Para esta análise foram escolhidas duas cidades Marcelino Ramos no Alto Uruguai e Uruguaiana no Médio Uruguai. Na tabela 6 são apresentadas as alterações em metros de cota que corresponderam aos riscos especificados. Por exemplo, para o tempo de retorno de 10 anos em Marcelino Ramos, a estimativa do modelo GISS indica que a cota foi reduzida de 0,75 m, o que indica uma redução de área atingida para o mesmo risco (tabela 5.4). Pode-se observar destes resultados que o prognóstico dos modelos GISS e UKMO são benéficos já que é prevista uma redução das áreas ribeirinhas sujeitas a inundação mais freqüente. No entanto, o modelo GFDL prevê aumento significativo das áreas de

inundações, principalmente devido ao aumento anômalo da precipitação de outubro. O prognóstico deste modelo provavelmente é uma distorção da simulação. Estes valores chegariam a representar aumento de nível da ordem de 4 metros nestas cidades para o mesmo risco, o que indicaria que as mesmas estariam quase todas cobertas por inundações para um risco de apenas 10 anos.

Para analisar o impacto sobre grandes obras hidráulicas projetadas na região, como vertedouro de barragens, utilizou-se uma bacia hipotética de 15.000 km². O modelo GISS apresentou redução de vazão de 10%, o GFDL acréscimo de 57% e o UKMO redução de 1,7%.

Tabela 5.4 Alteração de nível de cheia entre o cenário atual e o previsto pelos modelos

Tempo de Retorno (anos)	MARCELINO RAMOS (m)			URUGUAIANA (m)		
	GISS	GFDL	UKMO	GISS	GFDL	UKMO
10	-0,75	4,5	-0,70	-0,66	4,18	-0,64
30	-0,83	5,2	-0,80	-0,80	4,92	-0,78
50	-1,00	6,3	-0,96	-0,84	5,28	-0,80
100	-1,13	7,0	-1,09	-0,87	5,70	-0,82

Abastecimento de água: As demandas de abastecimento de água e irrigação são em geral obtidas pela regularização de pequenas bacias, quando o local de atendimento se localiza longe de um grande rio. Estas condições são as que sofrem mais com a disponibilidade hídrica. Estes dois usos da água tendem a ser competitivos quando existe falta de água.

O consumo doméstico e industrial de água não é muito grande na bacia do rio Uruguai para uma população de cerca de 3,6 milhões de habitantes e demanda média de 219 l/(hab.dia) (valor médio do Rio Grande do Sul em 1989 abastecido pela CORSAN), existe uma demanda total de 9,1 m³/s. Apesar da demanda ser inferior disponibilidade hídrica de forma global, a variação temporal e espacial destes recursos não garante a demanda em alguns locais da bacia. Em algumas áreas do Médio Uruguai, como a bacia do rio Ibicuí, o abastecimento de água compete com a irrigação de arroz que consome uma vazão significativa. As cidades com mais de 20.000 habitantes tem utilizado recursos hídricos superficiais sem regularização, onde o impacto da flutuação sazonal é mais importante. Atualmente, devido a falta de regularização existem alguns locais da bacia que sofrem racionamento de água durante o período de estiagem.

O impacto da modificação climática inclui dois fatores básicos: 1) aumento do consumo no verão (período crítico) devido ao aumento da temperatura; e 2) modificação na disponibilidade hídrica. O primeiro fator não foi analisado. Para analisar o impacto da modificação climática utilizou-se uma bacia de 20 km², tamanho representativo de aproveitamentos deste porte. Esta bacia, como fonte de disponibilidade hídrica foi analisada nos diferentes cenários considerando as situações de: a) regularização através de um reservatório; b) sem regularização. Na tabela 5.5 é apresentado o resultado da situação a, onde se observa em quase todos os casos a redução da demanda garantida para as diferentes faixas de vazão regularizada, cerca de 12-14% no cenário do GISS, 8-12% no cenário do GFDL e redução de 3 a aumento de 7% no caso do UKMO. Para o aproveitamento sem regularização observa-se 16,7% de redução da demanda no cenário GISS, 1,7 % para GFDL e aumento de 20% no caso do UKMO. Este último resultado pode ser tendencioso pois envolve a extrapolação inferior da curva de regularização.

Estes resultados indicam que poderá ocorrer um impacto importante sobre a disponibilidade hídrica de abastecimento urbano na região.

Tabela 5.5 Percentagem de variação da vazão disponível para abastecimento de água

Vazão regularizada em % da vazão média	GISS (%)	GFDL (%)	UKMO (%)
40	-13,4	-11,6	-3,3
50	-13,0	-7,6	1,3
60	-12,7	-8,3	4,3
70	-12,1	-8,7	6,4

Irrigação: A irrigação na bacia é realizada principalmente para o arroz, com investimentos privados. O trigo não apresenta déficit de água no seu período de cultivo em condições naturais, enquanto soja e milho possuem *déficit* em algumas áreas durante um certo período do ano. Contudo, a demanda destas culturas é pequena se comparada com a do arroz. Com base em estimativas da demanda de arroz (CNEC, 1983) a bacia do rio Ibicuí apresenta alta demanda, representando cerca de 13,3% da vazão média em alguns locais.

Lanna (1991) estimou o aumento na irrigação com base no prognóstico do modelo GISS para soja/milho e arroz. Para soja/milho foi previsto acréscimo da demanda de 11%, aumento de 26% para as necessidades de irrigação média e para o ano crítico 9%. Para o arroz a previsão de aumento de demanda foi de 6,5%; o aumento das necessidades de irrigação média é de 2% e 9% para o ano crítico. Este acréscimo de demanda associado à redução de vazão e aumento da demanda de abastecimento de água em função do aumento médio de temperatura seguramente aumentará os conflitos de uso da água em sub-bacias como a do rio Ibicuí.

Qualidade da água: Na bacia do rio Uruguai, as maiores fontes de poluição industrial encontram-se nos rios do Peixe e Canoas, no Alto Uruguai. Estas vazões representam efluentes de indústrias de couro, papel e de alimentação. Além disso, todas as cidades lançam diretamente no rio os esgotos domésticos sem tratamento. As cidades de Caçador, Videira e Lages apresentavam (CNEC,1983) as maiores cargas e poderiam sofrer os maiores impactos no uso da água. Para analisar o impacto da modificação da vazão nestes locais mais críticos, utilizou-se a vazão mínima de duração de 7 dias e tempo de retorno de 10 anos e as concentrações previstas para os cenários de 1985 e 1995 (CNEC,1983). Na tabela 5.4 são apresentadas as alterações na vazão nestes locais e na tabela 10.9 são apresentadas as alterações percentuais do DBO e DO segundo os diferentes cenários para a cidade de Lages. Nas outras duas cidades a situação é tão ruim que este tipo de análise não é possível.

Medidas de ajuste e recomendações: Como os modelos produziram resultados contraditórios para algumas condições como enchentes e produção de energia, a avaliação deve ser realizada com base no cenário previsto por cada modelo. Os modelos apresentam cenários semelhantes para irrigação, abastecimento de água e qualidade da água. Os cenários conflitantes ocorrem para a produção de energia e enchentes.

Considerando as condições de geração hidrelétrica no Brasil a bacia do rio Uruguai não pode ser estudada como um sistema isolado, já que o sistema energético é interligado com o restante da região Sul e Sudeste. O estudo se prendeu somente ao rio Uruguai e seria razoável concluir que a situação mais desfavorável de redução de energia poderia ser facilmente compensada pelo sistema interligado; no entanto, restaria saber qual seria o impacto da modificação climática sobre este sistema.

As enchentes no cenário do GISS apresentam redução das vazões máximas o que é benéfico para as obras hidráulicas. No entanto, é prematuro dizer que estão

superdimensionadas, já que o cenário do GFDL prevê justamente o contrário, apesar dos valores parecerem pouco realistas.

Tabela 5.4 Variação na vazão mínima de 7 dias 10 anos com relação ao cenário atual e o previsto

Cidade	Rio	GISS (%)	GFDL (%)	UKMO (%)
Caçador	Peixe	-11	-6	-2
Videira	Peixe	-12	-4	-3
Lages	Canoas	-17	-10	-1

Tabela 5.5 Variação da concentração entre o cenário atual e o futuro para o Canoas em Lages*

Cenários	1980		1995	
	DBO (%)	OD	DBO (%)	OD
GISS	12	-7	13	-13
GFDL	1	-1	1	-10
UKMO	18	-10	19	0

* As datas se referem às cargas previstas pela CNEC(1983)

O abastecimento de água que hoje é crítico em algumas áreas durante a estiagem, poderá se agravar, com redução da ordem de 10% na disponibilidade hídrica. Os ajustes necessários seriam: a) aumentar a regularização; b) complementar o abastecimento com poços; c) mitigar os conflitos entre a irrigação e abastecimento humano. Na qualidade da água observa-se que o problema já existente tenderá a se agravar e que as medidas de ajuste são aquelas necessárias mesmo que não ocorra impacto da modificação climática, ou seja o tratamento dos efluentes domésticos e industriais.

O cenário de duplicação do dióxido de carbono na atmosfera foi previsto por três modelos GCMs, sendo um deles com um cenário intermediário. Estes resultados foram obtidos em precipitações e temperaturas médias mensais, as quais foram utilizadas como entrada no modelo hidrológico precipitação-vazão. As vazões obtidas pela combinação dos modelos foram utilizadas para diferentes funções hidrológicas que foram regionalizadas para os diferentes cenários.

Os modelos apresentaram resultados contraditórios com relação as vazões médias e máximas, pois GISS indicou redução da vazão média (cerca de 9 a 14%) enquanto que GFDL e UKMO apresentaram aumentos (cerca de 14-33 e 5-21%, respectivamente). No que se refere as vazões mínimas todos os modelos indicaram redução de vazão, variando entre 2 e 20 %. Os modelos GISS e UKMO (Alto Uruguai) indicaram importante redução de vazões nos meses de abril e maio e todos os modelos sinalizaram redução em dezembro.

Em consequência da redução das vazões médias e mínimas, os impactos maiores sobre os recursos hídricos ocorreram no abastecimento de água, na irrigação e na qualidade da água. Aceitando o cenário do GISS poderá haver redução de geração da ordem de 5%, enquanto que com GFDL é previsto aumento de geração de 17%.

Convém ressaltar que os resultados obtidos neste estudo podem estar dentro da faixa de erro dos modelos utilizados, contudo deve-se considerar que toda a análise realizada é relativa e não absoluta. Estimados os impactos, mesmo de forma simplificada, a pergunta será: O que deve ser feito para que os impactos negativos sejam minimizados dentro dos

aspectos econômicos e sociais? Os resultados aqui obtidos devem ser encarados não como um elemento para decisão a curto prazo, mas como um alerta sobre o assunto e da importância de se ter em mente este tipo de impacto no planejamento de longo prazo. Considerando que a emissão de gases continuará, serão necessários razoáveis investimentos para reduzir o impacto destas condições no abastecimento de água e outros aproveitamentos. Na Argentina, Uruguai e Brasil, os problemas de desenvolvimento e planejamento são sérios e as dificuldades econômicas razoáveis. O impacto do clima é mais um dos problemas que poderia ser ignorado pelo planejador em face de tantas dificuldades. Contudo, esta pode ser uma estratégia muito perigosa e que poderá agravar as condições existentes e planejadas.

Este estudo apresenta uma metodologia que pode ser utilizada sempre que houverem estimativas mais confiáveis dos modelos GCMs, permitindo atualização da avaliação destes impactos. As principais recomendações são: a) Atualização deste estudo com base em saídas de modelos de mesoescala ou de estimativas atualizadas dos GCMs; b) Avaliar o impacto da modificação climática no sistema interligado de produção de energia brasileira, considerando que 92% da energia produzida no Brasil é dependente da disponibilidade hídrica; c) Considerar no planejamento da expansão dos sistemas hídricos a possibilidade da ocorrência deste impacto.

6. ESTUDOS ESTRATÉGICOS PARA O CENÁRIO BRASILEIRO

No capítulo anterior foram destacados diferentes aspectos nos quais os recursos hídricos podem sofrer alterações e fragilizar o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental dentro do cenário brasileiro relacionado com recursos hídricos. Neste capítulo são discutidos e apresentadas alternativas que podem ser desenvolvidas visando:

- melhor conhecer e entender os impactos potenciais das alterações climáticas e do uso do solo sobre os recursos hídricos, seus usos e conservação do ambiente;
- planejar potenciais medidas mitigadoras em associação com as ações existentes de gerenciamento dos recursos hídricos.

Para desenvolver estes objetivos são apresentados a seguir os estudos potenciais recomendados neste estudo.

Estimar os cenários de modificação climática

A avaliação dos impactos da potencial modificação climática sobre as diferentes áreas do território brasileiro praticamente não existem, com raros estudos realizados, como os citados nos capítulos anteriores. Atualmente existem diferentes GCMs (Modelos Globais climáticos) que produzem estimativas de variação do clima para os cenários futuros de duplicação do CO₂ ou tendências de acumulação de gases estufa na atmosfera, para todo o globo. Apesar de discutíveis, estas estimativas devem ser avaliadas sobre as diferentes bacias do território brasileiro e avaliados seus impactos.

Objetivo: estimar os cenários de modificação climática, de acordo com os cenários do IPCC e avaliar os efeitos sobre os usos dos recursos hídricos e medidas mitigadoras potenciais

Abrangência: Com base nas estimativas climáticas de todo o território brasileiro deve-se procurar analisar por amostragem o impacto sobre os recursos hídricos nas grandes bacias que dividem o território brasileiro.

Metodologia: A metodologia apresentada por Tucci e Damiani (1994) procura analisar este impacto e pode ser utilizada neste tipo de estudo. Os resultados de cada bacia podem ser discutidos através de workshops com decisores nas diferentes bacias.

Avaliação das tendências de longo prazo entre as séries hidroclimáticas

Desde 1970 as regiões Centro – Oeste, Sul e Sudeste apresentam vazão média cerca de 30% superior a do período anterior, o que significa que, para a mesma capacidade instalada, é possível gerar mais energia, com menor risco de falha. Isto tem permitido, ao longo do tempo, aumentar a energia firme das usinas (Muller et al., 1998; Galdino et al., 1997).

O aumento de vazões ocorre, pelo menos parcialmente, como consequência de um aumento simultâneo, mas menos intenso, das precipitações na mesma região do Brasil. Enquanto isto, algumas regiões na África, como a bacia do rio Congo e a região sub-sahariana experimentam um longo período menos úmido do que o anterior, e a redução das vazões.

Os processos que levam a alterações climáticas deste tipo, em regiões distintas, ainda são pouco explicados pelos climatologistas. Recentemente, têm surgido mais evidências de oscilações com período da ordem de poucas décadas em indicadores climáticos de grande escala e particularmente no Oceano Atlântico e com impacto no ciclo hidrológico em regiões vizinhas (Robertson and Mechoso, 1998). É importante observar que este tipo de *variabilidade climática* deve ser diferenciada da modificação climática provocada pelo aumento do efeito estufa e alterações de uso do solo. Nos últimos 60 anos ocorreram alguns períodos marcados por significativas anomalias climáticas. O primeiro período observado se estendeu de 1940 a 1970, quando ocorreram seqüências de El Niños de fraca intensidade e La Niñas de forte intensidade, e anomalias frias na temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico sul, o que indica períodos mais secos em parte das regiões da América do Sul. O segundo período se estende de 1970 até 2000, quando ocorreram El Niños mais intensos e La Niñas menos intensas e um significativo aumento da TSM no Atlântico.

Este comportamento somente poderia ser observado estatisticamente com séries suficientemente longas e tem passado sem ser considerado. Somente agora, com mais conhecimento sobre o clima, e com séries de dados hidrometeorológicos que se aproximam dos 100 anos, é possível observar estes processos.

Os métodos estatísticos geralmente utilizados para a detecção de tendências são geralmente de dois tipos. O primeiro método é a regressão linear, que envolve o ajuste de uma reta, ou curva, que relaciona vazão com tempo; na maneira geralmente utilizada, este método requer a adoção de suposições sobre as características estatísticas dos dados, que nem sempre são satisfeitas. O segundo método utilizado para a detecção de tendências é um teste “não-paramétrico” (tipicamente, o teste Mann-Kendall), que dispensa algumas das suposições implícitas no método de regressão linear, mas nem todas. Em particular, os dois métodos são baseados na suposição que as vazões registradas em anos sucessivos são independentes estatisticamente: isto é, a vazão no ano 2001 não tem qualquer relação registrada no ano 2000. Esta suposição é razoável no caso de pequenas bacias hidrográficas que tem pouco armazenamento de água. Mas a suposição não é verdade no caso de grandes bacias como as do Brasil, nas quais possa existir uma correlação entre as vazões em anos sucessivos, pelo fato de que a água que recarrega os grandes aquíferos de uma bacia em um ano muito úmido, pode ser liberada gradualmente através os anos seguintes.

Quando existe, a correlação entre vazões em anos consecutivos é positiva, no sentido de que se a vazão for muito alta em um dado ano por causa da precipitação alta, a vazão no seguinte ano também será maior do que “normal”. Esta característica pode ser confundida com a presença de uma tendência temporal, quando a tendência realmente não existe. Os dois métodos acima mencionados para detecção de tendências não levam em conta este fenômeno.

Os mesmos problemas de tendência podem ser avaliados no caso da precipitação, embora a atmosfera tenha memória menor do que uma bacia hidrográfica, então as suposições implícitas nos testes de regressão linear ou Mann-Kendall não apresentam problemas. Mas outros problemas se apresentam; por exemplo, é possível para o regime da precipitação mudar (em termos da intensidade das precipitações no período de chuvas e em termos de duração das estações secas e úmidas), sem estas mudanças aparecerem nos totais da precipitação mensal ou anual. Mudanças deste tipo têm sido notadas em seqüências da precipitação no Pantanal, na década 1970 (Collischonn et al., 2001).

As séries hidrológicas longas permitem analisar preliminarmente as tendências de longo prazo, principalmente as variabilidade interdecadais. Estas variabilidade são essenciais para caracterizar a estacionariedade das séries utilizadas no dimensionamento de obras hidráulicas e a sustentabilidade econômicas de diferentes projetos. Por exemplo, grande

parte das obras de drenagem das cidades brasileiras é projetada com base no Estudos de Chuvas Intensas de Otto Pfastteter desenvolvido em 1958!. Sabe-se hoje que o efeito térmico das superfícies urbanas (aumento de temperatura) criam condições para aumento da intensidade da precipitação pelos processo convectivos. Além disso, o período mais recente se mostrou mais recente. Portanto, poderia se esperar que os projetos que utilizam este estudo poderiam estar sub-dimensionados.

A análise de séries de precipitações e vazões e suas tendências de longo prazo com variáveis climáticas dos oceanos Pacífico e Atlântico e variáveis hidrológicas de outros continentes como da África pode permitir entender os processos e buscar identificar alguma capacidade de predibilidade de longo prazo.

Objetivos: desenvolver o entendimento e a predibilidade da variabilidade inter-decadal do comportamento hidrológico de grandes bacias brasileiras

Abrangência: séries de precipitação e de vazão com pelo menos 80 anos nas diferentes bacias do país.

Planejamento do espaço de risco de inundação

Observou-se no passado que grande parte da ocupação do espaço urbano em áreas de risco ocorreu devido a falta de avaliação dos espaços de risco. Isto ocorreu principalmente devido a períodos longos de vazões de cheias baixas que deu segurança a parte da população em ocupar as áreas de inundação. Em algumas comunidades isto provocou prejuízos significativos comprometendo a sua economia.

Além disso, o desenvolvimento urbano tem produzido novos condicionamentos urbanos e alteração nos condicionantes climáticos locais que não estão sendo avaliados.

Objetivos: analisar os condicionantes de riscos produzidos pelas séries hidrológicas e climáticas relacionados com a ocupação de espaço urbano e rural.

Abrangência: Estudar a alteração das estatísticas das séries das precipitações intensas depois da década de 70 na região Sudeste e Sul; verificar a tendência de alteração das séries de precipitações nas áreas urbanas com relação ao aumento da urbanização; desenvolver análise de tendência de risco por amostragem nas grandes bacias brasileiras.

Impacto da variabilidade hidrológica e da modificação climática sobre os setor elétrico e sua adaptabilidade

O sistema de produção energético brasileiro tem grande dependência hídrica. Mesmo com a planejada diversificação com termoeletricas a gás, ao longo da próxima década o sistema dependerá em, aproximadamente, 80% da energia hidrelétrica. Desta forma, este sistema é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazo, para a produção de energia firme e, portanto, da garantida de atendimento do sistema. O sistema foi projetado com base na probabilidade de falha estimada através do uso de séries históricas de vazão que iniciaram em 1930 e incorporam mais informações anualmente.

Apesar do sistema hidrelétrico apresentar uma grande interligação energética, o que reduz o risco de falha do sistema como um todo, grande parte do conjunto de usinas hidrelétricas está localizado na região Sudeste, o que concentra o risco de falha do ponto de vista espacial, porque as diversas usinas estão sujeitas a variabilidades climáticas simultâneas.

Objetivo: Quantificar o impacto da variabilidade hidrológica e da modificação climática sobre o sistema hidrelétrico brasileiro e potenciais medidas mitigadoras

Abrangência: Examinar os efeitos das alterações das séries hidrológicas sobre o sistema energético para os principais sistemas do país, considerando a sua complementaridade hídrica.

Previsão de Vazão

A previsão da vazão a curto e a longo prazo são mecanismos importantes para mitigação dos impactos devido a variabilidade climática e a modificação climática. A experiência e o uso de previsão no Brasil é ainda muito limitado. Existe a necessidade de desenvolvimento de ferramentas e elementos que permita ampliar o uso destas técnicas dentro dos diferentes cenários de sustentabilidade hídrica.

Objetivos: desenvolver a previsão de curto e longo prazo para minimizar o impacto dos eventos críticos e o planejamento de setores energético e agrícola.

Abrangência: desenvolver modelos climáticos e hidrológicos para previsão: (a) em tempo real em algumas bacias críticas, associado ao sistema atual de monitoramento em tempo real; (b) previsão de longo prazo para formação de preço energético e medidas de prevenção e para umidade do solo e plantio agrícola.

Avaliação do impacto do uso do solo sobre bacias e biomas brasileiros

Como discutido ao longo de documento, existem grandes impactos do uso do solo sobre o comportamento hídrico. As dificuldades tem sido de quantificar este processo em bacias maior porte devido a combinação complexa de ações que ocorrem na mesma. No entanto, mesmo existindo modelos, é necessário conhecer o comportamento destes sistemas para de forma adequada representar os processos nos mesmos.

Objetivos: avaliação do efeito do uso do solo nas bacias de grande porte em alguns biomas brasileiros

Abrangência: desenvolver metodologia de simulação e coleta de dados para estimativa adequada do comportamento de macrobacias em face do impacto do uso do solo; A análise pode ser realizada por amostragem em dois sistemas onde os condicionamentos são mais críticos.

Avaliação do balanço de carbono dos sistemas naturais brasileiros

Uma das principais variáveis do processo de negociação internacional relacionado com o efeito estufa é a absorção e emissão de carbono pelo ambiente. A contabilização destes elementos no Brasil ainda precária por falta de coleta de informações nos diferentes sistemas brasileiros. Considerando que nas próximas décadas estes elementos terão importante peso na negociação sobre o processo de controle do efeito das modificação climática é necessário desde já desenvolver um programa de conhecimento desta variável dentro do território brasileiro visando obter dados quantitativos que subsidiem a negociação internacional.

Objetivos : programa Quantificação de absorção e emissão de gases do efeito estufa dentro dos sistemas brasileiros

Abrangência: criar um programa sistemático de medida das emissões e absorção que seja representativo das condições do país.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2001. Apresentação do diretor geral da ANEEL na comissão de infra-estrutura do Senado Federal, junho de 2001.
- ANDERSON R J, DA FRANCA RIBEIRO N e DIAZ H F 1993. An Analysis of Flooding in the Paraná-Paraguay River Basin. The World Bank :Washington.
- ANON, 1996 Stormy weather ahead. *The Economist*. 23 de março 1996.
- BENOIST, G. 1989. *Les études d'ondes de submersion des grands barrages d'EDF*. La Houille Blanche. No.1 p.43-54.
- BARNOLA, J.M.;RAYNAUD, D.; KOROTKEVICH, Y.S.; LORIUS, C. 1987. Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature* 329:408-414.
- BARROS, V; CASTANEDA, M.E.; DOYLE, M. (1995) Recent Precipitation Trends in Southern South America to the East of the Andes: An Introduction of a Mode of Climatic Variability. In: *Proceedings of Latin American Workshop on Greenhouse Gas Emission of Energy Sector and their impacts*: COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- BARROS, V. R.; DOYLE, M.; 1997: Interannual variability of Precipitation in Southern South America. *Fifth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Pretoria, South Africa, MAS*, 228-229.
- BERTONI , J.C.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T., 1992. Rainfall-based real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 131 (1992) 313-339
- BLACKIE J R 1993. The water balance of the Balquhiddy catchments. *J. Hydrology* 145: 239-57.
- BORG H, BELL R W e LOH I C 1988. Streamflow and stream salinity in a small water supply catchment in southwest Australia after afforestation. *J. Hydrology* 103: 323-33.
- BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration *Journal of Hydrology* 55: 2-23.
- BROWN, C. A; GRAHAM, W.J. 1988. Assessing the threat to life from dam failure. *Water Resources Bulletin* Vol.24 N. 6 p 1303-1309 December.
- BRUIJNZEEL, L.A., 1990. *Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review*. IHP. IAHS. UNESCO.224p.
- BRUIJNZEEL, L.A. 1996. Predicting the hydrological impacts of tropical forest conversion: The need for integrated research. Capítulo 2 de “Amazonian Deforestation and Climate” Eds: Gash J H C, Nobre C A, Roberts J M e Victoria R L John Wiley & Co: Chichester, Inglaterra.
- BRUN, G.W. ; TUCCI, C.E.M. 2001. Previsão em Tempo Real do Volume Afluente ao reservatório de Ernestina. RBRH. V6 n.2 Abr/Jun.p73-80
- BURCH G J, BATH R K, MOORE I D e O'LOUGHLIN E M 1987. Comparative hydrological behaviour of forested and cleared catchments in southeastern Australia. *J. Hydrology* 90 19-42.
- CANALI, G.E., 1981. *Produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais. Efeito das características das chuvas, da declividade das vertentes e do uso do solo*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. 239p.

- CARDOSO, A. O.; SILVA DIAS, P. L., COLLISCHONN, W E TUCCI, C.E.M., 2001: O papel dos Oceanos Atlântico e Pacífico no Regime Sazonal de Vazão de Rios na Bacia do Uruguai. IV Encontro das Águas, Foz do Iguaçu.
- CNEC, 1983. *Diagnóstico e Planejamento da utilização dos recursos hídricos*. DNAEE/CNEC. 2 vols.
- COLLISCHONN, W. 2001. Simulações hidrológica em Grandes bacias. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS.
- COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C.E.M. 2001. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. *RBRH* V6 N.1 95-118
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R. T., 2001. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology* 245 (2001) 218-238.
- CORNISH, P.M., 1993. The effects of logging and Forest Regeneration on Water Yield in Moist Eucalpt Forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, V150, N2/4, p301-322.
- DIAMOND, J. 1997. Armas, Germes e Aço o destino das sociedades humanas. Record 472p.
- DIAS, A.; NORTCLIFF, S., 1985. Effects of tractor passes on the physical properties of an Oxisol in the Brazilian Amazon. *Tropical Agriculture* 62: 202-212.
- DICKINSON, R. E. E HENDERSON-SELLERS, A., 1988. Modelling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parametrizations. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 114: 439-462
- EDWARDS, K.A., 1979. The water balance of the Mbeya experimental catchments. *East African Agricultural and Forestry Journal*, 43, 231-247.
- ELETOBRAS, 1995. *Análise dos documentos: "Reavaliação do Potencial Energético em Itaipu - Apresentação para a Eletrobras"*. Eletrobras. janeiro.
- GALDINO, S.; CLARKE, R. T.; PADOVANI, C.R.; SORIANO, B. M. A.; VIEIRA, L. M. 1997 Evolução do regime hidrológico na planície do baixo curso do rio Taquari – Pantanal. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vitória ES.
- HAMILTON, S.K. SIPPEL, S.J.; MELACK, J.M., 1995. Innundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave Remote Sensing. *Hydrobiologie*, January
- HODNETT M G, DA SILVA L P, DA ROCHA H R e SENNA R C 1995. Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *J. Hydrol.* **170**, 233-254.
- HORNBECK, J.W; ADAMS, M.B.; CORBETT, E.S.; VERRY, E.S.; LYNCH, J.A., 1993 Long-term impacts of forest treatments on water yield: A Summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology* 150 p323-344.
- HSIA e KOH 1983. Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan. in; *Hydrology of Humid Tropical Regions*, Keller, R. (ed.) IAHS publication n. 140, p215-220
- IGBP, 1993. *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle*. The International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Change, Report n.27. Estocolmo, 103p.
- IPCC(2001 a) Summary for policymakers. A Report of working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC(2001 b) Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. A Report of Working Group II of Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ILLICH, R.,1996. *Análise Comparativa de Métodos de Avaliação da Evaporação e Evapotranspiração para o Estado do Paraná*. Mestrado de Engenharia Hidráulica e Hidrologia- CEHPAR.
- ITAIPU, 1995. *Estudo Preliminar de reavaliação do potencial Hidro-energético*, Itaipu Binacional, agosto.
- JENNE R 1989. Data from Climate Models: the CO2 warming. Draft report.
- JICA, 1995. *The master study on utilisation of water resources in Parana State in the Federative Republic of Brazil*. Sectoral Report vol H- Flood Control.

- JOHNSON, R.C., 1991. *Effects of Upland Afforestation on Water Resources: The Balquhiddy Experiment 1981-1991*. Institute of Hydrology, Report N.116. 73p.
- JORDAN, C.F., 1985. *Nutrient Cycling in tropical forest ecosystems*. J. Wiley, New York.
- KITANIDIS, P.K.; BRAS, R.L., 1978. Real Time forecasting of river flow., Department of Civil Engineering, Cambridge, Rep. No 235. Massachusetts Institute of Technology.
- KRONER M., 1990. *A erosão do solo de 1952 a 1985 e seu controle no Paraná* Londrina. IAPAR Boletim técnico n. 30. 53p.
- LAL, R., 1981 Deforestation of tropical rainforest and hydrological problems. in: *Tropical Agricultural Hydrology*, R. Lal e E. W. Russell (eds.) J. Wiley, New York, 131-140
- LANNA, A.E., 1991. Avaliação dos possíveis impactos do efeito estufa nos recursos hídricos da bacia do rio Uruguai. *Workshop Analysis of Potential Climate Change in the Uruguay River Basin*. IPH, setembro/1991.
- LARAQUE, A.; MAHÉ, G.; ORANGE, D.; MARIEU, B. 2001 Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *Journal of Hydrology* Vol. 245 pp. 104-117.
- LAVABRE, J., TORRES, D.S., and CERNESSON, F., 1993. Changes in Hydrological response of a small Mediterranean basin a year after wildfire. *J. Hydrol.*, 150:323-344.
- LAVE, L.B. RESENDIZ-CARRILLO, D. McMICHAEL, f.c., 1990. Safety goals for high-hazard dams: are dams too safe? *Water Resources*, V. 26 n. 7., p 1383-1391, July.
- LAWSON, T.L.; LAL, R.; ODURO-AFRIYE, K., 1981. Rainfall Redistribution and microclimatic changes over a cleared watershed. In: *Tropical Agricultural Hydrology*, R. Lal & E. W. Russell (eds) J. Wiley, New York, 141-151.
- MADDUMA BANDARA, C.M.; KURUPPUARACHI, T.A., 1988. Land use change and hydrological trends in the upper Mahaweli basin. paper presented at the Workshop on Hydrology of Natural and Man-made Forests in the Hill Country of Sri Lanka, Kandy, outubro, 18p.
- MARENGO, H.M. 1996. Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol XI, N.2 p.65-77
- McCULLOCH, J.S.G.; ROBINSON, M., 1993. History of forest hydrology *Journal of Hydrology*, 150: 189-216.
- MINE, M., 1998. *Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias*. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS.
- MOOLEY, D.A.; PARTHASARATHY, B., 1983 Droughts and floods over India in Summer monsoon seasons 1871-1980 in: *Variation in Global Water Budget*, A. Street-Perrott et al. (eds) R. Reidel Dordrecht, The Netherlands 239-252p.
- MÜLLER F ; VON BORSTEL SUGAI M R 1995. Uma análise de tendência no regime de vazões e precipitações para o estado do Paraná. Anais: XI Simpósio da Associação Brasileira de Recursos Hídricos Recife.
- MULLER, I. I.; KRUGER, C.M.; KAVISKI, 1998. Análise da Estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *RBRH* V 3 n. 4 outubro.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10:282-290
- PAIVA E M C DE e CLARKE R T 1995. Time trends in rainfall records in Amazonia. *Bull. American Met. Soc.*, novembro 1995.
- PAIVA E M C DE e CLARKE R T 1996. Análise de tendência de precipitação da Amazônia. *Bull. Ass. Brasileira de Meteorologia* (aceito para publicação).
- PARCHEN, C. A.P.; BRAGAGNOLO, N. 1991. *A erosão e Conservação de solos no Paraná*, EMATER-PR 16p.
- PATÉ-CORNELL, M.E.; TAGARAS, G. 1986. Risk costs for new dams.: Economic analysis and effects of monitoring. *Water Resources Research*, V22 N.1 p 5-14 January.
- PRITCHETT, W.L., 1979. *Properties and Management of Forest Soils*. John Wiley, New York, 500p.

- ROBERTSON, A. W. ; MECHOSO, C. R.; 1998: Interannual and decadal cycles in river flows oh southeastern South America. *J. Climate*, 11: (10), 2570 –2581.
- ROBERTSON, A. W. ; MECHOSO, C. R.; 2000: Interannual and interdecadal variability of the South Atlantic Convergence Zone. *Mon.Wea.Rev.*, 128, 2947 –2957.
- ROBINSON M 1993. Impacts of plantation forestry on streamflow regimes - a case study. Em: Proc. 4th National Hydrology Symposium, Cardiff. 13-16 September 1993. British Hydrological Society, London, pp 2.41-2.45.
- ROBINSON M, GANNON B, e SCHUCH M 1991. A comparison of the hydrology of moorland under natural conditions, agricultural use and forestry. *Hydrol. Sci. J.*, 36 565-77.
- RUPRECHT J K e SCHOFIELD N J 1989. Analysis of streamflow generation following deforestation in southwest Western Australia. *J. Hydrology* 105 1-17.
- RUPRECHT, J K, SCHOFIELD N J, CROMBIE D S, VERTESSY R A e STONEMAN G L 1991. Early hydrological responseto intense forest thinning in South-Western Australia. *J. Hydrology* 127 261-77.
- SAHIN, M. J.; HALL, M.J., 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields *Journal of Hydrology* 1178 293-309.
- SAMARAJ P, SAHARDA V N e CINNAMANI S 1988. Hydrological behaviour of the Nilgiri sub-watersheds as affected by Bluegum plantation. Part I. Th annual water balance. *J. Hydrology* 103 335--45.
- SCOTT D F 1993. The hydrological effects of fire in south African mountain catchments. *J. Hydrology* 150 409-32.
- SERAFIM, J.L. 1981. Safety of Dams judged from failures. *Water Power and Dam Construction Sutton* V.33 n.12 p.32-35 December
- SMITH, J.B.; TIRPAK, D. 1989 The Potencial Effects of Global Climate Change on the United States. US Environmental Protection Agency, dezembro.
- SHUTTLEWORTH, W.J.; GASH, J.H.C.;ROBERTS, J.; NOBRE,C.A.; MOLION, L.C.B. 1990. Post-deforestation Amazonian Climate: Anglo-Brazilian Reasearch to improve prediction. Seminar on Hydrology and Water Management of The Amazon Basin, Manaus 5-9 de agosto 1990.
- SILVEIRA, CARLOS A C.; GUERRA, HÉLVIO N. 2001. A crise Energética e o monitoramento de reservatórios hidrelétricos. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Aracaju.
- STONEMAN, G.L. 1993. Hydrological Response to Thinning a Small Jarrah (*Eucalytus Marginata*) Forest Catchment. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, V.150, N.2/4, P.393-408.
- THEMAG, 1994a. *Verificação das Metodologias para Montagem do BDH-ELETROBRAS*, Themag Engenharia, Itaipu Binacional
- THEMAG, 1994b. *Calibração do modelo hidrológico e geração de séries de vazões*. Themag Engenharia, Itaipu Binacional.
- TROENDE C A e KING R M 1987. The effects of partial and clearcutting on streamflow at Deedhorse Creek, colorado USA. *J. Hydrology* 90 145-57.
- TUCCI, C.E.M. 1978. *Hydraulic and Water quality simulation in a river network*. PhD dissertation Civil Engineer Department Colorado Statr University. Fort Collins Co.
- TUCCI, C.E.M., 1996. *Estudos Hidrológicos e Hidrodinâmicos do rio Iguaçu na RMC*, COMEC, Relatório técnico.
- TUCCI, C.E.M. 1998. Modelos Hidrológicos. ABRH 652p.
- TUCCI, C.E.M.2000. *Desafios em Recursos Hídricos em Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais* cap15., MCT, PADCT, PNUMA.
- TUCCI, C.E.M.2002. Gerenciamento da Drenagem Urbana. RBRH V 7 N.1 março.
- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. 1980. Adaptive forecasting with a conceptual rainfall-runoff model. *Hydrological Forecasting. Proc. Oxford Symp., IAHS* n.129 pp425-454

- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T., 1995 *Análise dos Estudos Hidrológicos da Reavaliação do Potencial Hidroenergético de Itaipu*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS e Itaipu Binacional. março. 36p.
- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; 1998. Environmental Issues in the La Plata Basin. Water Resources Development Vo. 14 N.2 p 157-173.
- TUCCI, C.E.M. e DAMIANI, A., 1994. Potenciais Modificações Climáticas no rio Uruguai, RBE, Caderno de Recursos Hídricos, vol. 12. n.2, junho.
- TUCCI, C.E.M.; GENZ, F.; 1996 *Comportamento Hidrológico*. in: Hidrossedimentologia do Alto Rio PARAGUAY, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, FEMA/MT Fundação do Meio Ambiente do Mato Grosso, SEMA, Secretaria do Meio Ambiente do Mato Grosso do Sul, Ministério do Meio Ambiente.
- TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO, O. 2000. *Cenários da Gestão da Água no Brasil: uma contribuição à visão da água no Brasil*. RBRH V5 N.3.
- TUCCI, C.E.M.; DIAS, P.S.; CLARKE, R.T.; COLLISCHONN, W. 2001. Previsão de médio prazo de vazões afluentes a reservatórios no rio Uruguai. IPH/IAG/ANEEL 150 p.
- TUCCI, C.E.M.; VILLANUEVA, A , 1997. Controle de enchentes das cidades de união da Vitória e Porto União. CORPRERI, 117 p.
- VILLANUEVA; ZAMANILLO, ED.; TUCCI, C.E.M 1987. Previsão de Vazão para Irrigação. VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Anais Vol 1 p536-549.
- VÖRÖSMARTY, C.J. ; MOORE, B.; GRACE, A.; PETERSON, B.J.; RSTETTER, E.B.; MELILLO, J. 1991. Distributed parameter models to analyse the impact of human disturbance of the surface hydrology of a large tropical drainage basin in southern Africa, in: Hydrology for the Water Management of Large River Basins F.H.M. Van de Ven, D. Gutnecht, D. P. Loucks and K.A. Salewicz (eds), IAHS Publ. 201.
- WARK, J. B. ; SLADE, J.E. RAMSBOTTOM, D. M., 1991. *Flood Discharge Assessment by the Lateral Distribution Method*. Report SR 277, Dez 1991. Hydraulics Research Wallingford