

CONCEITOS FILOSÓFICOS SOBRE INCERTEZAS ASSOCIADAS A MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E ECOLÓGICA

Luciana Sarmiento¹ & Sergio Koide²

RESUMO --- No artigo são discutidas questões que envolvem a avaliação de desempenho de modelos aplicados a gestão ambiental e de recursos hídricos. O desempenho de um modelo é fortemente afetado pela existência de incertezas estocásticas e epistemológicas. São apresentadas as fontes dessas incertezas, as quais influenciam de forma não linear a simulação. Uma das assertivas discutidas é que um modelo é uma teoria acerca de um sistema específico e, nessa perspectiva, é discutido o método científico hipotético-dedutivo que sustenta a modelagem. Verifica-se que os princípios desse método são utilizados na construção do *software* para modelagem que contém em seu código computacional as equações gerais necessárias ao desenvolvimento de um modelo para um sistema específico. Faz-se uma discussão das idéias correntes sobre a impropriedade do uso dos termos validação e verificação como sinônimos da excelência do desempenho do modelo. Verifica-se que a abordagem *soft* é a mais indicada quando se trata de uso de modelos como ferramenta de suporte a tomada de decisão. O artigo também aborda as ferramentas para confirmação de modelos.

ABSTRACT ---In this paper some questions about the performance analysis of water resources and environmental modeling are discussed. The model performance is strongly affected by stochastic and epistemic uncertainties. The sources of these uncertainties are presented, which influence the simulation in a no linear way. One of the statement discussed here is that one model is a theory about a specific system, in this perspective, is discussed the hypothetic-deductive scientific method, which support modeling. It is verified that the principles of the method are used in the building of *software* for modeling. In computational code there are general equations necessary to the development of a specific system model. Some ideas about the validation and verification terms used like synonyms of excellent performance of a model are showed. The soft approach is more indicated when the models results are applied as a tool for decision making. These article also treat about model confirmation tools.

Palavras-chave: modelagem, validação, verificação, incertezas.

1) Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas – ANA, Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. SQN 215, Bloco G, apto 402, Brasília, DF, 70874-070. e-mail: lucianasarmiento@unb.br.

2) Professor Adjunto da Universidade de Brasília. Brasília/DF. e-mail:skoide@unb.br.

1 - INTRODUÇÃO

A principal vantagem do uso de modelos está na capacidade que eles possuem de organizar, sintetizar e apresentar informações baseadas em conhecimento científico e hipóteses (Saloranta, 2005).

Os modelos, uma vez calibrados, são ferramentas integradoras de dados possibilitando a reprodução dos valores medidos e também a interpolação e extrapolação das informações no espaço e no tempo.

Contudo, as facilidades proporcionadas pelos modelos são cercadas de limites que devem ser considerados pelo usuário, em especial, quando se pretende usar os valores resultantes da modelagem para a tomada de decisão.

Essa idéia, embora recorrentemente destacada na literatura, parece não estar muito clara para alguns usuários que tratam os modelos como uma expressão verossímil dos processos que estão sendo modelados.

Muitos autores têm discutido a influência das incertezas originadas dos processos aleatórios e também da carência de conhecimento do sistema que se quer modelar nos resultados simulados pelo modelo. O jargão usado na modelagem de bacias hidrográficas, que tem nos termos Verificação e Validação sinônimos da excelência dos resultados do modelo, tem sido criticado uma vez que esses termos sugerem, para a comunidade em geral, uma capacidade de reproduzir fielmente os processos que estão sendo modelados quando, de fato, isso não é verdadeiro.

Algumas assertivas são discutidas ao longo do artigo buscando reunir algumas idéias sobre a aplicabilidade e o desempenho de modelos de bacias hidrográficas.

2 - MODELOS COMO REPRESENTAÇÕES DA REALIDADE

Várias são as definições para modelos encontradas na literatura. Chapra (1997), por exemplo, define modelo como uma formulação idealizada que representa as respostas do sistema aos estímulos externos. Viessman e Lewis (2003), por sua vez, conceituam modelo como um conjunto de equações e algoritmos que descreve o sistema real e imita o comportamento do sistema.

O que há em comum nessas e em outras definições é que um modelo se constitui numa aproximação do mundo real, isso quer dizer que, de modo algum os modelos são a expressão verossímil dos processos que estão sendo modelados. A simulação do comportamento do sistema dada pelo modelo é tanto mais útil e tanto mais próxima da realidade quanto melhor for o conhecimento dos limites e do alcance dessa simulação.

O modo de garantir que a simulação seja, de fato, próxima da realidade é submeter o modelo à confirmação, caso contrário corre-se o risco de obter resultados inúteis. Confirmar um modelo é, portanto, estabelecer a sua robustez (Chapra, 1997).

Instrumentos necessários à confirmação, a calibração, a análise de sensibilidade e a análise de incerteza são as ferramentas que se dispõe para avaliar e aprimorar o desempenho de um modelo.

Apesar de parecer óbvio, é comum observar relatos de experiências de aplicação de modelos hidrológicos para predição de situações reais sem o necessário emprego de ferramentas de confirmação e avaliação do desempenho do modelo. Na maioria dos casos, o modelo é submetido apenas à calibração.

Mesmo após a calibração há muitas razões, segundo afirmam Nicklow e Muleta (2005), para o modelador avaliar os resultados simulados. Os autores sugerem que cada esforço de modelagem seja acompanhado também de uma análise de incerteza com o objetivo de se determinar os intervalos de confiança das predições do modelo, levando em conta as várias fontes de incerteza.

3 - INCERTEZA NOS RESULTADOS DOS MODELOS

3.1 – INCERTEZA GERADA PELA MODELAGEM

Os resultados simulados por um modelo estão sujeitos à propagação não linear das incertezas oriundas dos valores estocásticos e da insuficiência de conhecimento do comportamento do sistema. Essa não linearidade pode ser exemplificada pelo fato de que os resultados de uma simulação, em que os parâmetros são tomados como valores médios, por exemplo, não são, necessariamente, representativos do comportamento médio do ecossistema em estudo, isto é, as incertezas nos valores de entrada do modelo raramente se transferem linearmente para a saída (Hofer, 1998).

Nas boas práticas de modelagem a vizinhança de valores assumidos como dados de entrada e como parâmetros deve ser considerada e o intervalo correspondente de valores simulados com base nessas suposições deve ser identificado. Isso possibilita que se tenha como resultado da simulação, ao invés de valores singulares, uma distribuição de valores para a predição de interesse.

3.2 – TAXONOMIA DAS INCERTEZAS

Correntemente são adotadas duas classes de incertezas relacionadas a modelagem de fenômenos naturais. Uma delas é denominada Incerteza Estocástica e a outra Incerteza Epistemológica (CGER, 2000; Beck, 1987). Outros termos sinônimos podem ser encontrados na literatura conforme quadro 1.

Quadro 1: Taxonomia das incertezas e termos sinônimos encontrados na literatura

Tipos de Incertezas	Termos Sinônimos
Incertezas Estocásticas	Incerteza aleatória
	Incerteza Externa
	Incerteza Objetiva
Incertezas Epistemológicas	Incerteza do conhecimento
	Incerteza interna
	Incerteza subjetiva
	Incerteza funcional

Fonte: adaptado de CGER (2000)

A Incerteza Estocástica é devida à variabilidade inerente aos processos naturais. Na área de recursos hídricos, as incertezas relacionadas à variabilidade natural advém, por exemplo, da vazão, cujos valores são variáveis no tempo, e da rugosidade, cujos valores são variáveis no espaço.

As incertezas estocásticas têm sua gênese na heterogeneidade espacial e temporal do sistema. O desenvolvimento de teorias científicas que incorporem adequadamente essa heterogeneidade nos modelos teóricos e computacionais é um dos principais desafios que essa área de conhecimento vem enfrentando.

Os modelos adotam valores médios para representar a heterogeneidade espacial. O meio para diminuir as incertezas decorrentes dessa assunção é maximizar a discretização espacial o que significa acréscimo de coleta, preparação e processamento dos dados. O incremento na complexidade do modelo significa, evidentemente, aumento nos custos associados, o que pode tornar proibitivo o seu uso. Esse problema em particular pode ser reduzido maximizando-se a qualidade e representatividade dos dados históricos utilizados.

A Incerteza Epistemológica é devida, por um lado, à insuficiência de conhecimento dos eventos e processos que determinam o fenômeno em estudo, e por outro, às inferências que normalmente se fazem em relação àqueles dados não disponíveis, mas necessários para a modelagem do fenômeno.

As incertezas epistemológicas incluem as incertezas associadas aos parâmetros, dados de entrada e à formulação matemática do modelo.

Os valores dos parâmetros são adotados na modelagem com base em inferência a partir da literatura ou da expertise técnica. As incertezas surgem se essa inferência for inapropriada. É bem

verdade que no processo de calibração outras incertezas podem ser adicionadas, a depender da função objetivo escolhida para a resolução do problema inverso.

Os dados de entrada no modelo contribuem com incertezas pela possibilidade de existirem erros de medição, adoção de conjuntos de dados heterogêneos e inconsistentes, manipulação e transcrição errônea dos dados e de a amostragem não ser representativa do sistema.

As incertezas resultantes das limitações da estrutura do modelo em representar o sistema decorrem dos erros derivados da assunção, *a priori*, de que o modelo é capaz de descrever adequadamente o comportamento do sistema natural.

A observação e o entendimento da natureza do sistema que se quer estudar são dificultadas pela freqüente inexistência de dados que possam permitir essa análise. A qualidade da simulação depende, particularmente, das características das formulações e da capacidade do modelo de representar os processos envolvidos. Devido a isso, um dos mais importantes requisitos para a redução das incertezas é a estruturação adequada do modelo para que represente os principais processos envolvidos na simulação. Para isso, é fundamental o conhecimento do sistema natural pelo modelador, pois, os erros estruturais no modelo resultam, principalmente, da inadequada descrição ou falha em levar em conta processos relevantes.

As incertezas epistemológicas podem ser reduzidas, o que não pode ser feito com as incertezas estocásticas. Para a consecução da redução das incertezas epistemológicas é necessário incrementar o conhecimento do fenômeno que se quer simular, contudo, cada sistema é peculiar e o conhecimento dos seus fenômenos intrínsecos requer significativo dispêndio financeiro, o que nem sempre é possível.

Com base nas informações obtidas na literatura (James, 1997; van der Perk *et al.*, 1997; Tucci, 1998; CGER, 2000) foi construída a Figura 1 que apresenta a taxonomia e as principais fontes das incertezas discutidas anteriormente.

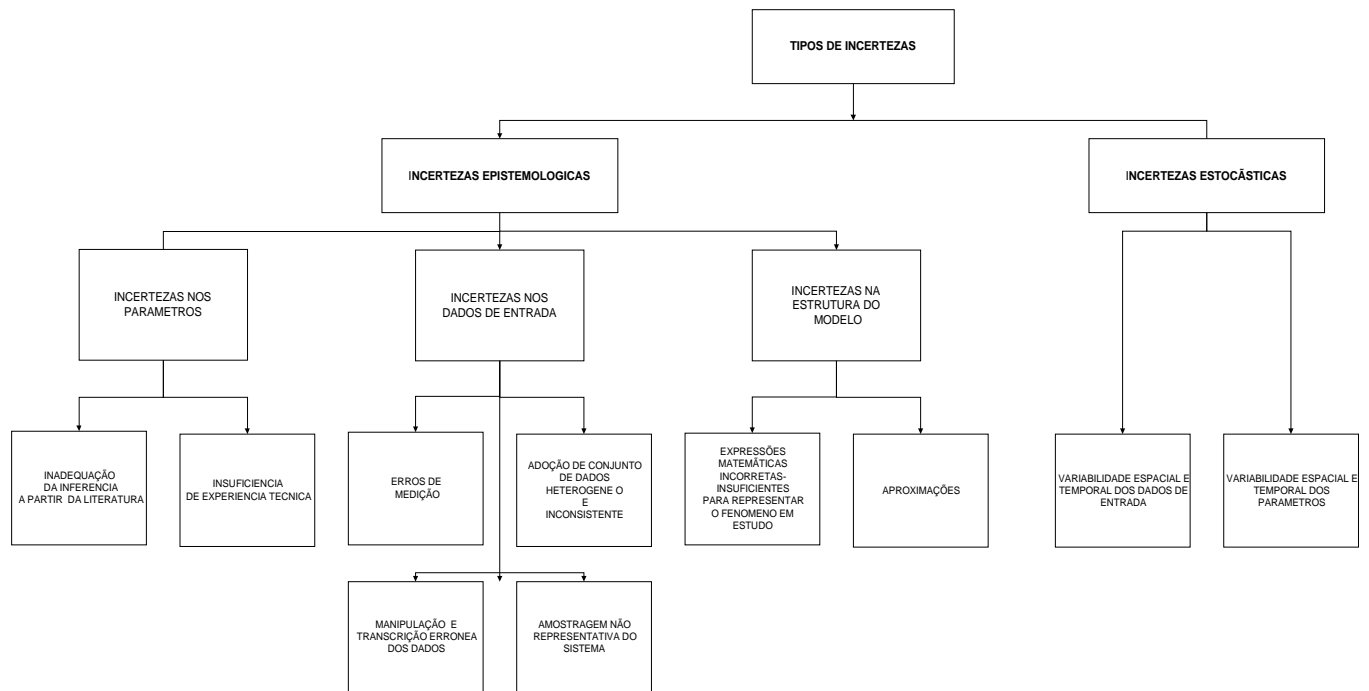


Figura 1 - Taxonomia das incertezas em modelos hidrológicos e suas principais fontes

4 - A NATUREZA TEÓRICA DOS MODELOS

4.1 – MÉTODO CIENTÍFICO UTILIZADO NA MODELAGEM

Os modelos têm como objetivo maior reproduzir as observações da realidade e prever o comportamento futuro do sistema. Para isso, hipóteses e leis gerais acerca dessas observações são desenvolvidas sob forma de equações. Essas últimas, por sua vez, fundamentam os códigos computacionais que estruturam o modelo.

A linha metodológica adotada na modelagem tem fundamento na noção de ciência como uma atividade hipotético-dedutiva, na qual as observações empíricas são retratadas como uma consequência dedutiva de uma teoria geral ou lei científica. Fazendo um contraponto: o *software* usado para a modelagem contém as equações gerais e o arcabouço teórico (hipóteses) para construir o modelo de um sistema específico (dedução).

Nessa abordagem metodológica as hipóteses que fundamentam o modelo podem ser submetidas à verificação, onde se busca confirmar se a teoria explica os fenômenos do mundo real,

ou à refutação, quando se investiga se há observações que falseiam a teoria proposta. A abordagem hipotético-dedutiva é um dos pilares da ciência positivista.

A confirmação das teorias científicas por meio do verificacionismo supõe que as afirmações empíricas adquirem um significado verdadeiro ou falso se puderem ser verificadas em condições ideais de investigação (Silva, 2006). No "princípio da verificabilidade" o significado de uma proposição está relacionado diretamente aos dados empíricos que resultam de sua observação e que, uma vez existentes, dão veracidade à proposição, caso contrário, mostram que ela é falsa. Assim, toda proposição que, a princípio, pode ser transformada em "enunciados protocolares", só tem significado se for verificada empiricamente (Barreto, 2006).

Segundo o que propõe o princípio da refutabilidade, desenvolvido por Popper (1994), se as observações da realidade são reproduzidas pelos modelos, então a teoria ou lei hipoteticamente proposta é confirmada por aquelas observações e permanece aceita até quando a experiência e as observações do mundo real permitam provar a sua falsidade. Esse processo de confronto da teoria com as observações poderá provar a falsidade da teoria em análise. Nesse caso, elimina-se essa teoria que se provou falsa e procura-se uma outra teoria para explicar o fenômeno em análise. Essas idéias formam a base da escola filosófica popperiana que defende que as teorias científicas não podem ser validadas, apenas refutadas (Popper, 1994).

Segundo Popper (1994), quanto maior o número e a diversidade das informações que confirmam o modelo, mais provável é que a teoria envolvida não é falha. Entretanto, segundo afirma Oreskes *et al.* (1994), a confirmação das observações não demonstra a veracidade do modelo ou da hipótese, ela apenas cria o suporte para a sua probabilidade. Isto porque não importa quantos dados estão disponíveis, há sempre a possibilidade de que mais de uma teoria possa explicar as observações realizadas e também que uma observação futura possa refutar essa teoria.

Isso é facilmente constatável na modelagem: a calibração possibilita a determinação de um modelo apropriado para o sistema que se quer simular, entretanto, há vários conjuntos de valores de parâmetros que permitem, igualmente, o ajuste da simulação aos dados observados em campo, portanto, se deduz que vários modelos (teorias) poderiam representar o sistema modelado.

O princípio da verificação é bastante usual na modelagem de bacias hidrográficas, isto é, busca-se determinar um modelo que se ajuste aos dados observados em campo.

4.2 – VALIDAÇÃO E VERIFICAÇÃO: TERMOS IMPRÓPRIOS

Na modelagem de bacias hidrográficas usam-se, correntemente, os termos verificar e validar o modelo.

A etapa de validação consiste, costumeiramente, em etapa subsequente à calibração, utilizando-se dados de campo adicionais para examinar o comportamento do modelo (Viessman e Lewis, 2003). Esse método é conhecido como separação de amostras (*split sample*) e é conduzido usando-se parte dos dados do conjunto disponível para calibrar o modelo e a outra parte para avaliar a calibração (Klemes, 1986; Mroczkowski *et al.*, 1997). A verificação é entendida, em geral, como a etapa em que se comparam o desempenho do código computacional e suas soluções numéricas frente à solução analítica possível para as equações que compõem o modelo (Martin e Mutcherson, 1998).

Contudo, severas críticas quanto ao significado atribuído a esses termos na área da engenharia hidrológica são encontradas na literatura (Beven, 1993; Chapra, 1997; Oreskes *et al.*, 1994; Konikow e Bredehoeft, 1992). Esses pesquisadores, adeptos da escola filosófica popperiana e atentos para os aspectos epistemológicos, contestam a possibilidade de validar e tampouco verificar os modelos hidrológicos (Xiong e O'Connor, 2000).

Oreskes *et al.* (1994) afirmam que dizer que um modelo está verificado significa, em termos epistemológicos, assumir que a veracidade dos resultados foi demonstrada. Já em relação à validação, expressam que, diferentemente da verificação que denota o estabelecimento da verdade, a validação significa que o modelo é legítimo, isto é, que ele não é contradito por ações ou evidências.

Vários são os motivos pelos quais alguns autores não admitem o uso do termo validação para denotar a confirmação de modelos. Oreskes *et al.* (1994) criticam a aplicação do termo validação por ele sugerir que o modelo é uma representação acurada dos processos físicos.

Os pesquisadores afirmam, ainda, que o alcance do ajuste dos resultados simulados com os medidos não garante a validade do modelo por si só em face da inexistência de singularidade em relação ao conjunto de valores dos parâmetros usado para a calibração do modelo. Para Oreskes *et al.* (1994) quando conseguimos um ajuste entre dados simulados por um modelo e dados observados, conseguimos também um dilema: mais de uma construção do modelo pode produzir a mesma saída. Os cientistas se referem a isso como não-unicidade (*nonuniqueness*).

A idéia da não-unicidade da calibração, isto é, que diferentes conjuntos de valores dos parâmetros, e não apenas um único conjunto ótimo, podem prover, igualmente, simulações aceitáveis para um determinado sistema, sustenta a tese da equifinalidade (Beven, 1992; Beven, 1993; Beven, 2005). Isso quer dizer que essas várias possibilidades de se representar um mesmo sistema e, por conseguinte, que várias teorias podem explicar uma mesma observação da realidade, devem ser consideradas, pois elas agregam incertezas às predições do modelo (Aronica *et al.*, 1998; Zak *et al.*, 1999; Beven *et al.*, 2001). Se isso acontece, isto é, se vários conjuntos de parâmetros

podem permitir a construção de vários modelos que representam a realidade, qual deles representa o verdadeiro? Qual deles é válido?

Outra discussão proposta por Oreskes *et al.* (1994) é que mesmo quando o modelo é consistente com dados presentes e passados observados, não há garantia alguma de que a mesma coisa acontece em relação ao futuro. Primeiro, porque pode haver pequenos erros nos dados de entrada que não impactem o ajuste do modelo com os dados históricos disponíveis, mas que em relação a um espaço de tempo maior possam significar maiores desvios. Segundo, porque um ajuste entre os resultados do modelo e os dados presentes não é garantia de que futuramente as condições serão similares, pois os sistemas naturais são dinâmicos e podem se alterar em modos que dificilmente podem ser ponderados.

As críticas relatadas acima sugerem que, as técnicas de validação e verificação se constituem no melhor dos casos uma confirmação, com todas as limitações que esse termo sugere. Segundo os autores uma linguagem neutra é necessária para denominar a avaliação do desempenho do modelo.

Por outro lado, há que se ressaltar que pode ser feita uma distinção entre o modelo conceitual, o código computacional do modelo e o modelo aplicado a um sistema específico. Feita essa distinção, Refsgaard e Henriksen (2004) propõem que ao modelo conceitual aplicam-se as idéias de refutabilidade, conforme discutido por Oreskes *et al.* (1994). No entanto, tanto o código computacional quanto os resultados do *software* para modelagem aplicado a um sistema específico, podem ser, respectivamente, verificado e validado. Os autores defendem que o código computacional pode ser verificado dentro de intervalos de aplicabilidade e de acurácia, mas nunca verificado universalmente. Similarmente, a validade de uma simulação será sempre limitada em termos de espaço, tempo, condições de contorno e tipos de aplicação (Refsgaard e Henriksen, 2004).

Haag e Kaupenjohann (2001) afirmam que a abordagem sistêmica dinâmica que caracteriza os modelos é conceitualmente definida segundo um sistema fechado que requer um determinado conjunto de valores dos parâmetros definido *a priori*, parte dos quais, são parâmetros convenientemente escolhidos para atender aos requisitos teóricos do modelo além de parâmetros sem significado físico. Além disso, ecossistemas que se automodificam produzem, novos parâmetros e nenhum sistema dinâmico consegue lidar com a produção temporal de variáveis.

Por outro lado, a simplificação das assunções são muito usadas na modelagem. É o que sucede em relação aos modelos de qualidade da água por razões relacionadas a facilitar seu desenvolvimento e aplicação. Mahamah (1998), por exemplo, discutiu a assunção da mistura completa na modelagem da qualidade da água e sua criticidade para a performance do modelo.

Konikow e Bredehoeft (1992) argumentam que, no processo de verificação, a comparação entre soluções analíticas e numéricas é improcedente uma vez que as últimas, usadas para solucionar as equações diferenciais que constituem a maior parte dos modelos hidrológicos, não levam em consideração as simplificações que são adotadas na resolução analítica dessas equações. Para Oreskes *et al.* (1994) a congruência entre soluções analíticas e numéricas nada diz a respeito da correspondência com a realidade. Para eles esse procedimento deveria ser referido, mais apropriadamente, como *benchmarking* (teste de desempenho).

Embora comungue da idéias de Oreskes *et al.* (1994), Silberstein (2006) admite que há na área de engenharia um sentido próprio em relação ao termo validação que se refere a demonstração de que o modelo reproduz observações, isto é, que o termo validação implica somente que as observações experimentais concordam com os resultados do modelo, contrariando o conceito do termo adotado na filosofia da ciência.

Na intenção de propor uma solução para o dilema que se construiu em relação ao termo validação, Refsgaard e Henriksen (2004) sugerem que a validação do modelo deve ser sempre restrita ao espaço, tempo, condições de contorno e tipos de aplicação. Para o autor, a validação não é um procedimento para testar teorias científicas ou para certificar a veracidade do conhecimento científico corrente, pelo contrário, é um teste que permite apenas verificar se um modelo é aceitável para o uso ao qual foi aplicado.

Já Chapra (1997) utiliza o termo confirmação em substituição aos termos verificação e validação e afirma que o objetivo do processo de confirmação é estabelecer a robustez do modelo.

5 – O USO DOS MODELOS NA GESTÃO AMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS

Muitas decisões relacionadas à gestão ambiental e de recursos hídricos, tomadas com base em modelos, cuja expertise e embasamento científico acreditam-se serem sólidos, geram surpresas quando as previsões desses modelos não se aproximam da realidade (Harremões, 2003). Esse tipo de problema ocorre, mormentemente, quando há desconhecimento ou ainda, o que é mais grave, quando não se consideram as limitações que cercam o modelo.

Conforme aponta van der Sluijs (2002), um desses limites é a natureza do modelo que é carregada de juízo de valor. A construção de um *software* para modelagem envolve escolhas subjetivas e isso, freqüentemente, permanece implícito, pois estão ocultas nos códigos computacionais, na documentação científica do modelo ou nas idéias dos modeladores.

Haag e Kaupenjohann (2001) também são da opinião de que a modelagem é, em grande medida, um procedimento subjetivo pois suas etapas requerem julgamento e decisão. Em síntese, as seleções empregadas na construção de um modelo são sujeitas à crítica precisamente pelo fato de que elas são opções, isto é, de que existem outras alternativas possíveis.

Outra limitação sublinhada por Haag e Kaupenjohann (2001) diz respeito ao fato de que os modeladores selecionam, de acordo com sua própria noção de relevância, os fenômenos e valores dos parâmetros do modelo, ignorando outras perspectivas acerca do que se quer modelar. Acrescentam a isso que, convencionalmente, os modelos seguem uma razão puramente técnica. E são, ainda, opacos a olhares externos, quer sejam de outros cientistas quer sejam do público não especialista.

Haag e Kaupenjohann (2001) acrescentam que muitos parâmetros são de conveniência, fabricados para as necessidades da teoria. Então os parâmetros, freqüentemente, perdem o sentido físico e a referência com a realidade.

Poluição em larga escala, gestão de bacias hidrográficas e mudanças climáticas são assuntos complexos, pois reúnem, além da dimensão física, as dimensões social, política, ambiental, legal e suas interações. Quando modelos de simulação são usados para dar suporte à gestão e à tomada de decisão nessas áreas, eles enfrentam desafios que diferem, consideravelmente, dos que são abordados, com sucesso, na perspectiva da ciência normal positivista.

Para van der Sluijs (2006) não importa quão bem sucedida tenha sido a ciência normal positivista, ela encontra limites quando a sociedade é confrontada com a necessidade de resolver aspectos políticos transdisciplinares relacionados ao risco ambiental de caráter transnacional e transgeracional.

A ciência normal positivista relaciona os fenômenos observados a princípios que permitem combinar as observações isoladas. Ela investiga os fenômenos buscando suas relações constantes de concomitância e sucessão, isto é, suas leis. Baseia-se, portanto, na construção de uma hipótese e conseqüente dedução. Quer dizer, seu método prevê a observação dos fatos, procurando racionalizá-los e descobrir as relações constantes entre os fenômenos observados (Souza, 1995).

Kuhn (2003) caracterizou a ciência normal positivista como um tipo de pesquisa que é direcionada à resolução de quebra-cabeças, nos moldes e diretrizes estabelecidos pelo paradigma vigente. Os problemas científicos transformam-se em *puzzles*, enigmas com um número limitado de peças que o cientista - qual jogador de xadrez - vai pacientemente movendo até encontrar a solução final. Aliás, a solução final, tal como no enigma, é conhecida antecipadamente, apenas se desconhecendo os pormenores do seu conteúdo e do processo para atingi-la.

Num contexto em que muitas decisões concernentes às políticas públicas dependem fortemente do conhecimento científico, os tomadores de decisão estão direta e constantemente

envolvidos com a expertise técnica para adquirir as competências cognitivas necessárias. Não obstante, Tallacchini (2005) observa que os experts não são mais os porta-vozes de conhecimento neutro ou do conhecimento unanimemente aceito entre a comunidade científica. Eles formam, na verdade, uma parte do processo de decisão político-científica.

Ravetz (2004) afirma que quando políticas ambientais e de saúde envolvendo ciência são debatidos, em lugar de fatos, têm-se incertezas. Diferentes formas de incerteza, entre elas a incerteza epistemológica, estão no cerne da tomada de decisão nas áreas de proteção ambiental.

O princípio da precaução tem sido acionado em situações em que a incerteza, a ignorância e a indeterminação dominam as relações de causa e efeito (Harremões, 2003).

Esse princípio foi introduzido em 1992 pelo Princípio 15 da Declaração do Meio Ambiente e Desenvolvimento - Eco 92: “Para que o ambiente seja protegido, serão aplicadas pelos Estados, de acordo com as suas capacidades, medidas preventivas. Onde existam ameaças de riscos sérios ou irreversíveis não será utilizada a falta de certeza científica total como razão para o adiamento de medidas eficazes em termos de custo para evitar a degradação ambiental”.

A principal ferramenta do princípio da precaução é, certamente, o elemento preventivo que pode ser invocado até em relação à prevenção de um perigo apenas potencial. No princípio da precaução há a antecipação, no julgamento político, da presença de sinais de causalidade mesmo na ausência de elementos causais precisos. Isso, no entendimento de Tallacchini (2005), faz com que o Princípio da Precaução liberte a lei da submissão à ciência fazendo com que se trabalhe numa posição crítica, proativa. Haag e Kaupenjohann (2001) complementam que o princípio da precaução é uma ação adiantada à prova científica.

Conforme van der Sluijs (2006), o princípio da precaução é uma estratégia para lidar com as incertezas científicas na análise e gestão dos riscos. Ao contrário de prover uma solução predeterminada para cada problema, o princípio da precaução prevê critérios para determinar o mais razoável curso de ação no confronto com situações de risco potencial.

A precaução difere da prevenção uma vez que esta é relacionada com riscos conhecidos e para os quais existe um modo creditável para quantificar a sua probabilidade.

Para Haag e Kaupenjohann (2001) o princípio da precaução tem quatro dimensões: (a) perigo (b) incerteza (c) ação e (d) comando e pode ser resumido de acordo com o seguinte “se houver um perigo, que pode ser incerto, então, algum tipo de ação é imperativa”.

Tallacchini (2005) argumenta que quando a ciência tem que lidar diretamente com políticas públicas, seus propósitos devem ser diferentes da ciência pura ou da ciência aplicada. A ciência pura é guiada, principalmente, pela curiosidade científica, já a ciência aplicada é guiada por um projeto e seu objetivo é alcançar soluções particulares.

Novas formas de produção do conhecimento, tais como o conceito de ciência pós-normal (Haag e Kaupenjohann, 2001), em conjunção com o princípio da precaução, muda a autoridade estabelecida da ciência e pode levar a uma separação institucional do método científico em um ramo acadêmico e um ramo gerencial, este último relacionado às políticas públicas.

Van der Sluijs (2002) comenta que a ciência pós-normal é uma estratégia para lidar com o problema em que não há o estabelecimento da verdade final ou da resolução final do quebra-cabeça científico. Isso porque quando se considera que as incertezas científicas são altas e o suporte à decisão necessário, tal objetivo, em princípio, é inalcançável e indesejável.

A consequência mais inovadora de aceitar os aspectos filosóficos da ciência Pós-normal é o reconhecimento de que, em tais casos, o discurso científico e técnico não é mais restrito às comunidades de expertises, mas necessita do envolvimento de não especialistas, *e.g.* tomadores de decisão e cidadãos.

Conforme Ravetz (2004) a abordagem pós-normal propõe uma mudança nos dogmas centrais do método científico normal positivista, que supõe perfeita objetividade e certeza. A ciência pós-normal é transdisciplinar, participativa e sensível ao contexto em que objetiva produzir conhecimento para os problemas concretos do mundo real (Haag e Kaupenjohann, 2001).

De acordo com Haag e Kaupenjohann (2001) se os conhecimentos científicos são usados para o suporte à tomada de decisão, a ciência deve deixar os confinamentos da academia e se tornar ciência gerencial, não mais distante da sociedade.

Correspondentemente, a modelagem para propósitos científicos teóricos e a modelagem para a tomada de decisão podem seguir separadamente. A modelagem para a tomada de decisão deve levar em conta requerimentos de transparência e participação. Os produtos do modelo podem ser julgados de acordo com a capacidade de eles proverem conhecimento sensível ao contexto para decisão de problemas específicos.

Conforme propõem Haag e Kaupenjohann (2001), os modelos de simulação são ferramentas heurísticas, especialmente quando aplicados academicamente, que, quando usadas convenientemente, podem permitir descobertas em relação aos processos naturais, isto é, os modelos têm valor teórico. Nesses casos, eles podem ser usados, por exemplo, para revelar propriedades dos ecossistemas e para examinar diferentes teorias ecológicas.

Segundo Haag e Kaupenjohann (2001) para o propósito de fornecer suporte à tomada de decisão, os modelos devem ser mais transparentes, isto é, a estruturação, a escolha e a avaliação de modelos devem envolver também a observação da comunidade e dos tomadores de decisão.

Para van der Sluijs (2006) os tomadores de decisão podem contribuir para a modelagem de formas variadas, isso inclui o fornecimento de informações sobre condições locais que podem determinar quais dados são importantes e relevantes ou, ainda, qual resposta é mais adequada, além

da provisão de observações pessoais do risco e seus efeitos. Desse modo, o discurso técnico e científico pode se beneficiar da inclusão do conhecimento não especializado e da experiência e perspectivas dos tomadores de decisão em relação ao problema em mãos.

Segundo van der Sluijs (2002) a participação de diversos grupos e indivíduos proverá informação essencial e discernimento acerca dos riscos ambientais. A participação da comunidade também é essencial para o exame, consideração e avaliação dos valores sociais, políticos e éticos que não podem ser endereçados somente por técnicas analíticas, mas que requerem a deliberação participativa externa.

Nessa linha que defende a utilização de modelos mais transparentes para os tomadores de decisão e para a comunidade, que poderiam ser chamadas caixas brancas, por analogia contrária a idéia dos modelos caixa preta, também está Pidd (1996), que defende uma abordagem heurística para a aplicação dos modelos.

Para Pidd (1996) a interpretação de uma modelagem pode ser enquadrada, conforme suas características, na abordagem dita *soft* e naquela dita *hard*, essa normalmente adotada pela expertise tecnológica. A idéia principal da abordagem *soft* é levar as interpretações pessoais da modelagem ao escrutínio público.

O quadro a seguir mostra um contraponto entre as abordagens *hard* e *soft*.

Quadro 2: Comparação entre a abordagem *soft* e a *hard*

	Abordagem <i>hard</i>	Abordagem <i>soft</i>
Definição do problema	Visto como direto, unitário	Visto como problemático, pluralístico
A organização	Tomada como certa	Tem que ser negociada
O modelo	Uma representação do mundo real	Um modo de gerar debate e critério acerca do mundo real
Saídas do modelo	Produto ou recomendação	Progresso por meio do conhecimento

Fonte: Pidd (1996)

6 – FERRAMENTAS PARA CONFIRMAÇÃO DE MODELOS

A confirmação de modelos vai além das práticas conhecidas, equivocadamente como se viu, como verificação e validação. Aliás, as críticas se referem aos termos utilizados, cujos significados não correspondem aos resultados obtidos pelas técnicas que representam, e não propriamente às técnicas *per si*. O processo de confirmação inclui ferramentas como a calibração, a análise de

sensibilidade e a análise de incerteza. As duas últimas são, ainda, pouco utilizadas nas práticas correntes de modelagem.

A calibração tem papel preponderante na modelagem, pois permite a identificação dos diferentes conjuntos de valores dos parâmetros que podem representar o sistema em estudo. A calibração é uma ferramenta que possibilita, ainda, a redução dos erros na modelagem proporcionando o aumento do grau de confiabilidade dos resultados.

A análise de sensibilidade é o estudo de como a variação na simulação pode ser atribuída, qualitativa e quantitativamente, as diferentes fontes de variação nas assunções iniciais. A análise de sensibilidade é, então, proximamente relacionada à análise de incerteza que objetiva quantificar a incerteza propagada para as simulações a partir das incertezas na entrada do modelo.

A análise de sensibilidade possibilita critérios objetivos de julgamento do desempenho de um modelo. A análise de incerteza permite que se verifique o intervalo de resultados possíveis e não apenas um único. Tanto a análise de incerteza quanto a análise de sensibilidade contribuem, portanto, para a transparência da modelagem.

Por outro lado, há uma estreita relação entre a análise de sensibilidade e a análise de incerteza. Isto porque a análise de sensibilidade pretende determinar a relação entre as incertezas existentes nos valores dos parâmetros e as incertezas nos resultados simulados.

A análise de incerteza e a de sensibilidade devem ser realizadas interativamente, com os objetivos de corroborar a modelagem, mostrar que os elementos ignorados não são relevantes, como também, proporcionar diretrizes para a pesquisa, *eg*, identificar quais fatores devem ser melhor analisados ou medidos.

Essas ferramentas permitem verificar, por exemplo, que o intervalo de resultados simulados oferecido pelo modelo é tão largo que não é adequado para ser usado na tomada de decisão. Nesse caso a Análise de Sensibilidade pode oferecer apoio na identificação daquelas assunções de entrada que influem mais fortemente e que se constituem, portanto, em ponto de partida para uma melhor análise com o objetivo de reduzir a incerteza nos resultados modelados.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há muito que avançar na área de conhecimento relacionada ao meio ambiente. Muitos processos não são suficientemente conhecidos e sua teorização e equacionamento ainda estão por ser construídos. A qualidade dos modelos hidrológicos e ecológicos está intrinsecamente ligada ao incremento do conhecimento dos fenômenos que regem os processos hidrológicos e ecológicos. O grande desafio não mais reside na construção de modelos e sim no seu aperfeiçoamento, principalmente, no que concerne ao aprofundamento do conhecimento e na redução de incertezas.

A incorporação de módulos de análise de sensibilidade e de incertezas aos *softwares* para modelagem é imperiosa haja vista as incertezas que cercam a modelagem. Isso permite, não somente, maior controle das simulações, mas o avanço do conhecimento dos fenômenos naturais que estão sendo modelados.

Os conceitos que foram expostos advertem quanto à necessidade de se verificar a robustez do modelo antes de aplicar seus resultados na tomada de decisão. O uso de modelos na gestão ambiental e de recursos hídricos deve ser umas das ferramentas existentes a se utilizar, jamais isoladamente. O uso de simulações realizadas por modelos que foram unicamente calibrados deve ser evitado, pois é notória a forte necessidade de tornar a confirmação de modelos uma prática, principalmente, para aqueles que utilizam os modelos no suporte às tomadas de decisão na gestão ambiental e de recursos hídricos.

Além disso, é requisito fundamental o esclarecimento das limitações de um modelo e a inclusão dos tomadores de decisão nas demandas subjetivas existentes no processo de modelagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARONICA, G. H., B. E BEVEN, K. 1998. "Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data". *Advances in water resources*. Vol. 22. No. 4. p. 349-365.
- BARRETO, T.V. 2006. "Positivismo, Positivismos. Da tradição francesa ao Positivismo Instrumental". Disponível em [Http://www.dca.fee.unicamp.br/~gudwin/ftp/ia005/Positivismo.doc](http://www.dca.fee.unicamp.br/~gudwin/ftp/ia005/Positivismo.doc)
- BECK, M.B. 1987. "Water Quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research*". 23 (8), 1393-1442.
- BEVEN, K. 1993. "Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling". *Advances in Water Resources*. Vol. 16. p.41-51.
- BEVEN, K. 2005. "A manifesto for the equifinality thesis". *Journal of Hydrology*. Vol. 20. p. 1-19.
- BEVEN, K. E BINLEY, A. 1992. *The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction*". *Hidrologycal Processes*. Vol. 6. p.279-298.
- BEVEN, K. E FREER, J. 2001. "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology". *Journal of Hydrology*. Vol. 294. p. 11-29.
- CGER - Commission on Geosciences, Environment, and Resources 2000. "Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies. Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction" .*Water Science and Technology Board. American National Research Council. National Academy Press. Washington, D.C.* Disponível em <<http://www.nap.edu>>.
- CHAPRA, S. C. 1997. "Surface water quality modeling". McGraw-Hill. New York.

- HAAG, D. e KAUPENJOHANN, M. 2001. Parameters, prediction, post-normal science and the precautionary principle – a roadmap for modelling for decision-making”. *Ecological Modelling*. Vol. 144. p. 45-60.
- HARREMOËS, P. 2003. “Ethical aspects of scientific uncertainty in environmental analysis and decision making”. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 11, pp 705-712.
- HOFER, E. “Sensitivity analysis in the context of uncertainty analysis for computationally intensive models”. 1999. *Computer Physics Communications*. Vol. 117. pp 21-34.
- JAMES, WILLIAM. 1997. “Rules for Reliable Modelling Optimal Complexity, Reliability, Error Analysis, Parameter Optimization, Accuracy And Sensitivity Analysis For Large-Scale, Long-Term, Continuous, Deterministic Surface Water Quality Modelling”. Disponível em <http://www.eos.uoguelph.ca/webfiles/wjames/homepage/Research/R184Pweb.html>.
- KLEMES, V. 1986. “Dilettantism in Hydrology: Transition or Destiny?” *Water. Resour. Res.*, 22:177S-188S,.
- KONIKOW, L.F. E BREDEHOEFT, J. D. 1992. Ground-water models cannot be validated. *Advances in Water Resources*”. Vol. 15. p.75-83.
- KUHN, T. 2003. “A estrutura das revoluções científicas”. 7.^a ed. São Paulo: Perspectiva.
- MAHAMAH, D. S. 1998. “Simplifying assumptions in water quality modeling. *Ecological Modelling*.” Vol. 109, pp 295-300.
- MARTIN, J. L. E MCCUTCHEON, S. C. 1998. “Hydrodynamics and transport for water quality modeling”. Lewis Publishers. CRC Press. Florida.
- MROCKOWSKI, M., G. P. RAPER, AND G. KUCZERA,. 1997. “The quest for more powerful validation of conceptual catchment models”. *Water. Resour. Res.*, 33:2325-2335,.
- NICKLOW, J.W., MULETA, M.K. 2005. “Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model”. *Journal of Hydrology*. Volume 306, pp. 127-145.
- ORESKE, N., SHRADER-FRECHETTE, K., BELITZ, K. 1994. Verification, validation and confirmation of numerical models in the earth sciences”. *Science*. Vol. 263, pp. 641-646.
- PIDD, M. 1996. “Tools for Thinking: modeling in management science”. Ed. John Willey and Sons. England.
- POPPER, K.R. (1994). “Conjecturas e Refutações”. Tradução de Sérgio Bath. Brasília: Editora Universidade de Brasília. 3a edição.
- RAVETZ, J. 2004. “The post-normal science of precaution”. *Futures*. Vol. 36. p.347-357.
- REFSGAARD, J. C. E HENRIKSEN, H. J. 2004. “Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*”. Vol. 27, pp. 71-82.

- SALORANTA, T. M. "Highlighting the model code selection and application process in policy-relevant water quality modeling". *Ecological Modelling*, In Press, Corrected Proof, Disponível online em 06 de dezembro de 2005.
- SILBERSTEIN, R. P. Hydrological.2006. "Models are so good, do we still need data?" *Environmental Modelling & Software*. Vol. 21 pp. 1340-1352.
- SILVA, A. R. 2006. "A história da Ciência Cognitiva". Disponível em <http://www.geocities.com/discursus/textos/000427.html>.
- SOUZA, S. M. R. 1995. "Um outro olhar: filosofia". São Paulo, FTD.
- TALLACCHINI, M. 2005. "Before and beyond the precautionary principle: epistemology of uncertainty in science and law". *Toxicology and applied pharmacology* . Vol. 207. pp S645-S651.
- TUCCI, C.E.M. 1998. "Modelos Hidrológicos". Porto Alegre: Editora Universidade. UFRGS/ABRH.
- VAN DER PERK, M. "The identifiability of parameters in a water quality model of the Biebrza River, Poland". *Journal of Hydrology*. Vol. 200. 1997. pp. 307-322.
- VAN DER SLUIJS, J. P. 2002. "A way out of the credibility crisis of models used in integrated environmental assessment". *Futures*. Vol.34. p. 133-146.
- VAN DER SLUIJS, J. P. 2006. "Uncertainty and precaution in environmental management: insights from Uncertainty and Precaution in Environmental Modeling Conference". *Environmental Modeling and Software*.
- VISSMAN JR., W., LEWIS, G. L. 2003. "Introduction to Hydrology". Prentice Hall. New Jersey
- XIONG, L. E O'CONNOR, K.M. 2000. "Analysis of the response surface of the objective function by the optimum parameter curve: how good can the optimum parameter values be?" *Journal of Hydrology*.. Vol. 234. p.187-207.
- ZAK, S. K. E BEVEN, K. 1999. "Equifinality, sensitivity and predictive uncertainty in the estimation of critical loads". *The Science of the total environment* vol. 236. pp. 191-214.