

Roberto José Amorim Rufino Fernandes

*Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade
Hídrica em Regiões Semi-Áridas*

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2002

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA
Área de Concentração: Recursos Hídricos

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade
Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Rubem La Laina Porto

São Paulo

Abril, 2002

À minha mãe Teresinha e minha esposa Josélia. Sem vocês este trabalho não existiria.

Ao povo piauiense, que este seja um dos muitos tijolos que farão o Piauí tão grande quanto nós merecemos.

AGRADECIMENTOS

Tantas pessoas contribuíram direta, ou indiretamente para este “parto”, que talvez seja este capítulo o mais difícil de ser escrito. Não por causa do orgulho, mas pelo temor de não honrar com as palavras e a memória, o merecido reconhecimento a todos os que me ajudaram. Desta forma, peço imensas desculpas àqueles que não figurarem nas linhas seguintes. Vocês podem não estar no papel, mas estarão sempre no meu coração.

Em primeiríssimo lugar agradeço a **Deus**, não porque seja Todo-Poderoso e Onipotente, mas porque para mim sempre foi mais que um Pai, dando-me graciosamente sempre mais do que eu merecia.

Obrigado **Josélia**, minha esposa e eterna companheira, pelo incentivo primeiro e por ter aceito sem pestanejar todos os momentos de renúncia provocados por este trabalho. Obrigado pela cobrança, pela resignação e o apoio constante. Com certeza você é a autora principal deste dissertação. A você meu amor e admiração.

Agradeço à minha mãe, **Teresinha Rufino**, pelo amor e sacrifício com que se dedicou aos seus filhos, abrindo mão de tudo para dar a educação e o bem estar para todos. Dona Teresinha, com certeza este trabalho é muito mais seu do que meu. Te amo, mãe!

Agradeço à minha família, em especial minhas irmãs **Márcia, Edna, Júlia e Marta**. O que seria de nós sem uma família a nos dar apoio?

Agradeço ao Professor **Rubem Porto**, por sua orientação, confiança, amizade e, sobretudo, por sua paciência. Da mesma forma, agradeço o apoio imprescindível da Professora **Monica Porto** durante todo o mestrado.

Agradeço a todos os mestres que se esforçaram na luta quase inglória de formar pessoas num país que tão pouco dignifica seus professores. Obrigado por sua dedicação e afinho. Em especial, gostaria de agradecer aos Professores **Kamel Zahed Filho** e **Ricardo Hirata** pelas importantíssimas considerações realizadas ao longo da elaboração deste trabalho.

Um agradecimento especial à **Artemária**, companheira de longas jornadas, que aturou a minha impaciência. Como ela mesmo disse: “a convivência diária nem sempre é fácil”.

Meus sinceros agradecimentos à **Margarita López**, pela troca de experiências e pela enorme paciência em revisar e criticar este trabalho. Valeu “Doutora”.

Agradeço a todos os colegas que fiz em São Paulo, em especial à “galera” do LABSID: **Mirléia, Alexandre, Honório, Cristiano** e **André**. Muito obrigado pela convivência e companheirismo, coisas tão difíceis de se encontrar numa cidade tão grande e árida como São Paulo.

Agradecimentos especiais a **Vicente da Silva Moreira Filho**, pelo incentivo constante (e também pelo meu primeiro emprego), e aos doutores **Ronald Napoleão** e **Marcelo Napoleão**, sócios-proprietários da **ESCALA**, pelo apoio e pela confiança irrestrita.

Agradeço ao pessoal do Departamento de Engenharia Hidráulica da POLI, em especial ao meu conterrâneo **Odorico, Satie** e **Ricardo**. Obrigado por tudo.

Agradeço a todos os meus colegas, em especial aos grandes amigos que mesmo distantes nunca ficam ausentes, dentre eles **Helder, Mara, Willame, Wilsom** e **Fernando**.

Agradeço, finalmente, à **CAPES** pela bolsa de mestrado a mim concedida. Não era uma fortuna, mas foi suficiente para a gestação deste trabalho.

SUMÁRIO

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>i</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>ii</i>
<i>RESUMO</i>	<i>iv</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>v</i>
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Escopo	2
1.2 – Organização do Trabalho	4
2 - METODOLOGIA	6
2.1 – Avaliação das Demandas	9
2.1.1 – Demandas Concentradas	9
2.1.1.1 – <i>Abastecimento Urbano</i>	<i>10</i>
2.1.1.2 – <i>Consumo Industrial</i>	<i>11</i>
2.1.2 – Consumo Animal	12
2.1.3 – Demanda para Abastecimento da População Rural	13
2.1.4 – Demanda para Irrigação	14
2.1.4.1 – <i>Necessidades Hídricas das Culturas</i>	<i>14</i>
2.1.4.2 – <i>Precipitação Provável</i>	<i>17</i>
2.1.5 – Demanda Ecológica	21
2.2 – Avaliação da Disponibilidade Hídrica	22
2.2.1 – Determinação da Vazão Regularizada	22
2.2.1.1 – <i>Modelo de Geração de Séries de Vazões</i>	<i>24</i>
2.2.1.2 – <i>Modelo de Simulação de Reservatórios</i>	<i>31</i>
2.2.2 – Disponibilidade das Águas Subterrâneas	32
2.2.2.1 – <i>O Modelo SMAP Diário Modificado</i>	<i>34</i>

2.2.2.2 – A Equação do Escoamento do SCS	37
2.2.2.3 – Parâmetros do Modelo de Recarga	39
2.2.2.4 – Resumo do Modelo Adotado	39
2.2.2.4 – O Método da SUDENE/ORSTOM	40
2.2.2.5 – O Modelo de Geração de Precipitações Diárias	41
3 – VALIDAÇÃO DOS MODELOS	49
3.1 – Modelo de Geração de Vazões	49
3.1.1 – Descrição da Pasta "Regularização.xls"	50
3.1.1.1 – Série Histórica	50
3.1.1.2 – Fragmentos	50
3.1.1.3 – Ajuste Normal	50
3.1.1.4 – Ajuste Log-Normal	51
3.1.1.5 – Ajuste Gama	52
3.1.1.6 – Gera Anual	52
3.1.1.7 – Fornecida	53
3.1.1.8 – Garantia	54
3.1.1.9 – Anual	54
3.1.1.10 – Curvas	54
3.1.2 – Validação	55
3.2 – Modelo de Geração de Precipitações Diárias	60
3.2.1 – Descrição da Pasta "MeroModif.xls"	61
3.2.1.1 – Parâmetros	61
3.2.1.2 – Resultados	62
3.2.1.3 – Gráficos	62
3.2.2 – Validação	63
4 – APLICAÇÃO DOS ÍNDICES	67
4.1 - Caracterização da Área em Estudo	68
4.1.1 - Localização	68
4.1.2 – Clima	68
4.1.2.1 – Temperatura	70
4.1.2.2 – Umidade Relativa do Ar	70
4.1.2.3 – Insolação	71
4.1.2.4 – Ventos	71

4.1.2.5 – Evaporação	72
4.1.2.6 – Precipitação	72
4.1.3 – Hidrografia	74
4.1.3.1 – Barragem Jenipapo	75
4.1.4 – Relevo	79
4.1.5 – Vegetação	79
4.1.6 - Geologia	80
4.1.6.1 - Situação Geológica	80
4.1.6.2 – Estratigrafia	82
4.1.7 - Hidrogeologia	85
4.1.7.1 - Aquífero Cabeças	85
4.1.7.2 - Aquitardo Pimenteiras	85
4.1.7.3 - Aquífero Serra Grande	86
4.1.8 - Solos	86
4.1.8.1 - Solos Irrigáveis	91
4.1.9 - Demografia	95
4.1.10 - Pecuária	96
4.1.11 - Agricultura	97
4.2 - Avaliação das Demandas	99
4.2.1 - Abastecimento Urbano	99
4.2.1.1 - Situação Atual	99
4.2.1.2 - Situação Futura	99
4.2.2 - Abastecimento Rural	100
4.2.2.1 - Situação Atual	100
4.2.2.2 - Situação Futura	101
4.2.3 - Abastecimento Industrial	101
4.2.3.1 - Situação Atual	101
4.2.3.2 - Situação Futura	101
4.2.4 - Abastecimento Animal	102
4.2.4.1 - Situação Atual	102
4.2.4.2 - Situação Futura	103
4.2.4 - Demanda para Irrigação	103
4.2.4.2 - Situação Futura	106
4.2.5 - Demanda Ecológica	106

4.3 - Potencialidade Hídrica	106
4.3 - Disponibilidade Hídrica	107
4.3.1 – <i>Disponibilidade Hídrica Superficial</i>	107
4.3.2 – <i>Disponibilidade Hídrica Subterrânea</i>	108
4.4 - Aplicação dos Índices de Sustentabilidade	111
4.4.1 – <i>Índice de Utilização da Disponibilidade - IUD</i>	111
4.4.2 – <i>Índice de Utilização da Potencialidade - IUP</i>	112
4.4.3 – <i>Índice de Ativação da Potencialidade - IAP</i>	112
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
5.1 – Conclusões	113
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	116
ANEXOS	118
ANEXO I – Valores de L₆₀₀ para as unidades de mapeamento pedológicos identificadas para o Piauí	119
ANEXO II – Código fonte das “macros” programadas em VBA	120
a) Pasta “Regulariza.xls”	120
b) Pasta “PrecDiaria.xls”	143
c) Pasta “Recarga.xls”	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 01 – Esquema do modelo SMAP diário.</i>	35
<i>Figura 03 - Exemplo da planilha "Gera Anual" com resultados</i>	53
<i>Figura 04 - Curvas de regularização para o rio Itaim em Santa Cruz</i>	56
<i>Figura 05 - Curvas de regularização para o rio Canindé em Francisco Ayres</i>	57
<i>Figura 06 - Curvas de regularização para o rio Piauí na Barragem Jenipapo</i>	57
<i>Figura 07 - Curvas de regularização para o rio Itaim em Santa Cruz com geração independente de vazões anuais</i>	58
<i>Figura 08 - Curvas de regularização para o rio Canindé em Francisco Ayres com geração independente de vazões anuais</i>	58
<i>Figura 09 - Curvas de regularização para o rio Piauí na Barragem Jenipapo com geração independente de vazões anuais</i>	59
<i>Figura 10 – Planilha do arquivo “PrecDiaria.xls” apresentando os parâmetros necessários para a geração de precipitações sintéticas a partir de dados históricos</i>	61
<i>Figura 11 – Exemplo da planilha “Parâmetros” da pasta “MeroModif.xls”</i>	62
<i>Figura 12 – Exemplo da planilha “Gráficos” da pasta “MeroModif.xls”</i>	63
<i>Figura 13 – Localização do município de São João do Piauí com relação ao estado</i>	69
<i>Figura 14 – Polígonos de Thiessen para o município de São João do Piauí</i>	73
<i>Figura 15 – Isoietas de precipitação média anual para o município de São João do Piauí</i>	75
<i>Figura 16 -Mapa hidrográfico do município de São João do Piauí</i>	76
<i>Figura 17 - Curvas cota x área e cota x volume do reservatório Jenipapo</i>	78
<i>Figura 18 -Mapa de vegetação do município de São João do Piauí</i>	81
<i>Figura 19 - Mapa geológico do município de São João do Piauí</i>	83
<i>Figura 20 - Mapa de solos do município de São João do Piauí</i>	88
<i>Figura 21 - Levantamento semi-detalhado dos solos irrigáveis no vale do rio Piauí em São João do Piauí</i>	93
<i>Figura 22 - Evolução da população urbana do município de São João do Piauí</i>	96

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 01 – Taxas per capita de consumo de água adotados pela CAGEPA</i>	10
<i>Tabela 02 – Consumo de água por unidade produzida</i>	12
<i>Tabela 03 - Propriedades físicas usuais dos solos segundo Israelsen & Hansen</i>	37
<i>Tabela 04 - Características principais observadas e obtidas a partir da utilização do modelo para as seções dos rios consideradas</i>	55
<i>Tabela 05 - Testes de igualdade estatísticas entre as séries anuais geradas e observadas</i>	55
<i>Tabela 06 - Características principais observadas e obtidas a partir da utilização da geração de vazões anuais independente para as seções dos rios consideradas</i>	59
<i>Tabela 07 – Estatísticas básicas da precipitação diária observada em São João do Piauí</i>	64
<i>Tabela 08 – Classificação dos anos quanto à precipitação média anual</i>	64
<i>Tabela 09 – Estatística médias para 100 séries geradas e valores observados na série histórica</i>	66
<i>Tabela 10 - Temperaturas médias mensais máximas, mínimas e médias registradas na estação climatológica de São João do Piauí</i>	70
<i>Tabela 11 - Médias mensais de umidade relativa do ar registradas na estação climatológica de São João do Piauí</i>	70
<i>Tabela 12 - Insolação média mensal e diária para São João do Piauí</i>	71
<i>Tabela 13 - Velocidade média mensal dos ventos para São João do Piauí</i>	71
<i>Tabela 14 - Evaporação média mensal e diária para São João do Piauí</i>	72
<i>Tabela 15 – Postos pluviométricos contidos ou circunvizinhos ao Município de São João do Piauí</i>	73
<i>Tabela 16 – Precipitações médias mensais nos postos considerados e valores médios regionais segundo o método dos Polígonos de Thiessen</i>	74
<i>Tabela 17 - Principais características da barragem Jenipapo</i>	77
<i>Tabela 18 – Vazões afluentes calculadas para o período 1963/1983 em m³/s</i>	78

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

<i>Tabela 19 - Evolução da população do município de São João do Piauí</i>	96
<i>Tabela 20 - Efetivos da pecuária e das aves para o município de São João do Piauí, sua participação em relação ao estado e taxa geométrica de variação no período 1997-1999</i>	97
<i>Tabela 21 - Quantidade produzida, valor da produção e área plantada e colhida para as culturas exploradas no município de São João do Piauí para os anos de 1998 e 1999</i>	98
<i>Tabela 22 - Populações previstas e demanda para abastecimento urbano a partir do reservatório Jenipapo para o ano de 2025</i>	100
<i>Tabela 23 - Efetivos da pecuária e das aves previstos para o município de São João do Piauí no ano de 2025</i>	103
<i>Tabela 24 – Valores de ETo calculados pelo método de Penman-Monteith</i>	104
<i>Tabela 25 – Precipitação provável para o município de São João do Piauí</i>	105
<i>Tabela 26 – Demanda necessária para a irrigação</i>	106
<i>Tabela 27 – Vazões regularizadas pelo reservatório Jenipapo para diversas garantias</i>	107
<i>Tabela 28 – Área das unidades de mapeamento pedológicos e seus respectivos valores de L_{600} para a área de afloramento da formação Serra Grande no município</i>	109

RESUMO

O presente trabalho apresenta um conjunto de procedimentos, ferramentas computacionais e indicadores que possibilitam avaliar a sustentabilidade hídrica de uma região localizada no semi-árido nordestino.

São apresentadas metodologias para a determinação das principais demandas hídricas de uma região, bem como de sua disponibilidade, tanto superficial quanto subterrânea. Para burlar a carência crônica de dados hidrológicos comum à grande parte dos estados nordestino, são apresentadas duas ferramentas auxiliares para a determinação da vazão regularizada a partir de um reservatório e da recarga potencial de um aquífero que se utilizando geração estocástica de vazões mensais e precipitações diárias.

O resultado do balanço disponibilidade x demanda é apresentado através de índices de sustentabilidade que se apresentam como uma ferramenta concisa de extrema valia para a gestão efetiva dos recursos hídricos de uma região, em especial para o planejamento de novas obras hídricas e controle de demandas.

Como exemplo de aplicação foi escolhido o município de São João do Piauí, localizado no semi-árido piauiense, que além de se enquadrar no perfil metodológico, apresenta a possibilidade de se considerar tanto a disponibilidade superficial quanto a subterrânea.

ABSTRACT

This work presents a group of computational procedures, tools and indicators that allow to evaluate the water sustainability of semi-arid region from Brazilian northeastern.

Methodologies to determine the mean water demands of the region, are presented, as well as the surface and underground water availability of the region. To overcome the chronic lack of the hydrologic data, common behavior among all the Brazilian northeastern states, are presented two auxiliary tools to determine the regulated flow of one reservoir and the potential recharge of one aquifer using stochastic generation of monthly discharge and daily precipitation.

The water balance: availability Vs demands is presented through sustainability indicators that are important tools to the effective water management of a region, specially to plan of the new hydraulic structures construction and to the control of the water demands.

As an example of application was chosen the municipal district of São João do Piauí, that is localized in the Piauí semi-arid region and is framed in the methodological behavior and presents the possibility of define the surface and groundwater availability.

1 – INTRODUÇÃO

A água é essencial à vida. Onde não existe água suficiente não existe desenvolvimento. Apesar disso, até algumas décadas atrás, a preocupação com a identificação da potencialidade e conservação dos mananciais era muito restrita. A água era considerada um bem livre e abundante. Mesmo em regiões que enfrentavam períodos severos de estiagem, a preocupação com a oferta durava unicamente até o próximo período chuvoso.

O uso inadequado, o aumento descontrolado das demandas, os índices crescentes de poluição e o processo de degradação ambiental são alguns dos fatores que forçaram a uma mudança radical na forma de encarar a água em todo o planeta. Hoje ela é considerada um bem econômico e finito, e a sua oferta em quantidade e qualidade apropriadas é um dos grandes desafios da humanidade.

Diversas conferências e acordos mundiais foram realizados visando o uso racional. No Brasil, a lei 9433/97 e as diversas legislações estaduais específicas sobre recursos hídricos tem ressaltado a necessidade do gerenciamento participativo dos recursos, lançando mão de instrumentos de planejamento como os Planos Diretores de Recursos Hídricos, e de controle, como a outorga e a cobrança, visando regulamentar e disciplinar o uso da água e minimizar conflitos entre os diversos usuários.

Entretanto, para o sucesso do gerenciamento dos recursos hídricos, é imprescindível que os órgãos gestores possuam informações confiáveis sobre as ofertas e as demandas de água das bacias sob o domínio de uma região. Infelizmente a geração de dados hidrológicos nunca foi considerado como uma prioridade pelos governantes brasileiros. O abandono dos postos pluviométricos da SUDENE a partir de 1991 é um trágico exemplo dessa premissa. Com o início dos trabalhos da Agência Nacional de Águas – ANA, desde dezembro de 2000, espera-se que este quadro seja radicalmente alterado.

Pelas dificuldades de obtenção de dados, seja pela burocracia, ainda existente, seja pela inexistência dos mesmos, faz-se necessário a utilização de diversas ferramentas para a geração e “multiplicação” das informações necessárias a partir dos dados disponíveis. Modelos chuva-vazão e de geração estocástica de séries sintéticas de vazões são exemplos de ferramentas utilizadas para melhor avaliar a disponibilidade hídrica de uma região.

Somente a identificação mais precisa possível do balanço oferta x demanda possibilitará a tomada de decisões corretas a cerca da distribuição da água entre os diversos usuários e indicará, inclusive, o grau máximo de desenvolvimento de uma região que apresenta limitações de disponibilidade. Como afirmam SILANS et al.(1996), “sendo a água um fator limitante, o potencial de desenvolvimento econômico e social de uma região está diretamente associada à sua sustentabilidade hídrica”.

1.1 – Escopo

VIEIRA e VIEIRA (1995) utilizaram três indicadores que permitem de forma simples e rápida a avaliação do uso dos recursos hídricos de uma região e o seu potencial de desenvolvimento quanto à utilização da água. Estes indicadores foram amplamente utilizados no âmbito do projeto Áridas, tendo sido aplicados na avaliação das potencialidades de todos os estados nordestinos. Partindo-se do conhecimento das demandas hídricas, do potencial hídrico e da disponibilidade hídrica de uma região, os índices permitem avaliar a sua sustentabilidade quanto à utilização de seus recursos hídricos e identificar a necessidade de intervenções visando a racionalização do balanço oferta x demanda no momento presente ou no futuro, através da análise de cenários tendenciais.

Para a utilização dos indicadores, entretanto, é extremamente necessário que a avaliação das variáveis intervenientes, ou seja, as demandas, o potencial e a disponibilidade hídrica, seja realizada com a maior precisão possível. Métodos para a avaliação de demandas são razoavelmente comuns, utilizando-se geralmente de dados secundários obtidos em censos e cadastros realizados por diversos órgãos, públicos ou privados. No

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

caso do potencial hídrico, e em especial da disponibilidade hídrica, a avaliação passa necessariamente pela utilização de dados hidrometeorológicos que, em geral para o Nordeste semi-árido são insuficientes ou inexistentes.

Desta forma, o presente apresenta dois modelos que têm como objetivo auxiliar a avaliação da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea de regiões contidas no semi-árido nordestino e que apresentem carência de dados, em especial de vazões. No trabalho também é apresentado um exemplo de utilização dos indicadores de sustentabilidade hídrica.

A disponibilidade hídrica de uma região é resultante de duas parcelas: a disponibilidade subterrânea, caracterizada pela quantidade de água passível de ser explorada, através de poços, das camadas aquíferas existentes; e a disponibilidade superficial, caracterizada pelas vazões mínimas dos rios presentes na região. No semi-árido brasileiro, região caracterizada pela intermitência da maioria de seus rios, a disponibilidade hídrica está associada à existência de grandes reservatórios de acumulação capazes de promover uma regularização plurianual dos deflúvios, que se concentram em poucos meses do ano.

Para que a exploração de um aquífero seja sustentável é necessário que a quantidade de água retirada do mesmo seja no máximo igual ao seu volume de recarga. Na verdade, como a vazão básica é uma importante parcela da vazão em rios, recomenda-se que a exploração seja igual a um percentual da recarga, em geral inferior a 50% do volume total. Logo, a avaliação da recarga de um aquífero é fator primordial para a gestão efetiva das águas por ele armazenadas. Desta forma, é proposto um modelo para tal mister, composto por um modelo estocástico para a geração de precipitações diárias, aliado a um modelo de balanço hídrico diário, permitindo-se, assim, a determinação da recarga potencial e, conseqüentemente, o limite superior de utilização adequado para o reservatório subterrâneo.

Para a avaliação da disponibilidade superficial, ou seja, a vazão regularizada a partir de um reservatório de grande porte, propõe-se a utilização de um modelo de simulação de reservatórios acoplado a um modelo gerador de séries estocásticas de deflúvios. Apesar

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

de modelos semelhantes já terem sido desenvolvidos, como o SIMRES (CAMPOS et al., 2000), o grande diferencial está no modelo estocástico de geração de vazões que pretende manter a característica de persistência do período seco observado, pois os longos períodos de estiagem são o principal limitante da capacidade de regularização dos reservatórios nordestinos.

Como exemplo de aplicação dos modelos propostos e dos indicadores, além de técnicas tradicionais de avaliação de demandas, escolheu-se o município de São João do Piauí, localizado no semi-árido piauiense, que além de se enquadrar no perfil metodológico, apresenta a possibilidade de se considerar tanto a disponibilidade superficial a partir do reservatório Jenipapo, quanto a subterrânea através da exploração do aquífero Serra Grande, um dos mais importantes do estado.

Em resumo, o presente trabalho visa apresentar um conjunto de procedimentos, ferramentas computacionais e indicadores que possibilitarão aos “tomadores de decisões” subsídios imprescindíveis para a gestão efetiva dos recursos hídricos de uma região, em especial para o planejamento de novas obras hídricas e controle de demandas.

1.2 – Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado em cinco capítulos. O presente capítulo trata da apresentação problema, do escopo do trabalho e discorre sobre a maneira como o documento foi organizado.

O Capítulo 2 apresenta a metodologia seguida para a utilização dos indicadores de sustentabilidade, bem como a revisão bibliográfica acerca da avaliação de demandas e da disponibilidade hídrica, inclusive apresentando os dois modelos propostos.

No Capítulo 3 é realizada a validação do modelos de geração estocástica de vazões através da análise da aplicação do modelo para três rios intermitentes do semi-árido piauiense, entre eles o rio Piauí no local de implantação da barragem Jenipapo, recentemente construída. Também neste capítulo é validado o modelo de geração de

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

precipitações diárias sintéticas a partir de sua aplicação para o posto pluviométrico instalado na sede municipal de São João do Piauí.

No Capítulo 4 é apresentada a aplicação da metodologia proposta a uma região do semi-árido nordestino. Na primeira parte são apresentadas as principais características do município de São João do Piauí, área escolhida para a aplicação dos modelos, e, na segunda parte, é feita a avaliação das demandas hídricas para o presente e para um cenário tendencial futuro e a aplicação dos modelos de avaliação da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea. Neste capítulo, também, são empregados os índices de sustentabilidade para a situação presente e um cenário tendencial futuro.

E finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões desta pesquisa e faz algumas sugestões de estudos complementares.

Foram incluídos, ainda, dois anexos: o primeiro contendo tabelas com valores usuais de parâmetros utilizados e o segundo apresentando os códigos fontes das aplicações desenvolvidas em VBA (Visual Basic for Applications) dentro da planilha de cálculo EXCEL para a execução dos modelos propostos.

2 – BASES TÉCNICAS E METODOLOGIA

Segundo BARTH e POMPEU (1987), o planejamento em recursos hídricos pode ser definido como o “conjunto de procedimentos organizados que visam o atendimento das demandas de água, considerada a disponibilidade restrita deste recurso” e tem por objetivo a “avaliação prospectiva das demandas e das disponibilidades desses recursos e a sua alocação entre usos múltiplos, visando obter os máximos benefícios econômicos e sociais”.

CARVALHO (1995) cita alguns acordos internacionais que prevêm a necessidade do planejamento para a exploração racional dos recursos hídricos:

- Carta Européia da Água. O Conselho da Europa e França em 1968, reiterado pela Declaração de Dublin, Irlanda, em 1992, e pelas Nações Unidas, conclui que a água é um recurso natural limitado, essencial à vida e ao desenvolvimento;
- Conferência da Água de Mar del Plata, 1977. Organizada pelas Nações Unidas, recomenda que os usos múltiplos da água devem ser considerados no processo de planejamento;
- Conferência de Caracas, 1976. Promovida pela Associação Internacional de Direitos da Água, indica que a bacia hidrográfica é a unidade básica de gestão hídrica;
- Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, ECO - Rio 1992. Reitera que a água é um bem econômico passível de cobrança pelo seu uso.

A Constituição Federal de 1988, a partir do seu artigo 21 que prevê a criação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, abriu espaço para que várias unidades da Federação contemplassem os recursos hídricos, de diversas formas, em suas Constituições. No Nordeste, o primeiro Estado a adotar uma lei de recursos hídricos foi o Estado do Ceará, em 1992, que previa a elaboração do Plano Estadual de Recursos

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Hídricos, os estudos para implantação do usuário-pagador e a organização inicial do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 1997).

Depois do exemplo do Ceará, vários estados nordestinos iniciaram a implantação de suas legislações específicas: Sergipe (1995), Bahia (1995), Rio Grande do Norte (1996), Paraíba (1996), Pernambuco (1997), e em agosto de 2000 o Piauí.

Em 1997 foi aprovada a lei 9.433 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos que criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 21 da Constituição Federal. Entre os diversos princípios adotados nas leis de recursos hídricos, são pontos fundamentais:

- que o gerenciamento dos recursos hídricos deve ser integrado, descentralizado e participativo sem a dissociação dos aspectos qualitativos e quantitativos, considerando as fases aérea, superficial e subterrânea do ciclo hidrológico;
- que a água, como recurso limitado que desempenha importante papel no processo de desenvolvimento econômico e social, impõe custos crescentes para sua obtenção, assim, a cobrança pelo uso da água é entendida como fundamental para a racionalização de seu uso e conservação e instrumento de viabilização das Políticas Nacional e Estadual de Recursos Hídricos;
- que, sendo os recursos hídricos bens de uso múltiplo e competitivo, a outorga de direitos de seu uso é considerada instrumento essencial para o seu gerenciamento;
- que o aproveitamento dos recursos hídricos deve ter como prioridade maior o abastecimento das populações;
- que os reservatórios de acumulação de águas superficiais devem ser incentivados para uso de múltiplas finalidades;
- que os corpos de águas destinados ao abastecimento humano devem ter seus padrões de qualidade compatíveis com esta finalidade.

Um plano de desenvolvimento regional passa necessariamente por um plano de recursos hídricos, que requer, para a sua elaboração, a estimativa das disponibilidades hídricas

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

atuais, demandas atuais e futuras e das potencialidades, que permitam comparações e previsões a partir de diversos cenários de desenvolvimento da região (SILANS et al., 1996).

Desta forma, para que a gestão de recursos hídricos seja factível torna-se indispensável:

- diagnosticar as condições atuais e tendenciais de disponibilidades e demandas de recursos hídricos superficiais e subterrâneos;
- formular e analisar cenários desejáveis de incremento de oferta de recursos hídricos;
- propor um modelo de gerenciamento dos recursos englobando mecanismos institucionais, gerenciais, sociais, econômicos e financeiros para alcançar um ponto de equilíbrio entre a oferta e a demanda.

Segundo VIEIRA(1999), a potencialidade hídrica de uma bacia pode ser considerada como a soma do escoamento superficial direto e o escoamento de base, ou seja, o escoamento superficial total, calculado em termos médios de longo período.

Ainda segundo VIEIRA (1999), a disponibilidade hídrica corresponderia “à quantidade máxima de água, efetivamente disponível, de forma duradoura e permanente”. Para regiões com rios perenes, a disponibilidade superficial corresponderia às vazões mínimas naturais. No caso dos rios intermitentes do semi-árido nordestino, a disponibilidade natural é nula. Entretanto, a construção de reservatórios de acumulação permitem a regularização plurianual dos deflúvios. Desta forma, as vazões regularizadas pelos açudes constituem a disponibilidade de águas superficiais.

Quanto às águas subterrâneas, a disponibilidade pode ser calculada em função do número de poços existentes na bacia e da vazão média obtida pelos mesmos MARWELL (1995).

A sustentabilidade hídrica pode, então, ser avaliada através do uso de indicadores, dos quais VIEIRA e VIEIRA (1995) utilizam:

IUD – Índice de utilização da disponibilidade, definido pela razão entre a demanda e a disponibilidade;

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

IUP – Índice de utilização da potencialidade, definido pela razão entre a demanda e a potencialidade;

IAP – Índice de ativação da potencialidade, definido como a razão entre a disponibilidade e a potencialidade.

Regiões que apresentem $IUD > 1$ apresentam situações de exaustão da disponibilidade, evidenciando um quadro de demanda reprimida, o que implica na necessidade de aumento da oferta com a construção de novos reservatórios e, ou, perfuração de mais poços ou, ainda, adoção de outras medidas como racionalização da demanda.

VIEIRA (1999), afirma que por limitações físicas naturais, o valor máximo de IUP seria igual a 0,8 e o limite máximo provável de 0,6 para os rios intermitentes do Nordeste. Desta forma, valores de $IUP > 0,6$ indicariam uma situação crítica de utilização dos recursos hídricos em uma bacia nordestina.

O índice IAP, por outro lado, representaria o grau de eficiência da disponibilização dos recursos hídricos de uma bacia, sendo tanto maior quanto mais próxima de um.

A análise destes indicadores demonstrará, para o momento atual e para o futuro, as condições dos recursos hídricos da unidade de planejamento. Ao longo do tempo, a evolução destes índices retratará a sustentabilidade ou não dos recursos hídricos da região estudada.

A utilização dos índices requer necessariamente a avaliação das diversas demandas de água existentes na bacia e da oferta total de água, seja quanto a valores potenciais, seja quanto aos valores usualmente disponíveis, para valores atuais e futuros.

2.1 – Avaliação das Demandas

2.1.1 – Demandas Concentradas

Considera-se como demandas concentradas o abastecimento humano e o consumo industrial nas sedes municipais (SILANS et al.,1996).

2.1.1.1 – Abastecimento Urbano

As previsões de consumo humano podem ser realizadas com base na população estimada e no consumo *per capita*, além de um reforço devido às perdas nos sistema de distribuição (DINIZ, 1996). Como exemplo de valores da taxas *per capita* que podem ser adotados, apresenta-se na tabela 01 os valores médios indicados pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA em função da população.

Tabela 01 – Taxas *per capita* de consumo de água adotados pela CAGEPA

População	Taxa <i>per capita</i>
Até 10 mil habitantes:	120 l/hab/dia
De 10 mil até 100 mil habitantes:	150 l/hab/dia
De 100 mil até 300 mil habitantes:	200 l/hab/dia
De 300 mil até 500 mil habitantes:	250 l/hab/dia
Acima de 500 mil habitantes:	300 l/hab/dia

Fonte: DINIZ(1996)

Existem vários métodos para a estimativa do crescimento populacional, sendo os mais empregados: o método do crescimento aritmético; o método do crescimento geométrico; e, para os grandes centros urbanos, a curva logística (DACACH, 1979). Em geral, para a grande maioria dos projetos de redes de abastecimento de água e de dimensionamento de adutoras, é utilizado o método do crescimento geométrico. MARWELL (1995), por exemplo, propõe a utilização do método geométrico para a previsão da população total e rural de um município, encontrando-se a projeção da população urbana pela diferença entre ambas.

O método do crescimento geométrico consiste na determinação da taxa de crescimento através da fórmula:

$$i = \left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{1/n} - 1 \quad (1)$$

sendo:

i a taxa de crescimento médio anual no período t_o - t_n ;

P_n a população no tempo final t_n ;

P_o a população no tempo inicial t_o ;

n o número de anos entre t_0 e t_n ;

e do cálculo da população no tempo desejado a partir da fórmula:

$$P_n = P_0(1 + i)^n \quad (2)$$

onde:

i é a taxa de crescimento médio anual determinada anteriormente;

P_n a população no tempo t_n que se deseja estimar;

P_0 a população conhecida no tempo t_0 ;

n o número de anos entre t_0 e t_n .

2.1.1.2 – Consumo Industrial

Como afirmam SILVA e SIMÕES (1999), “a disponibilidade de dados precisos sobre o consumo de água (pelas indústrias) é muito restrita”, seja pelo receio de disponibilizar a informação, seja devido à diferenças técnicas entre empresas do mesmo segmento ou mesmo pelas diferentes condições ambientais do local de instalação das indústrias. Ainda assim, é muito comum a estimativa do consumo industrial a partir de um cadastro de indústrias e da utilização de tabelas que relacionam o consumo de água por unidade produzida, como é o caso da tabela 02.

Uma outra alternativa para a determinação do consumo industrial é seguir a recomendação do Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil - PLIRHINE (SUDENE, 1980), onde foi observado que a evolução para abastecimentos domésticos e distritos industriais apresentam ritmo de crescimento semelhantes. Também foi observado que a demanda para abastecimento dos distritos equivalem a cerca de 25% da demanda para abastecimento urbano.

Desta forma, poder-se-ia estimar o consumo industrial a partir do consumo para abastecimento urbano. MARWELL (1995) utilizou para o Estado do Piauí valores variando entre 15 e 25% para os anos de 2000, 2010 e 2020, dada a forma de desenvolvimento industrial do Estado, os mesmos valores foram considerados por LANNA e ROCHA (2000).

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Tabela 02 – Consumo de água por unidade produzida

Segmento	Consumo (l de água/ un.)		Referência	Unidade
Papel e celulose	33	216	-	kg
Leite pasteurizado	2	4	-	l (*)
Leite UHT	2	3	-	l (*)
Leite em Pó	2	4	-	l (*)
Queijos	3	5	-	l (*)
Manteiga	3	3	-	l (*)
Iogurtes e sobremesas	4	6	-	l (*)
Cerveja	4,5	12	-	l
Refrigerantes	1,8	2,5	-	l
Couro	400	800	600	couro inteiro
Álcool	1.000	12.000	-	t de cana
Têxtil (algodão)	80	170	115	kg
Engomagem	-	-	4	kg
Desengomagem	-	-	22	kg
Purga	-	-	38	kg
Alvejamento	-	-	38	kg
Mercerização	-	-	33	kg
Tingimento	-	-	130	kg
Estamparia	-	-	17	kg
Frigorífico (frangos)	14	25	20	ave
Siderurgia (aço)	4.500	81.000	-	t

(*) – Litros de leite processados

Adaptado de SILVA e SIMÕES (1999)

2.1.2 – Consumo Animal

A demanda referente ao consumo animal pode ser estimada a partir da equação geral estabelecida pelo PLIRHINE (SUDENE, 1980), que agrega a projeção dos bovinos, equídeos, ovinos, caprinos e suínos, em uma unidade hipotética denominada BEDA, fazendo com que cada espécie animal consumidora de água seja ponderada em relação ao bovino.

A fórmula utilizada é a seguinte:

$$DPEC = BEDA \cdot CD \quad (3)$$

sendo:

DPEC a demanda para abastecimento pecuário;

BEDA bovinos equivalentes para demanda de água;

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

CD o coeficiente de demanda ou “demanda *per capita* animal”, admitido no PLIRHINE igual a 50 l/BEDA/dia.

A unidade hipotética BEDA corresponde a seguinte expressão:

$$\text{BEDA} = \text{BOV} + 0,2 \text{ OV/CAP} + \text{EQUI} + 0,25 \text{ SUI} \quad (4)$$

onde:

BOV é o número de bovinos e bufalinos;

OV/CAP o número de ovinos e/ou caprinos;

EQUI o número de equídeos (equínos + asininos + muares);

SUI o número de suínos.

Quanto ao consumo de água por aves (galinhas, frangos, etc), LANNA e ROCHA (2000) propõem a taxa *per capita* de 0,20 l/cabeça.

Para a previsão da população futura pode-se utilizar as fórmulas clássicas, inclusive a do crescimento geométrico apresentada, entretanto, como afirma MARWELL (1995), “o comportamento da população animal é diretamente relacionado com as condições vigentes no meio rural, em especial com a ocorrência de períodos de estiagem”. Assim, reavaliações periódicas devem ser realizadas para manter o planejamento da utilização dos recursos hídricos sempre atual. DINIZ (1996) inclusive, propunha a utilização de redes neurais para prever o consumo animal na Paraíba.

Quanto a análise de fontes locais de abastecimento, o PLIRHINE (SUDENE, 1980) considera 4 km como percurso máximo recomendável para os animais.

2.1.3 – Demanda para Abastecimento da População Rural

A demanda para abastecimento da população rural pode ser determinada com base na estimativa populacional e uma taxa de consumo *per capita* apropriada. Em geral, o abastecimento de pequenas comunidades rurais é feito através de poços amazonas, ou diretamente em córregos e açudes. Atualmente, entretanto, estão sendo estimuladas a adoção de sistemas simplificados para o abastecimento de núcleos rurais com a implementação de redes de abastecimento e/ou chafarizes públicos.

O PLIRHINE (SUDENE, 1980) sugere a utilização de taxas *per capita* entre 70 e 100l/hab/dia para populações de baixa renda não servidas por sistemas de abastecimento. Dada a dificuldade de captação da água, principalmente devido à distância das fontes às pequenas comunidades consumidoras, MARWELL (1995) adotou o valor de 70l/hab/dia para o Estado do Piauí. Já o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia dos Rios Piauí/Caniné considerou a taxa *per capita* de 80l/hab/dia para a população rural.

No caso de núcleos rurais abastecidos por sistemas de abastecimento, podem ser consideradas as mesmas taxas para abastecimento urbano ou valores um pouco mais baixos, já que “quanto maior a cidade, maior o *per capita* diário, visto que há melhorias no nível de vida das pessoas implicando em maior consumo diário e que as cidades, à medida que vão se desenvolvendo, incorporam em seu interior pequenas indústrias e um maior comércio, que também consumirão água” (FAHMA, 2000).

2.1.4 – Demanda para Irrigação

A irrigação consiste em fornecer água a uma cultura quando o aporte pluviométrico é insuficiente para atender totalmente às suas necessidades hídricas. Assim, a demanda de irrigação é calculada multiplicando-se a área de cultivo pela diferença entre a necessidade hídrica da cultura e a precipitação ocorrida sobre a área cultivada.

2.1.4.1 – Necessidades Hídricas das Culturas

A maneira mais indicada de se determinar a quantidade de água requerida por uma dada cultura é através da estimativa da demanda máxima de uma cultura referencial (ET_o) (TELLES, 1996). A evapotranspiração máxima de uma cultura (ET_m) é definida relacionando-a a evapotranspiração de referência através de um coeficiente de cultura (K_c):

$$ET_m = ET_o \cdot K_c \quad (5)$$

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

A evapotranspiração máxima (ET_m) representa a máxima perda de água que uma cultura sofre em um determinado estágio de desenvolvimento, quando a mesma não é submetida a qualquer tipo de restrição de água no solo.

Chamando-se de ET_a a evapotranspiração que realmente ocorre, tem-se, como situação ideal para o desenvolvimento e produtividade da cultura, que ET_a deva ser igual a ET_m. Sempre que ET_a for menor que ET_m existe uma restrição de água que pode afetar a produtividade. Por isso, na determinação da demanda climática máxima de uma cultura em projetos de irrigação utiliza-se o valor de ET_m (TELLES, 1996).

Segundo BERNARDO (1989) os métodos de avaliação da evapotranspiração podem ser divididos em: diretos (lisímetros, parcelas experimentais de campo, controle de umidade) e indiretos (evaporímetros e equações). Devido às dificuldades de emprego do métodos diretos, os métodos indiretos têm sido largamente empregados. De acordo com JENSEN (1973), a escolha do método para a estimativa da evapotranspiração de referência depende do clima local e dos dados disponíveis.

O grande número de métodos para a estimação de ET_o com várias adaptações locais ou modificações nos parâmetros tem provocado confusão e dúvidas sobre qual é o mais confiável. JENSEN et al. (1990) analisaram o desempenho de 20 métodos diferentes, entre eles os quatro métodos indicados por DOORENBOS e PRUITT (1984) e recomendados pela Food and Agricultural Organization - FAO (Penman modificado, Blaney-Criddle, Radiação e Tanque Evaporimétrico), e os métodos de Hargreaves, Turc, e o método combinado de Penman-Monteith, comparando os resultados com dados de lisímetros de onze localizações com condições climáticas variáveis. O estudo comparativo, além de outras pesquisas, confirmaram o desempenho superior do método combinado de Penman-Monteith tanto em climas úmidos quanto em climas áridos.

Uma consulta à especialistas organizada pela FAO – Food and Agriculture Organization em 1990, recomendou a adoção do método combinado de Penman-Monteith como um novo padrão para a avaliação de ET_o e determinou os procedimentos para cálculo dos vários parâmetros necessários. Além disso, foram desenvolvidos procedimentos para o uso do método a partir de dados climáticos limitados, “eliminando a necessidade do uso

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

de qualquer outro método de evapotranspiração de referência e criando uma base consistente e transparente para um padrão globalmente válido para o cálculo das exigências hídricas das culturas” (SMITH et al., 1996).

O novo método define ETo como sendo “a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética com uma altura assumida (12 cm), com valores fixos de resistência de superfície (70 s/m) e albedo (0,23), se assemelhando à evapotranspiração de uma superfície extensa coberta por grama verde de altura uniforme, crescendo ativamente, ocupando completamente o solo e com água adequada.”

A determinação de ETo pode ser simplificado pela equação (SMITH, et al.,1996):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (6)$$

onde:

ETo é a evapotranspiração de referência (mm/dia);

Rn é a radiação líquida na superfície da cultura (MJ/m²/dia);

G é o fluxo de calor no solo (MJ/m²/dia);

T é a temperatura média do ar (°C);

U2 é a velocidade do vento medido a dois metros de altura (m/s);

(e_a-e_d) é o déficit de pressão do vapor (kPa);

Δ é a declividade da curva de pressão do vapor (kPa/°C);

γ é a constante psicrométrica (kPa/°C);

900 é um fator de conversão.

A FAO disponibiliza em seu sítio na internet (www.fao.org) uma planilha do Microsoft Excel para a resolução da equação 06, além da versão 7 do programa Cropwat, que também pode ser usado para tal fim.

Para a determinação de ETo são requeridas informações sobre a localização da área (latitude e altitude) e normais climatológicas de temperatura máxima e mínima, umidade

relativa do ar, velocidade média dos ventos a 2 metros de altura e horas diárias de incidência solar.

Apesar da carência de estações climatológicas em funcionamento, em especial no Nordeste, e da extrema dificuldade de obtenção de dados junto ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, entidade que opera a maioria das estações, a ausência de dados não inviabiliza a utilização do método. SMITH et al. (1996) apresentam procedimentos simples para superar a ausência de registros de velocidade do ventos, umidade relativa do ar e dados de insolação.

2.1.4.2 – Precipitação Provável

A precipitação provável ou dependente, para a análise das demandas de irrigação complementar, corresponde à precipitação mensal com uma certa probabilidade de ser igualada ou superada (AZEVEDO, 1992), sendo que o nível de probabilidade de 75% é considerado como nível confiável para estudos e planejamentos agrícolas (BERNARDO, 1989; SAMANI e HARGREAVES, 1985).

Dentre as diversas metodologias empregadas para estimar a precipitação provável, a distribuição Gama Incompleta tem apresentado resultados significativamente satisfatórios para ajustes de totais de chuvas de períodos mensais e/ou menores em diferentes condições climáticas (SILVA e MATTOS, 1992).

2.1.4.2.1 – Distribuição Gama Incompleta

A função cumulativa de distribuição de probabilidade tem a forma (ANDRADE JÚNIOR e BASTOS, 1997):

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \int_0^x X^{\alpha-1} \cdot (e)^{\frac{-x}{\beta}} \cdot dx \quad (7)$$

onde:

α é o parâmetro de forma ($\alpha > 0$);

β é o parâmetro de escala ($\beta > 0$);

$\Gamma(\alpha)$ é a função gama, definida por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^x e^{-x} \cdot x^{\alpha-1} \cdot dx \quad (8)$$

As estimativas de α e β são feitas pelo método da máxima verossimilhança através de:

$$\alpha = \frac{1}{4 \cdot A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot A}{3}} \right) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (10)$$

sendo:

$$A = \ln(\bar{x}) - xg \quad (11)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (12)$$

$$xg = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x_i) \quad (13)$$

onde \bar{x} é a média aritmética e xg é a média geométrica da observação.

Caso a série de precipitações apresente valores nulos, fato comum para muitas regiões do semi-árido nordestino, mesmo na estação considerada úmida, o aspecto da curva sugere uma exponencial negativa no ajuste. Para possibilitar uma maior flexibilidade da curva e um melhor ajuste aos dados pluviométricos, sugere-se o uso da distribuição cumulativa Gama-Mista (ANDRADE JÚNIOR e BASTOS, 1997).

2.1.4.2.2 – Distribuição Gama-Mista

A distribuição cumulativa Gama-Mista é determinada em duas partes (ANDRADE JÚNIOR e BASTOS, 1997):

$$F(x) = P_0 + (1 - P_0) \cdot G(x) \quad (14)$$

sendo:

$$P_0 = \frac{N_0}{N + 1} \quad (15)$$

onde:

Po é a probabilidade de ocorrência de valores nulos;

G(x) é a distribuição cumulativa Gama;

No é o número de valores nulos da série.

Na determinação da demanda para irrigação, deve-se considerar a precipitação provável apenas para os meses com precipitação média superior a 50 mm pois baixos valores de precipitação tem pequeno significado para a agricultura (SAMANI e HARGREAVES, 1985).

O primeiro passo na preparação dos dados pluviométricos para o tratamento estatístico consiste na identificação e correção de erros grosseiros ocorridos nas observações (BERTONI e TUCCI, 1993). Uma alternativa para a análise de consistência e preenchimento de falhas dos dados mensais e anuais é o método do Vetor Regional. Este método foi utilizado com sucesso para totais anuais precipitados (SUDENE, 1989 e 1994) e inúmeros estudos de recursos hídricos utilizam-se dele com os totais mensais (FREIRE et al., 1997).

Já para o preenchimento de dados diários, VILLELA e MATTOS (1975) sugerem a utilização do método da Ponderação Regional.

2.1.4.2.2 – O Método do Vetor Regional

O método modela as informações pluviométricas de uma região na forma de uma seqüência de índices representativos da pluviometria anual, ou mensal, naquela área, e de coeficientes característicos de cada posto pluviométrico contido na região (HIEZ et al., 1991). Esses índices são únicos para toda a região e estão diretamente relacionados às alturas precipitadas em cada posto por meio de coeficientes apropriados. Dessa forma, é possível estimar a altura anual, ou mensal, ocorrida em um posto “i” para o ano (mês) “j” através de (FILL, 1987):

$$\hat{P}_{ij} = L_i \cdot C_j \quad (16)$$

onde:

\hat{P}_{ij} é a estimativa da altura precipitada no posto “i” para o ano (mês) “j”;

L_i é o vetor regional;

C_j é o vetor de coeficientes.

Existirá uma diferença entre os valores observados e os valores estimados para cada ano, ou mês, correspondente a uma estação. Essas diferenças compõem uma matriz D de diferenças cujos elementos são calculados por:

$$d_{ij} = P_{ij} - L_i \cdot C_j \quad (17)$$

sendo:

d_{ij} a diferença;

P_{ij} a altura precipitada no posto “i” no ano (mês) “j”.

Os elementos das matrizes L e C são determinados pela minimização quadrática da matriz D (FILL, 1987). Após obtenção dos vetores, calcula-se os erros relativos por (BERTONI e TUCCI, 1993):

$$e_{ij} = \frac{d_{ij}}{l_i \cdot c_j} \quad (18)$$

e os seus valores acumulados por:

$$E_{ij} = \sum_i^k e_{ij} - 0,5 \cdot \sum_i^n e_{ij} \quad \text{para } 1 \leq k \leq n \quad (19)$$

Segundo FILL (1987), a análise visual do gráfico dos erros simples ou acumulados em função do tempo permite detectar erros sistemáticos, grosseiros ou anomalias climáticas locais e estimar valores para o preenchimento de falhas nas observações.

2.1.4.2.2 – O Método da Ponderação Regional

O método considerando a proporcionalidade entre as pluviometrias diárias isoladas e as médias anuais de longo período, observadas em postos vizinhos. Segundo BERTONI e TUCCI (1993), devem ser considerados no mínimo três postos com mais de 10 anos de dados. Para um posto que apresente falhas, as mesmas poderão ser preenchidas através

de:

$$P_{dx} = \frac{P_{mx}}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{di}}{P_{mi}} \quad (20)$$

em que:

- P_{dx} é o dado faltante de precipitação diária do posto x;
- n é o número de postos vizinhos utilizados;
- P_{mi} é a precipitação média anual do posto vizinho de ordem i;
- P_{di} é a precipitação diária do posto de vizinho de ordem i;
- P_{mx} é a precipitação média anual do posto “x”.

Os postos vizinhos escolhidos para o preenchimento devem pertencer a uma região climatológica semelhante do posto a ser preenchido. FAHMA (2000) utilizou os seguintes critérios para a determinação dos postos a serem utilizados:

- Diferença de altitude: 350 m, no máximo;
- Proximidade: para o caso de não existirem postos suficientes dentro de uma região homogênea previamente delimitada, prevaleceu o critério de seleção dos postos localizados dentro de um raio de 110 km de distância com relação ao posto a ser analisado;
- Correlação maior que 70% entre a precipitação mensal do posto com dados a serem preenchidos e o posto vizinho escolhido.

Apesar da recomendação de BERTONI e TUCCI (1993) de que o método não deveria ser utilizado para o preenchimento de dados diários já que a existe uma grande variação espacial e temporal da chuva para freqüência médias e pequenas, a Ponderação Regional é ainda uma das poucas ferramentas disponíveis para a homogeneização de valores diários de precipitação.

2.1.5 – Demanda Ecológica

Segundo MARWELL (1995), considera-se como demanda ecológica a demanda de água mínima necessária para a manutenção da vida aquática nos rios.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

No Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Canindé/Piauí (FAHMA, 2000) foi considerado que a demanda ecológica pode ser obtida diretamente do escoamento superficial disponível através da multiplicação do seu valor por um coeficiente. Tanto no Plano Diretor quanto em MARWELL (1995) foi adotado um coeficiente igual a 0,10, ou seja, a demanda ecológica equivaleria a 10% da disponibilidade de água na forma de escoamento superficial.

2.2 – Avaliação da Disponibilidade Hídrica

A disponibilidade hídrica de uma região é entendida como a soma da vazão regularizada em reservatórios e a disponibilidade hídrica subterrânea. Caso não existam reservatórios, a disponibilidade é calculada a partir da vazão mínima dos rios e da disponibilidade hídrica subterrânea.

Para os rios intermitentes do Nordeste brasileiro que não dispõe de reservatórios com capacidade de regularização plurianual, a disponibilidade hídrica superficial é considerada nula.

2.2.1 – Determinação da Vazão Regularizada

A vazão regularizada é definida em função de uma garantia de oferta de água, determinada em função do uso. O Estado do Ceará, por exemplo, utiliza a vazão regularizada com 90% de garantia na determinação da disponibilidade de referência (SOUSA FILHO e CAMPOS, 1996; STUDART et al., 1997).

O problema do dimensionamento de reservatórios foi inicialmente tratado por W. Rippl, que em 1883, propôs a utilização de um diagrama de volumes acumulados afluentes ao reservatório, o Diagrama de Massas, para a determinação do volume que o mesmo deveria ter para regularizar uma determinada vazão.

Somente com o trabalho de Sudler, em 1927, houve o reconhecimento da natureza estocástica do processo de armazenamento de água em reservatórios (CAMPOS e STUDART, 2000). Sudler escreveu em cartas de baralho os valores da série histórica de

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

vazões. Desta forma, embaralhando-se as cartas e retirando-as aleatoriamente, construía-se novas séries de vazões afluentes a serem consideradas no processo de dimensionamento.

CAMPOS (1996) apresentou um Diagrama Triangular de Regularização que permite estudar o desempenho de reservatórios em processos de estocagem de águas baseados em três parâmetros: coeficiente de variação dos deflúvios anuais (C_v), um fator adimensional de capacidade e um fator adimensional de evaporação. Segundo o autor, o valor de C_v exerce uma grande influência sobre a capacidade de regularização de um reservatório. O aumento de C_v de 0,6 para 1,6 provoca, para o mesmo reservatório, a redução de sua capacidade de regularização de 64% para apenas 27%.

CAMPOS e IBIAPINA (1997) apresentaram uma equação com parâmetros adimensionais para calcular a capacidade de regularização de uma bacia hidrográfica barrada por um reservatório de tamanho infinito. A equação é baseada no coeficiente de variação dos deflúvios anuais (C_v) e em um fator adimensional de evaporação (fE), e tem aplicabilidade a locais com C_v entre 0,6 e 1,6 e fE entre 0,05 e 2,0, valores comuns para as condições do Nordeste Brasileiro.

Com o avanço e a difusão dos microcomputadores e o desenvolvimento de modelos de simulação cada vez mais precisos, a utilização integrada de séries sintéticas de afluências, modelos de simulação e do método de Monte Carlo, possibilita a determinação mais precisa da capacidade de regularização de um reservatório. Como as séries sintéticas são distintas entre si, obtém-se diversos resultados das simulações, ao invés de um único valor que seria obtido da série histórica, o que possibilita extrair mais completamente as informações contidas na série histórica (KELMAN, 1987).

Desta forma, a união entre um modelo gerador de séries sintéticas de vazão e de um modelo de simulação mensal de um reservatório permitiriam uma melhor estimativa da sua capacidade de regularização para diversas garantias de atendimento.

2.2.1.1 – Modelo de Geração de Séries de Vazões

A utilização de séries sintéticas de vazões na análise de projetos de recursos hídricos é necessária devido às insuficiências associadas ao uso apenas da série histórica, em geral muito curtas (GHIRARDI et al., 1995).

De modo geral, os modelos para geração de séries sintéticas de vazões podem ser divididos em dois grupos (FREITAS, 1996a): simulação direta, que geram vazões simultaneamente para diferentes intervalos de tempo, e modelos de desagregação, onde vazões representativas de um período maior (o ano por exemplo) são desagregadas em períodos menores (meses, dias, etc.). Devido a intermitência dos rios nordestinos, FREITAS (1996a) sugere a utilização integrada de um modelo de geração a nível anual e de um modelo de desagregação a nível mensal.

Um modelo simples de geração de séries anuais é o que considera a independência das vazões. Dessa forma, as séries são geradas a partir da utilização de uma distribuição de probabilidade ajustada aos registros históricos (KELMAN, 1987). No caso das vazões apresentarem persistência, vários pesquisadores defendem a utilização do modelo ARMA(1,1) como a melhor forma de representar a estrutura de correlação de séries anuais (STEDINGER et al., 1985). FREITAS (1997) entretanto, afirma que os modelos autorregressivos não conseguem reproduzir satisfatoriamente o caráter de intermitência dos rios do semi-árido nordestino, apresentando, em sua maioria, problemas de superestimação da vazão média mensal.

Desta forma, propõe-se uma abordagem simplificada, com a geração de vazões anuais independentes quanto à magnitude do evento mas considerando a persistência dos estados seco e úmido, através da utilização de uma cadeia de Markov de primeira ordem, afinal quando o objetivo do estudo é o dimensionamento ou a otimização de sistemas de reservatórios, é necessário que as séries sintéticas preservem as estatísticas relacionadas com os períodos de estiagem (GHIRARDI et al., 1995), pois a sucessão cronológica das vazões é de suma importância (VILLELA e MATTOS, 1975).

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Cadeias de Markov descrevem um sistema como um processo estocástico caracterizando-o pelos seus estados e a forma pela qual eles se alternam. Formalmente, pode-se definir a cadeia de Markov por uma matriz de transição em que cada elemento representa a probabilidade de transição entre estados e os elementos diagonais representam o ajuste necessário para que a soma dos elementos de cada linha seja igual a um (FERNANDES, 1999).

Admitindo-se dois estados possíveis para a vazão gerada: abaixo (estado 0) ou acima da média histórica (1), a cadeia de Markov de primeira ordem a ser adotada pode ser definida como (NASCIMENTO, 1989):

$$\begin{array}{c} 0 \quad 1 \\ \left[\begin{array}{cc} P_{00} & 1 - P_{00} \\ 1 - P_{11} & P_{11} \end{array} \right] \end{array}$$

sendo:

P_{00} a probabilidade condicionada de uma vazão abaixo da média ser seguida de outra também abaixo ($P_{00} = p[Q_{i+1} = 0 / Q_i = 0]$);

P_{11} a probabilidade condicionada de uma vazão acima da média ser seguida de outra também acima ($P_{11} = p[Q_{i+1} = 1 / Q_i = 1]$).

Admitiu-se os estados determinados em função da média histórica para seguir a recomendação de DRACUP, et al. (1980) e FREITAS (1997), que consideram como ano seco aquele em que a vazão é inferior à média de longo período e ano úmido o que apresenta vazão superior à média. A geração seguiria então o seguinte algoritmo:

1 – A partir da série histórica de vazões anuais, determina-se a vazão média de longo termo (Q_{ml}).

2 – Classifica-se cada ano da série histórica quanto a ocorrência ou não de seca, comparando-se o valor registrado (Q_i) com a vazão média de longo termo (Q_{ml}) da seguinte forma:

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

se $Q_i < Q_{ml}$ então o ano é seco (estado 0);
senão o ano é úmido (estado 1).

3 - Determina-se a estimativa da probabilidade de ocorrência de dois anos secos em seqüência (persistência do período seco) através da expressão:

$$P_{00} = \frac{N_{00}}{N_{00} + N_{01}} \quad (21)$$

onde:

\hat{P}_{00} é a estimativa da probabilidade da ocorrência de dois anos secos consecutivos;

N_{00} é o número de anos secos seguidos por um outro ano seco;

N_{01} é o número de anos secos seguidos por um ano úmido.

4 – De forma análoga, determina-se a estimativa da probabilidade de ocorrência de dois anos úmidos em seqüência através de:

$$\hat{P}_{11} = \frac{N_{11}}{N_{11} + N_{10}} \quad (22)$$

onde:

\hat{P}_{11} é a estimativa da probabilidade da ocorrência de dois anos úmidos consecutivos;

N_{11} é o número de anos úmidos seguidos por um outro ano úmido;

N_{10} é o número de anos úmidos seguidos por um ano seco.

5 – Determina-se a melhor função distribuição de probabilidade que se ajusta aos dados históricos.

Segundo KELMAN (1987), a distribuição normal é freqüentemente adotada para a modelagem de vazões anuais já que estas representam o resultado da adição de um grande número de variáveis aleatórias (365 vazões diárias). O autor sugere também o uso das distribuição log-normal de 2 ou 3 parâmetros para a modelagem de vazões anuais.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Com foco nos regimes hidrológicos do semi-árido, onde os deflúvios anuais são serialmente independentes, CAMPOS et al. (2000) propõem o uso das funções gama, normal e log-normal para gerações randômicas de deflúvios anuais.

Para a determinação da melhor função distribuição de probabilidade, pode-se utilizar o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. O teste consiste na determinação da maior diferença entre a função de distribuição acumulada do modelo adotado e as frequências relativas acumuladas da série histórica e a comparação deste com um valor crítico tabelado em função do nível de significância e do número de dados. Segundo COSTA NETO (1977), quando os parâmetros da função distribuição de probabilidade forem estimados a partir da série histórica, o teste é válido apenas por aproximação, sendo os valores críticos em geral inferiores aos tabelados (HAAN, 1977).

O ajuste também pode ser avaliado determinando-se as vazões, através do modelo estatístico adotado, correspondentes às frequências acumuladas das vazões observadas, e comparando-se os respectivos pares. A "plotagem" dos pares e a determinação dos coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) podem ser de grande valia na escolha do modelo mais apropriado.

6 – Admite-se o primeiro ano da série como seco, por exemplo, e gera-se um número aleatório entre zero e um. Caso o número gerado seja menor do que a probabilidade de manutenção do estado inicial (P_{00} no exemplo), gera-se um ano seco utilizando-se a função densidade de probabilidade definida no item anterior. Caso contrário, gera-se um ano úmido.

7 – Conhecido o estado atual (seco ou úmido), gera-se um número aleatório entre zero e um. Caso o número gerado seja menor do que a probabilidade de manutenção do estado atual (P_{00} para seco e P_{11} para úmido), gera-se um ano com mesmo estado utilizando-se a função densidade de probabilidade definida no item cinco. Caso contrário, gera-se um ano com estado contrário.

8 – Repete-se o procedimento do item sete até que o número de anos desejados sejam gerados.

Após a geração dos deflúvios anuais, é necessário que os mesmos sejam desagregados em vazões mensais. KENDALL e DRACUP (1992) citam diversos métodos de desagregação contidos na literatura. Um método de desagregação que tem sido aplicado aos rios intermitentes do Nordeste brasileiro e apresentado resultados satisfatórios é o Método dos Fragmentos, proposto por Svanidze em 1980 e utilizado por ARAUJO e CAMPOS (1991), FREITAS (1996a, 1996b, 1997) e SOUZA FILHO e PORTO (1997), entre outros.

2.2.1.1.1 – O Método dos Fragmentos

O Método dos Fragmentos baseia-se na desagregação, em vazões mensais (ou intervalo de tempo menor), de vazões anuais pré-geradas por algum modelo anual. O modelo caracteriza-se pela estimativa, para cada mês e para todos os anos i da série histórica, dos denominados fragmentos, dados por (FREITAS, 1997):

$$f_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{\sum_{j=1}^n Q_{i,j}} \quad (23)$$

sendo:

n É o número de meses ($n = 12$);

$Q_{i,j}$ é a vazão no mês j do ano i .

Os fragmentos $f_{i,j}$ correspondem ao valor percentual da vazão anual (somatório das vazões mensais) no ano i . A seguir os valores anuais históricos de vazão são ordenados de forma crescente e divididos em intervalos de classes. Os limites dos intervalos de classes são formados pela média entre valores sucessivos de vazão. O número total de classes é igual ao número de anos de vazão da série medida. A primeira classe tem como limite inferior zero e a última classe tem limite superior infinito. As vazões anuais geradas são, então, distribuídas conforme os intervalos de classe e fragmentadas em valores mensais.

2.2.1.1.2 – Validação do Modelo

Segundo COSTA NETO (1977), pode-se estimar a média de uma população a partir da média ponderada das médias das diversas amostras desta população tomando-se como fator de ponderação o tamanho de cada amostra. Já quanto à variância, esta também pode ser estimada a partir da média ponderada das variâncias das diversas amostras mas com fator de ponderação igual ao número de graus de liberdade de cada amostra. Considerando-se que cada série gerada pertença à mesma população e que todas possuem o mesmo tamanho, a média ponderada fica, na verdade, reduzida à média aritmética em ambos os casos.

Após a determinação da vazão média da população que origina as séries sintéticas e de sua variância, pode-se verificar a sua semelhança estatística com relação aos valores da série histórica. Segundo HAAN (1979), é possível utilizar o teste t de Student para a verificação da igualdade das médias e o teste F para a verificação das variâncias. Apesar de rigorosamente ambos os testes somente serem aplicáveis à variáveis normalmente distribuídas, KELMAN (1987) afirma que os mesmos são passíveis de aplicação mesmo quando a condição de normalidade não seja atendida.

Para a verificação da média, caso as séries geradas tenham o mesmo tamanho da série histórica, tem-se (HANN, 1979):

$$t = (\bar{X}_o - \bar{X}_g) \cdot \sqrt{\frac{n}{S_o^2 + S_g^2}} \quad (24)$$

onde:

t é o valor da variável t de Student;

\bar{X}_o a vazão média da série histórica observada;

\bar{X}_g a vazão média das séries geradas;

n é o número de dados das séries histórica e geradas;

S_o^2 é a variância da série histórica observada;

S_g^2 é a variância das séries geradas.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

O valor calculado para t deve ser comparado com o valor crítico tabelado em função do nível de significância desejado para $(2n - 2)$ graus de liberdade. Caso ele seja menor que o valor crítico, a hipótese da igualdade das médias deverá ser aceita.

Para a verificação das variâncias, considerando-se novamente que as séries tem o mesmo tamanho, tem-se (HANN, 1977):

$$F = \frac{S_o^2}{Sg^2} \quad (25)$$

onde:

F é o valor do teste F.

O valor calculado para F deve ser comparado com o valor crítico tabelado em função do nível de significância desejado para $(n - 1)$ e $(n - 1)$ graus de liberdade. Caso ele seja menor que o valor crítico, a hipótese da igualdade das variâncias deverá ser aceita. Sugere-se a adoção do nível de significância de 5% para ambos os casos.

Dado o objetivo geral do modelo de gerar séries para a avaliação da capacidade de regularização de um reservatório, propõe-se, ainda, que seja determinada a curva de regularização de um reservatório específico para a série histórica e para cada uma das séries de vazões geradas. É de se esperar que entre as séries geradas ocorram situações mais críticas de baixa afluência que a registrada na série observada. Entretanto, espera-se que, caso o modelo seja adequado, as curvas de regularização “sintéticas” apresentem comportamentos parecidos ao da curva “observada”, sem que haja tendências de sub ou superestimação do volume regularizado.

A curva de regularização pode ser construída a partir do uso de um modelo de simulação de reservatórios fazendo-se variar, de forma crescente, a demanda que representa a vazão a ser regularizada.

Como o objetivo deste conjunto de simulações é avaliar o modelo de geração de vazões, propõe-se que se desconsiderem os efeitos da evaporação. Sugere-se, ainda, adotar o reservatório com 50% de sua capacidade no início da simulação.

2.2.1.2 – Modelo de Simulação de Reservatórios

A vazão regularizada será determinada através da utilização do modelo de simulação em rede de fluxo MODSIM, desenvolvido na Colorado State University por John Labadie, e utilizado com sucesso como instrumento de suporte a decisão no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos (AZEVEDO et al. 1997).

Na escolha do modelo foram determinantes o fato do modelo ser bem documentado e testado em uma variedade de situações e a familiaridade do autor com o mesmo. No Brasil registram-se aplicações do modelo para simular o Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (SOUZA FILHO e PORTO, 1996), o sistema da bacia do rios Itapicurú (PORTO 1999) e Jacuípe na Bahia (PORTO 1997), entre outros.

O MODSIM é um modelo de rede de fluxo de caráter geral e adaptável a diversos tipos de problemas, possibilitando que a maior parte das configurações e estruturas operacionais das bacias hidrográficas possa ser representada por meio da especificação de dados de entrada apropriados. O modelo é capaz de simular um sistema com um ou mais reservatórios mensalmente, fornecendo como dados de saída informações sobre o volume inicial e final, vazão vertida, perda por evaporação e infiltração e vazão fornecida a cada mês para cada reservatório.

No caso de demandas, pode-se avaliar o sistema com uma ou várias demandas, inclusive com prioridades diferentes de uso, como observado nas situações reais. Para o atendimento das demandas o modelo executa a otimização seqüencial sem previsão, podendo ser tratado como um modelo de simulação mediante o qual centenas ou milhares de anos de dados históricos ou sintéticos de vazões podem ser utilizados. Para as demandas são fornecidos, como dados de saída, a vazão requerida, a vazão fornecida e a falha, em volume, ocorrida no atendimento.

2.2.2 – Disponibilidade das Águas Subterrâneas

COSTA (2000) define três tipos de disponibilidades hídricas subterrâneas:

- Disponibilidade Virtual: “parcela que pode ser aproveitada anualmente da potencialidade, correspondendo à vazão anual que pode ser extraída do aquífero ou do sistema aquífero, sem que se produza um efeito indesejável de qualquer ordem”. Para aquíferos interticial em bacias sedimentares, a disponibilidade virtual será igual, no máximo, à potencialidade.
- Disponibilidade Instalada: “volume anual passível de exploração através das obras de captação existentes, com base na vazão máxima de exploração – ou vazão ótima - e num regime de bombeamento de 24 horas diárias, em todos os dias do ano”.
- Disponibilidade Efetiva: “volume efetivamente explorado nas obras existentes”.

Em geral, para a determinação da disponibilidade hídrica de uma região, utiliza-se o conceito de *Disponibilidade Efetiva* (MARWELL, 1995). A disponibilidade seria assim determinada pela multiplicação do número de poços existente pela vazão média extraída dos mesmo. Entretanto, para a gestão efetiva dos recursos hídricos subterrâneos de uma região, e seguindo-se as prerrogativas de uso racional e conservação da água subterrânea, é imprescindível que o gestor disponha da avaliação da *Disponibilidade Virtual* e possa assim planejar a exploração futura ou coibir a utilização excessiva que por ventura esteja acontecendo no presente.

Segundo COSTA (1997) a escola francesa classifica as reservas hídricas subterrâneas em quatro tipos:

- Reservas Reguladoras: representam a quantidade de água livre armazenada pelo terreno aquífero ao curso de uma recarga importante por alimentação natural, estando submetidas ao efeito da sazonalidade e variações interanuais da precipitação;
- Reservas Permanentes: constituem as águas acumuladas que não variam em função das precipitações anuais e permitem uma exploração mais importante;

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- Reservas Totais: são representadas pelo conjunto das reservas permanentes com as reservas reguladoras, constituindo a totalidade da água contida num aquífero;
- Reservas de Exploração: constituem a quantidade máxima de água que poderia ser explorada de um aquífero, sem risco de prejuízo do manancial.

Segundo COSTA e COSTA FILHO (1995), pode-se admitir como recurso explotável o total da reserva reguladora mais um percentual entre 0,2 e 0,5% ao ano das reservas permanentes. Esse valor representa a disponibilidade máxima do aquífero, ou seja, a sua potencialidade. Entretanto os autores ressaltam que parte das reservas reguladoras são responsáveis pela perenização dos rios. Por esta razão, MARWELL (1995) admite apenas a utilização de 1/3 das reservas reguladoras na determinação do recurso explotável.

BEAR (1979), afirma que as principais formas de aporte de água a um aquífero são:

- drenança a partir das camadas limitantes semi-permeáveis inferior ou superior;
- infiltração devido à precipitação na área de afloramento;
- fluxo de retorno a partir da irrigação;
- recargas artificiais;
- infiltração a partir de lagos e cursos d'água influentes.

De forma geral, a fonte primária de recarga natural para a maioria dos aquíferos é a precipitação e a maioria dos aquíferos confinados recebe recarga a partir da drenança vertical de formação geológica sobreposta (CLEARY, 1989).

Observando-se o ciclo natural de movimentação da água no solo, percebe-se que a partir da precipitação ocorre o umedecimento das superfícies secas e a interceptação por agentes não contribuintes, o que proporciona a retirada direta de água por evaporação. Continuando a chuva, a água em excesso começa a infiltrar no solo e a quantidade que excede a capacidade de infiltração escorre pela superfície e sub-superfície. A água infiltrada realimenta o solo até que o mesmo atinja a máxima capacidade de retenção capilar, definida como capacidade de campo. Quando esse valor é ultrapassado inicia-se

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

a recarga dos lençóis profundos. A evapotranspiração nessa fase é primordialmente fruto da transpiração e depende da disponibilidade da água no solo e da retenção capilar.

Assim, a avaliação da recarga profunda pode ser feita através do uso de um modelo matemático de balanço hídrico sequencial diário. FERREIRA e OLIVEIRA (1995) usaram um modelo de balanço hídrico diário, que utiliza o método do Soil Conservation Service - SCS para a determinação da precipitação efetiva para o escoamento superficial, na avaliação da recarga potencial dos aquíferos de Portugal.

O método do SCS foi utilizado por BRAGA, CONEJO e LOPES (1981) para o desenvolvimento de um modelo simplificado de simulação hidrológica para transformação chuva-vazão denominado SMAP. Esse modelo tem apresentado resultados satisfatórios quando aplicado à bacias hidrográficas do Nordeste, principalmente em sua versão diária, como atestam CIRILO et al. (1991), CIRILO e LUCENA (1992) e GÓIS et al. (1996), indicando que uma abordagem semelhante à de FERREIRA e OLIVEIRA (1995) pode ser perfeitamente aplicável às condições do Nordeste Brasileiro.

Logo, uma adaptação do modelo SMAP diário considerando a metodologia apresentada por FERREIRA e OLIVEIRA (1995) para a recarga profunda, atrelado a um modelo gerador de precipitação diárias poderia, perfeitamente, ser utilizado para uma avaliação mais precisa das reservas reguladoras de um aquífero e, conseqüentemente, de sua disponibilidade virtual. Essa informação poderia, então, ser utilizada pelos órgãos gestores dos recursos hídricos para tomada de decisões mais seguras quando da utilização destes recursos.

2.2.2.1 – O Modelo SMAP Diário Modificado

O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido em 1981 por Lopes J.E.G., Braga B.P.F. e Conejo J.G.L., e apresentado no International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling realizado em Mississippi, U.S.A. e publicado pela Water Resources Publications (1982).

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Em sua versão diária, é constituído de três reservatórios matemáticos, como mostra a figura 01:

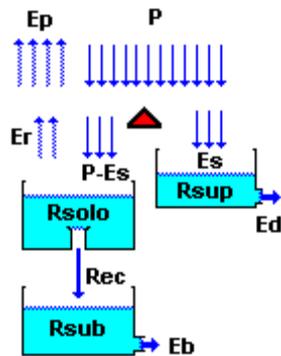


Figura 01 – Esquema do modelo SMAP diário.

Como o objetivo é avaliar a recarga do aquífero e não gerar vazões, o reservatório R_{sup}, que representa o armazenamento de superfície, pode ser desprezado. O reservatório R_{sub}, responsável pela vazão básica, também pode ser desconsiderado. Desta forma, o funcionamento do modelo seria o seguinte:

A cada evento de precipitação (P) é feito um balanço de massa. Uma fração da precipitação é transferida como escoamento superficial (ES) através da equação do SCS. A lâmina restante (P - ES) sofre perda por evaporação até o valor potencial (EP). Dessa forma a lâmina remanescente (P - ES - EP) é adicionada a um reservatório que representa a camada superior do solo. Neste reservatório, a umidade é atualizada ao longo do tempo através de perdas por evapotranspiração real (ER), equivalente a evapotranspiração potencial (EP) vezes a taxa de umidade do reservatório (nível atual (RSOLO) dividido pelo nível máximo, isto é, capacidade de saturação (SAT)).

A outra saída desse reservatório é a recarga do aquífero. Para calculá-la, optou-se por introduzir uma alteração no modelo original, seguindo-se a metodologia empregada por FERREIRA e OLIVEIRA (1995), onde a recarga profunda do aquífero ocorre sempre que a umidade do solo exceder o valor inicialmente determinada para uma variável denominada AGUT, calculada como a coluna de água (mm) necessária para incrementar a umidade do solo do teor mínimo de umidade, correspondente ao ponto de murchamento permanente, até o valor máximo correspondente à capacidade de campo,

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

e dada por:

$$AGUT = pr \cdot (CC - PMP) \quad (26)$$

sendo:

pr a profundidade das raízes (mm);

CC a capacidade de campo do solo (% do volume);

PMP o ponto de murchamento permanente do solo(% do volume).

A capacidade de campo (CC) é considerada como o limite superior da quantidade de água no solo disponível para a alimentação das plantas. Este estado de umidade corresponde a um estado aparentemente de equilíbrio, alcançado depois da drenagem da água gravitacional proveniente de um solo saturado.

O ponto de murchamento permanente (PMP) corresponde ao ponto no qual as plantas não conseguem mais extrair água do solo e se murcham de maneira permanente. Este estado corresponde a um estado de umidade mínimo do solo.

Segundo SAINT-FOULC (1975), o ponto de murchamento é, aproximadamente, igual a 50% da capacidade de campo. Adotando-se a profundidade média das raízes igual a 1,0 (um) metro, tem-se:

$$AGUT = 500 \cdot CC \quad (27)$$

Alguns valores de capacidade de campo em função da textura do solo são apresentados na tabela 03.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Tabela 03 - Propriedades físicas usuais dos solos segundo Israelsen & Hansen

Textura	Peso específico aparente (d) (%)	Capacidade de Campo (CC)		Ponto de Murchamento Permanente (PMP)	
		(%) peso	(%) volume	(%) peso	(%) volume
Arenosa	1,65 (1,55-1,80)	9 (6-12)	14,9 (9,3-21,6)	4 (2-6)	6,6 (3,1-10,8)
Barro-arenosa	1,50 (1,40-1,60)	14 (10-14)	21,0 (14,0-22,4)	6 (4-8)	9,0 (5,6-12,8)
Barro	1,40 (1,35-1,50)	22 (18-26)	30,8 (24,3-39,0)	10 (8-12)	14,0 (10,8-18,0)
Barro-argilosa	1,35 (1,30-1,40)	27 (23-31)	36,5 (29,9-43,4)	13 (11-15)	17,6 (14,3-21,0)
Argilo-arenosa	1,30 (1,25-1,35)	31 (27-35)	40,3 (33,8-47,3)	15 (13-17)	19,5 (16,3-22,9)
Argilosa	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	43,8 (37,2-50,7)	17 (15-19)	21,3 (18,0-24,7)

Fonte: Adaptado de Daker(1969)

O excesso de água constituirá o valor diário da recarga do aquífero.

2.2.2.2 – A Equação do Escoamento do SCS

O Soil Conservation Service (SCS) do Departamento de Agricultura Norte Americano apresenta uma técnica que permite calcular o volume do escoamento superficial através da fórmula:

$$ES = \frac{(P - Ai)^2}{P - Ai + S} \quad (28)$$

sendo:

ES o volume de escoamento superficial (mm);

P a precipitação (mm);

Ai a abstração inicial (mm);

S a abstração potencial (mm);

A abstração potencial (S) corresponde a quantidade máxima de água que pode ser retida no solo e na superfície e é dada por:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (29)$$

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

onde CN é um parâmetro adimensional que depende do tipo de solo, das condições de uso e ocupação do solo e da umidade antecedente, sendo chamado de “número da curva” e variando entre 100 e 0.

Como o modelo é contínuo e faz uma atualização automática da umidade do solo a cada intervalo de tempo, é mais conveniente calcular-se a abstração potencial associando-a ao espaço disponível no reservatório do solo através de:

$$S = SAT - RSOLO \quad (30)$$

onde :

S é a abstração potencial (mm);

SAT é a capacidade de saturação do solo (mm);

RSOLO é a umidade do solo (mm).

A umidade do solo é atualizada a partir da equação:

$$RSOLO (i + 1) = RSOLO (i) + P - ES - ER - REC \quad (31)$$

onde:

P é a chuva (mm);

ES é o escoamento superficial;

ER é a evapotranspiração real;

REC é a recarga subterrânea.

A abstração inicial (A_i) corresponde às perdas iniciais devidas à interceptação e retenção em depressões é dada por:

$$A_i = \frac{5080}{CN} - 50,8 \quad (32)$$

sendo:

A_i a abstração inicial (mm);

CN o “número da curva”.

A abstração inicial também deveria, como ocorre com a abstração potencial (S), ser atualizada a cada intervalo de tempo uma vez que depende, além da cobertura vegetal, do teor de umidade do solo. Segundo BRAGA, CONEJO e LOPES (1981) entretanto, o valor de A_i pode ser adotado constante para bacias rurais pois o valor absoluto de A_i é

pequeno quando comparado aos valores de S e a complexidade operacional de tornar esse parâmetro variável é muito grande.

2.2.2.3 – Parâmetros do Modelo de Recarga

O modelo proposto para a avaliação da recarga possui três parâmetros, sendo que todos eles podem ser avaliados inicialmente através de informação sobre o tipo e o uso do solo da bacia a ser avaliada:

SAT a capacidade de saturação do solo (mm);

Ai a abstração inicial (mm);

CC a capacidade de campo (%).

2.2.2.4 – Resumo do Modelo Adotado

Inicia-se a simulação ao final do período seco, com umidade do solo nula ($RSOLO = 0$). Define-se os valores dos parâmetros SAT, Ai e CC. Para cada dia do ano executa-se o balanço hídrico da seguinte maneira:

1 - Se $P > Ai$

$$S = SAT - RSOLO \quad (33)$$

$$ES = \frac{(P - Ai)^2}{P - Ai + S} \quad (34)$$

$$\text{senão } ES = 0 \quad (35)$$

2 - Se $(P - ES) > EP$

$$ER = EP \quad (36)$$

$$\text{senão } ER = (P - ES) + (EP - (P - ES)) \cdot \frac{RSOLO}{SAT} \quad (37)$$

3 - Se $RSOLO > AGUT$

$$REC = RSOLO - AGUT \quad (38)$$

$$\text{senão } REC = 0 \quad (39)$$

4 – Atualiza-se a umidade do solo por:

$$\text{RSOLO} (i + 1) = \text{RSOLO} (i) + P - \text{ES} - \text{ER} - \text{REC} \quad (40)$$

sendo:

P a precipitação (mm);

ES o escoamento superficial (mm);

S a abstração potencial (mm);

EP a evaporação potencial (mm);

ER a evapotranspiração real (mm);

REC a recarga do aquífero subterrâneo (mm);

RSOLO a umidade do solo (mm).

2.2.2.4 – O Método da SUDENE/ORSTOM

Para bacias sem dados fluviométricos, uma opção para a calibração e verificação dos resultados obtidos pode ser feita através do método da SUDENE/ORSTOM (MOLLE e CADIER, 1992), particularmente desenvolvido e testado para pequenas bacias do Nordeste semi-árido brasileiro para avaliar a lâmina anual média escoada. O método tem apresentado resultados compatíveis com os obtidos através do uso de modelos de simulação (CIRILO et al., 1991).

O método consiste na determinação da lâmina média interanual escoada, baseando-se principalmente na precipitação média anual da região e em um coeficiente relacionado com o comportamento hidrodinâmico dos solos da região estudada. Segundo esse comportamento hidrodinâmico, os solos foram agrupados em uma “classificação hidropedológica” que os identificou a partir das unidades de mapeamento usuais nos levantamentos pedológicos existentes. A classificação associa a cada uma dessas unidades de mapeamento um coeficiente hidrológico L_{600} presente na fórmula de cálculo da lâmina, cuja fórmula tem a forma:

$$L(P) = Cr \cdot C \cdot L_{600} \cdot e^{A \cdot (P-600)} \quad (41)$$

onde:

$L(P)$ é a lâmina média anual escoada (mm);

C é um coeficiente de correção climática;

A é um coeficiente de acréscimo do escoamento;

P é a precipitação média anual (mm);

Cr é um coeficiente de correção de anomalias.

Segundo MOLLE e CADIÉ (1992) o coeficiente de correção de anomalias (Cr) agrega correções devido ao tipo de vegetação, presença de açudes a montante e a presença de solos arenosos profundos nos leitos dos rios e nas partes baixas das vertentes. Esse coeficiente somente deve ser considerado diferente de 1 (um) se forem detectadas anomalias importantes.

O valor do coeficiente de correção climática (C) vale 1 (um) para toda a zona do sertão, que corresponde à quase totalidade do Polígono das Secas. Já o coeficiente A, de forma geral, vale 0,0033.

O coeficiente L_{600} corresponde à lâmina anual média que escoaria em um bacia hidrográfica se essa fosse localizada num local com precipitação média anual de 600 mm, na zona climática “Sertão”. O valor de L_{600} é tabelado em função do tipo de solo ou da unidade de mapeamento pedológico e o seu valor para uma bacia é calculado pela média ponderada com relação à área de cada um dos tipos de solos ou unidades de mapeamentos contidos na mesma. Os valores de L_{600} para os tipos de solo ou unidades de mapeamento para cada estado contido no Polígono das Secas estão disponíveis em MOLLE e CADIÉ (1992). No Anexo II são apresentados os valores determinados para o Estado do Piauí.

2.2.2.5 – O Modelo de Geração de Precipitações Diárias

Apesar da rede pluviométrica do Nordeste dispor de postos do início do século, muitos apresentam uma série de falhas em seus registros. Uma alternativa é a utilização de séries sintéticas de precipitação diária que mantenham as características estatísticas da série histórica, o que possibilita, além da solução do problema de falhas, a estimativa mais fiel das probabilidades associadas à recarga do aquífero pelo uso de séries extensas de precipitação.

CONEJO (1976) apresenta três métodos de geração de séries sintéticas de precipitação diária: o modelo de Brook A. Kraeger, para geração diária simultânea em até três postos; o modelo Mero, para a geração diária em um sítio; e um modelo proposto pelo autor para a geração simultânea em um número qualquer de postos. Dentre todos, o modelo mais simples é o Mero, baseado na hipótese de que a precipitação diária é um processo aleatório independente, e utiliza a distribuição Gumbel tanto para a geração do número de dias chuvosos no mês quanto para a determinação do total precipitado. Apesar da simplicidade, o modelo apresenta resultados satisfatórios quanto à altura da precipitação diária (CONEJO, 1976).

2.2.2.5.1 – O Modelo Mero

Desenvolvido por Felix Mero e apresentado por CONEJO (1976), o modelo Mero foi desenvolvido baseado na hipótese de que a precipitação diária seja um processo aleatório independente, ou seja, admite a inexistência da persistência, tendo sido desenvolvido para geração em um posto pluviométrico, e pode ser dividido em duas fases: determinação dos dias chuvosos; e se choveu no dia, qual o total precipitado.

2.2.2.5.1.1 – Determinação dos dias chuvosos

Nesta fase o modelo gera inicialmente o número de dias chuvosos em um mês, e em seguida distribui aleatoriamente esses dias ao longo do mesmo, caracterizando os dias chuvosos.

É adotado que a distribuição de probabilidades do número de dias de chuva num mês seja a de Gumbel. A função de probabilidades acumulada de uma distribuição Gumbel pode ser expressada por:

$$(1 - P) = e^{-e^{-Y}} \quad (42)$$

onde:

$$Y = \frac{X - X_m}{0,7797 \cdot \sigma} \quad (43)$$

sendo:

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

$(1 - P)$ é a probabilidade da variável X ser maior ou igual a um dado valor;

e é base dos logaritmos Neperianos;

X é o número de dias de chuva no mês;

X_m a moda do número de dias de chuva no mês e dada por:

$$X_m = \bar{X} - 0,45 \cdot \sigma \quad (44)$$

σ é desvio padrão do número de dias de chuva no mês;

\bar{X} é a média dos dias de chuva no mês.

Tomando-se a transformada bi-logarítmica da equação (42) tem-se:

$$Y = -\ln(-\ln(1 - P)) \quad (45)$$

Da equação (41) pode-se calcular o número de dias de chuva no mês, tendo-se então:

$$X = 0,7797 \cdot \sigma \cdot Y + X_m \quad (46)$$

Portanto, para obtenção do número de dias de chuva no mês é preciso determinar σ , X_m e Y . O desvio padrão (σ) e a média (\bar{X}) são determinados a partir da série histórica. O valor da moda (X_m) é calculado a partir da equação (44). Gerando-se valores de Y , ou seja, números pseudo-aleatórios de uma distribuição Gumbel, com o auxílio de números pseudo-aleatórios de distribuição uniforme (P), determina-se o número de dias de chuva no mês.

Para caracterizar quais são os dias chuvosos nesse mês, é admitido que os mesmos distribuem-se aleatoriamente no mês. Portanto, para escolha dos dias chuvosos no mês, lança-se mão do algoritmo:

$$\text{Dia Chuvoso} = \langle n \cdot t \rangle \quad (47)$$

onde:

$\langle n \cdot t \rangle$ é o valor inteiro do produto $n \cdot t$;

n é o número de dias no mês;

t é uma variável pseudo-aleatória de distribuição uniforme entre zero e um.

Gerando-se tantos números pseudo-aleatórios quanto o número de dias de chuva no

mês, pelo algoritmo, obtém-se todos os dias chuvosos.

2.2.2.5.1.2 – Determinação dos Totais Precipitados

De posse dos dias chuvosos, para se determinar as alturas de chuva precipitadas naqueles dias Felix Mero adotou que o evento chuva diária tenha distribuição Gumbel, assim como o número de dias de chuva no mês.

A partir da média e do desvio padrão da chuva diária histórica, e com o auxílio da geração de números pseudo-aleatórios de distribuição Gumbel através das mesmas equações utilizadas para o número de dias de chuva, calcula-se as alturas de chuvas diárias nos dias chuvosos da fase anterior.

2.2.2.5.2 – O Modelo Mero Modificado

Dada a incapacidade do modelo Mero de considerar satisfatoriamente a seqüência de dias chuvosos, ou seja, a persistência do período chuvoso (CONEJO, 1976), propõe-se uma adaptação no modelo original para que esta característica seja considerada.

Em geral, a probabilidade de ocorrência ou não da precipitação diária pode ser modelada através de matrizes de transição, supondo-se uma dependência simples como a postulada numa cadeia de Markov (RIGHETTO, 1998). Desta forma, propõe-se a adoção de uma cadeia de Markov de primeira ordem para induzir ao modelo Mero à consideração da persistência na geração das precipitações diárias.

Como o modelo original consegue reproduzir muito bem o número de dias de chuva e o total precipitado, serão mantidas as etapas de geração destas características a partir do uso da distribuição Gumbel.

Considerando-se que existam apenas dois estados possíveis para um dia: chuvoso (0) ou não chuvoso (1), a cadeia de Markov de primeira ordem adotada é definida como:

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

$$\begin{array}{c} 0 \quad 1 \\ \left[\begin{array}{cc} P_{00} & 1 - P_{00} \\ 1 - P_{11} & P_{11} \end{array} \right] \end{array}$$

sendo:

P_{00} a probabilidade condicionada de um dia chuvoso ser seguido de outro dia também chuvoso ($P_{00} = p[P_{i+1} = 0 / P_i = 0]$);

P_{11} a probabilidade condicionada de uma vazão acima da média ser seguida de outra também acima ($P_{11} = p[P_{i+1} = 1 / P_i = 1]$).

P_i o estado registrado para o dia i (0 chuvoso, 1 não chuvoso).

As probabilidades P_{00} e P_{11} podem ser estimadas através da chuva observada por:

$$\hat{P}_{00} = \frac{N_{00}}{N_{00} + N_{01}} \quad (48)$$

$$\hat{P}_{11} = \frac{N_{11}}{N_{11} + N_{10}} \quad (49)$$

onde:

\hat{P}_{00} é a estimativa da probabilidade de persistência do período chuvoso;

N_{00} é o número de dias chuvosos seguidos por um outro dia chuvoso observados na série histórica;

N_{01} é o número de dias chuvosos seguidos por um dia seco observados na série histórica;

\hat{P}_{11} é a estimativa da probabilidade de persistência do período seco;

N_{11} é o número de dias sem chuva seguidos por um outro dia não chuvoso observados na série histórica;

N_{10} é o número de dias sem chuva seguidos por um dia chuvoso observados na série histórica.

Dada a grande variabilidade das chuvas no Nordeste, optou-se por considerar o mês como período homogêneo. Desta forma, serão determinados para cada mês a média e o

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

desvio padrão do número de dias de chuva, a média e o desvio padrão do total precipitado e a probabilidade de persistência do período seco e do período chuvoso.

Desta forma, o modelo apresenta o seguinte algoritmo:

- 1 – Para cada mês determina-se o número de dias chuvosos de acordo com o modelo original (item 2.2.2.5.1.1);
- 2 – Gera-se um número aleatório de distribuição uniforme entre 0 e 1. Se o número é menor que P_{11} o próximo dia é chuvoso, senão é seco;
- 3 – Repete-se, sempre respeitando a persistência ou não do estado atual, até que tenha sido gerados todos os dias chuvosos. Caso tenha-se superado o número de dias no mês, repete-se a partir do passo 2;
- 4 – Após a determinação dos dias chuvosos, gera-se o total precipitado de acordo com o modelo original (item 2.2.2.5.1.2);
- 5 – Repete-se todo o processo para o número de anos desejados.

Em geral o modelo tem dificuldades de gerar, a partir da cadeia de Markov, o mesmo número de dias chuvosos previamente gerados pela distribuição Gumbel, em especial quando este valor de dias chuvosos é superior a 10 dias, tornando assim a geração muito lenta.

Para contornar esta dificuldade sugere-se a adoção de duas cadeias de Markov de primeira ordem para cada mês: uma primeira para quando o número total de dias chuvosos for menor ou igual a dez dias e uma segunda para mais de dez dias chuvosos dentro do mês.

É importante ressaltar, entretanto, que a consideração da persistência do período chuvoso somente é factível para meses com precipitação média alta. Meses secos, com precipitação média inferior a 30 mm, devem ter suas precipitações diárias geradas segundo o modelo original, com a distribuição aleatória dos dias chuvosos.

Como a ocorrência de meses com mais de 20 dias de chuva é um fato raro no Nordeste semi-árido, sugere-se que, quando for gerado pela distribuição Gumbel um número de

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

dias chuvosos superior a este valor, os dias não chuvosos sejam distribuídos de forma aleatória pelo mês, semelhante ao que faz o modelo Mero para os dias chuvosos.

Desta forma, o modelo necessita, como dados de entrada:

- da média e desvio padrão do número de dias de chuva para cada mês;
- da média e desvio padrão da altura da chuva diária para cada mês;
- das probabilidades de persistência do período chuvoso e não chuvoso para cada mês quando o número total de dias chuvosos é menor ou igual a dez dias;
- das probabilidades de persistência do período chuvoso e não chuvoso para cada mês quando o número total de dias chuvosos é maior do que dez dias;
- da indicação dos meses em que a persistência será considerada, ou seja, os meses com precipitação média superior a 30 mm.

Assim se o mês não for chuvoso (média inferior a 30 mm) a geração é feita através do modelo Mero original, com a distribuição aleatória dos dias chuvosos. Caso o mês seja chuvoso, a geração se dará de uma das seguintes formas:

- o número de dias chuvosos gerado ($nd \leq 10$): o modelo considera a probabilidade da persistência do período chuvoso e não chuvoso determinada a partir dos dados históricos para o mês correspondente onde o número total de dias de chuva foi igual ou inferior a dez dias;
- $10 < nd \leq 20$: o modelo considera a probabilidade da persistência do período chuvoso e não chuvoso determinada a partir dos dados históricos para o mês correspondente onde o número total de dias de chuva foi superior a dez dias;
- $nd > 20$: o modelo simplesmente distribui os dias não chuvosos de forma aleatória durante o mês.

2.2.2.5.3 – Verificação da Adequabilidade do Modelo Mero Modificado

A avaliação do desempenho do modelo pode ser realizada através da comparação dos valores médios de um grande número de séries sintéticas com o mesmo tamanho da série histórica com os valores observados das seguintes estatísticas:

- Precipitação média diária para cada mês;

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- Desvio padrão da precipitação diária para cada mês;
- Média do número de dias de chuva em cada mês;
- Desvio padrão do número de dias de chuva em cada mês;
- Precipitação média mensal;
- Precipitação média anual de longo período;
- Persistência do período chuvoso;
- Persistência do período seco.

É importante ressaltar que o modelo também deve ser capaz de reproduzir a ocorrência de anos secos e úmidos da série histórica. Para avaliar se o modelo consegue reproduzir convenientemente esta característica, sugere-se a utilização da metodologia apresentada por MEDEIROS et al. (1996) para classificar o “estado” de um ano a partir da precipitação anual:

- Extremamente seco: $PA_i < 50\% PAM$
- Seco: $51\% PAM < PA_i < 70\% PAM$
- Ligeiramente seco: $71\% PAM < PA_i < 90\% PAM$
- Normal: $91\% PAM < PA_i < 110\% PAM$
- Ligeiramente chuvoso: $111\% PAM < PA_i < 130\% PAM$
- Chuvoso: $131\% PAM < PA_i < 150\% PAM$
- Extremamente chuvoso: $PA_i > 150\% PAM$

Sendo:

PAM a precipitação anual média climatológica;

PA_i a precipitação anual de cada ano da série histórica.

3 – VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para permitir a aplicação e validação dos modelos de geração estocástica de vazões mensais e de precipitações diárias foram desenvolvidas duas planilhas no programa EXCEL contendo uma série de “macros” escritas em Visual Basic for Application (VBA). Apesar do desempenho inferior ao de um programa independente, optou-se por esta solução pela sua facilidade de difusão dada a grande popularidade do programa EXCEL.

3.1 – Modelo de Geração de Vazões

Como explicitado no item 2.2.1.1, o objetivo do modelo de geração de séries sintéticas de vazões é permitir a manutenção, nas séries anuais geradas, da persistência dos períodos secos e úmidos observados na série original, bem como a manutenção da média e do desvio padrão, utilizando para tal mister uma cadeia de Markov de primeira ordem aliada à uma função distribuição de probabilidade.

Para a avaliação do modelo, foram comparadas as curvas de regularização de um reservatório específico a partir da série histórica e a partir de cada uma das séries geradas. O modelo deve ser capaz de gerar vazões que ocasionem curvas de regularização superiores e inferiores à da série histórica, não apresentando, entretanto, tendência para uma ou outra situação.

Para conseguir tal objetivo, foi criada uma pasta no programa EXCEL contendo nove planilhas, cada uma correspondente a uma das etapas de geração. A função de cada planilha é descrita a seguir:

3.1.1 – Descrição da Pasta "Regularização.xls"

3.1.1.1 – Série Histórica

Esta planilha permite a entrada, pelo usuário, das vazões mensais observadas, devendo ser indicado também o ano das observações. De maneira geral, apenas as células brancas devem ser editadas pelo usuário. Os resultados ou parâmetros calculados de forma automática são apresentados em células cinzas, que não devem ter seu conteúdo alterado. Esta codificação de cores é válida para todas as planilhas.

3.1.1.2 – Fragmentos

Esta planilha calcula os fragmentos da série histórica armazenada na planilha “Série Histórica” de forma automática, segundo a metodologia apresentada no item 2.2.1.1.1. Para obter os fragmentos automaticamente, basta ao usuário pressionar o botão “Obter Fragmentos”. Esta planilha não requer a edição de nenhuma célula pelo usuário.

3.1.1.3 – Ajuste Normal

Nesta planilha é determinada a distribuição normal que se ajusta às vazões médias anuais observadas, caracterizada pela média e desvio padrão dos valores registrados. Além das características da distribuição, são calculados de maneira automática a frequência relativa acumulada e a probabilidade de não excedência, de acordo com a distribuição normal ajustada, para cada vazão observada. A diferença entre o valor empírico e o calculado pela distribuição são utilizados para efetuar o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, cujo resultado de aceitação, ou não, também é apresentado pela planilha.

Além do teste de Kolmogorov-Smirnov, a planilha também oferece a comparação gráfica entre as vazões observadas e as vazões correspondentes às suas frequências observadas de acordo com a distribuição ajustada, sendo também indicado o valor do coeficiente de determinação R^2 do ajuste entre as descargas observadas e calculadas.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Estas ferramentas complementares auxiliam o usuário a escolher a melhor distribuição entre as três disponíveis: normal, log-normal e gama.

O botão “Limpar” prepara a planilha para novos dados e o botão “Ajustar” preenche todas as células e o gráfico de forma automática. Ao usuário cabe apenas preencher as células em branco com a série histórica observada. A figura 02 apresenta um exemplo de aplicação desta planilha.

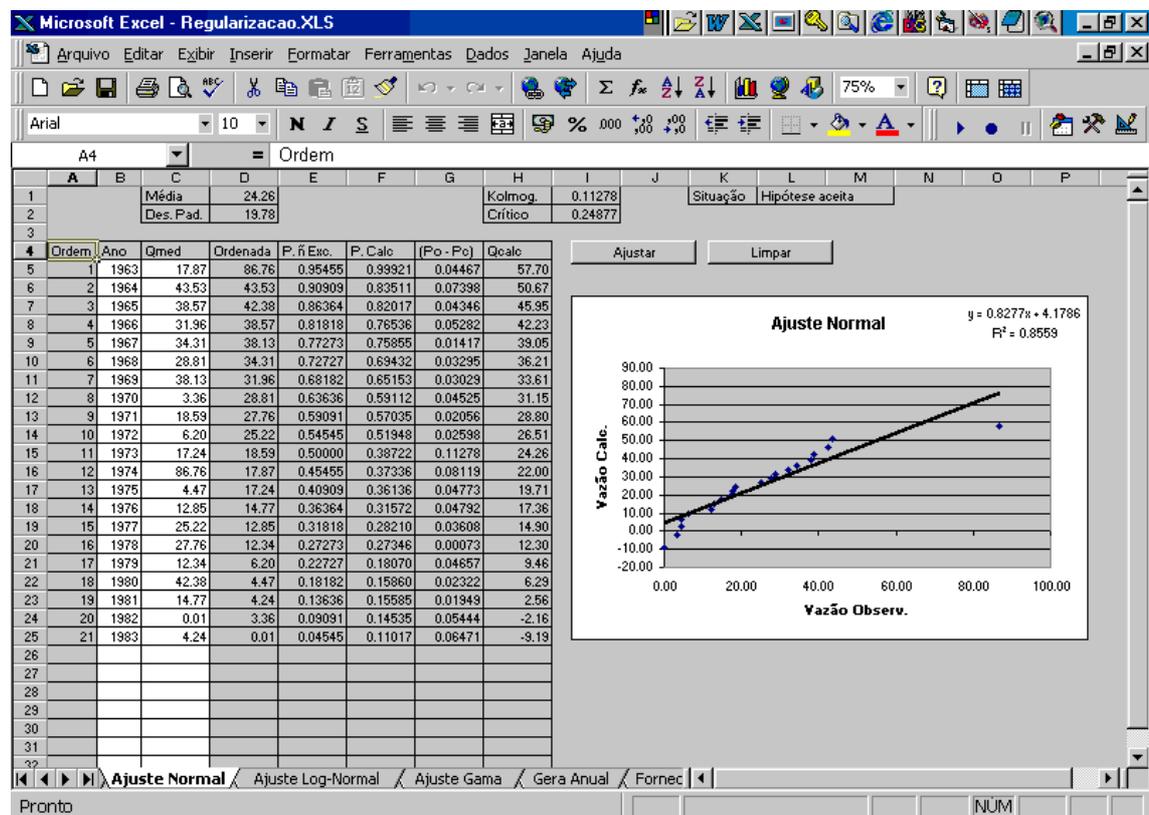


Figura 02 – Exemplo de aplicação da planilha “Ajuste Normal”

3.1.1.4 – Ajuste Log-Normal

Esta planilha é responsável pela determinação da distribuição log-normal que se ajusta às vazões médias anuais observadas. Possui as mesmas ferramentas da planilha anterior.

3.1.1.5 – Ajuste Gama

De funcionamento semelhante às duas planilhas anteriores, nesta é possível determinar a distribuição gama incompleta que melhor se ajusta aos dados históricos pelo método da máxima verossimilhança.

3.1.1.6 – Gera Anual

Esta planilha é responsável pela geração das vazões anuais de acordo com a função distribuição de probabilidades escolhida pelo usuário, pela fragmentação destas em vazões mensais e pela determinação das curvas de regularização de um reservatório específico para cada série gerada a partir da utilização do modelo de simulação em rede de fluxo MODSIM.

A planilha também retira automaticamente da série histórica as probabilidades de persistência do período seco e úmido e a vazão média anual, dados necessários para a geração das vazões de acordo com o modelo proposto no item 2.2.1.1, através do botão “Retirar da Série Histórica”.

O usuário deve indicar o número de séries simuladas, número de anos por série e os dados necessários para a determinação da vazão regularizada: volumes máximo, mínimo e inicial do reservatório em 1.000 m³; demanda inicial, final e o incremento desejado, em m³/s; as curvas cota x área x volume do reservatório; e a evaporação efetiva, resultante da subtração da precipitação provável (item 2.1.4.2) da evaporação, para cada mês.

Como resultado são apresentadas, para as séries geradas, as médias das seguintes estatísticas: vazão média; desvio padrão das vazões; número de anos secos; número de anos úmidos; probabilidade de persistência do período seco (Pss); e probabilidade de persistência do período úmido (Puu).

Resultados relativos à vazão regularizada e às séries anuais geradas são apresentadas nas quatro planilhas subseqüentes.

3.1.1.8 – Garantia

Esta planilha apresenta a garantia de fornecimento da vazão demandada segundo a simulação mensal do reservatório. Para calcular a garantia adotou-se o conceito de falha de fornecimento. Para este trabalho, considerou-se a ocorrência de uma falha quando, em um mês qualquer, não foi possível satisfazer plenamente a vazão demandada, independente da magnitude do déficit ocorrido. Desta forma, a garantia pode ser calculada por:

$$\text{Garantia} = 1 - \frac{N_f}{N_m} \quad (50)$$

sendo:

N_f o número de falhas na satisfação da demanda observadas na série;

N_m o número de meses da série.

3.1.1.9 – Anual

A planilha “Anual” trás as séries anuais geradas e as suas principais estatísticas: número de anos secos gerados, número de anos úmidos, persistência do período seco, persistência do período úmido, vazão média e desvio padrão das vazões geradas.

3.1.1.10 – Curvas

Esta planilha apresenta as curvas de regularização do reservatório para cada série, montadas a partir da planilha “Fornecida”. A análise destes gráficos, regularizada a partir do posicionamento das diversas curvas com relação à curva obtida pela simulação da série histórica, permite avaliar se o modelo apresenta, ou não, tendência de sub ou superestimação da vazão. Caso o modelo seja adequado, é de se esperar que as curvas se distribuam de forma equilibrada ao redor da “curva histórica”.

3.1.2 – Validação

Para validar o modelo foram escolhidas seções em três rios do semi-árido piauiense que apresentam caráter intermitente: rio Itaim em Santa Cruz, rio Canindé em Francisco Ayres e rio Piauí na barragem Jenipapo. A tabela 04 apresenta as características principais das três situações adotadas e os seus respectivos valores obtidos a partir da geração de 50 séries sintéticas com igual duração da série observadas.

Tabela 04 - Características principais observadas e obtidas a partir da utilização do modelo para as seções dos rios consideradas

Característica	Rio Itaim em Santa Cruz		Rio Canindé em Francisco Ayres		Rio Piauí na Barragem Jenipapo	
	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.
Vazão média anual	12,73	12,24	40,61	39,17	24,26	29,10
Desv. padrão das vazões anuais	16,42	19,01	39,03	38,06	19,78	25,20
Número de anos	28	28	28	28	21	21
Número de anos secos	21	21,74	18	19,48	11	10,36
Número de anos úmidos	7	6,26	10	8,52	10	10,64
Persistência do período seco	0,75	0,74	0,71	0,72	0,60	0,58
Persistência do período úmido	0,14	0,14	0,40	0,38	0,60	0,58

A tabela 05 apresenta o resultado dos testes de semelhança estatística das séries geradas com relação à série histórica observada. Os valores críticos dos teste “t” e “F” foram obtidos em HAAN (1979).

Tabela 05 - Testes de igualdade estatísticas entre as séries anuais geradas e observadas

Teste	Rio Itaim em Santa Cruz	Rio Canindé em Francisco Ayres	Rio Piauí na Barragem Jenipapo
t	0,10	0,14	0,69
t_{crítico} (95%)	1,67	1,67	1,68
Hipótese de igualdade	Aceita	Aceita	Aceita
F	0,75	1,05	0,62
F_{crítico} (95%)	1,84	1,84	2,12
Hipótese de igualdade	Aceita	Aceita	Aceita

Os resultados apresentados mostraram-se promissores, indicando que o modelo de geração proposto é capaz de preservar, além da média e da variância, a persistência dos períodos seco e úmido.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Confirmada a igualdade estatística, partiu-se para a construção das curvas de regularização de um reservatório qualquer. Por simplificação foi adotado um único reservatório para as três situações, com volume inicial igual a 50% da capacidade máxima, tendo sido desconsiderada a evaporação como sugerido no item 2.2.1.1.2. As curvas de regularização obtidas são apresentadas nas figuras 04, 05 e 06 tendo em destaque, em linha mais grossa e marcadores, a curva obtida a partir da série histórica.

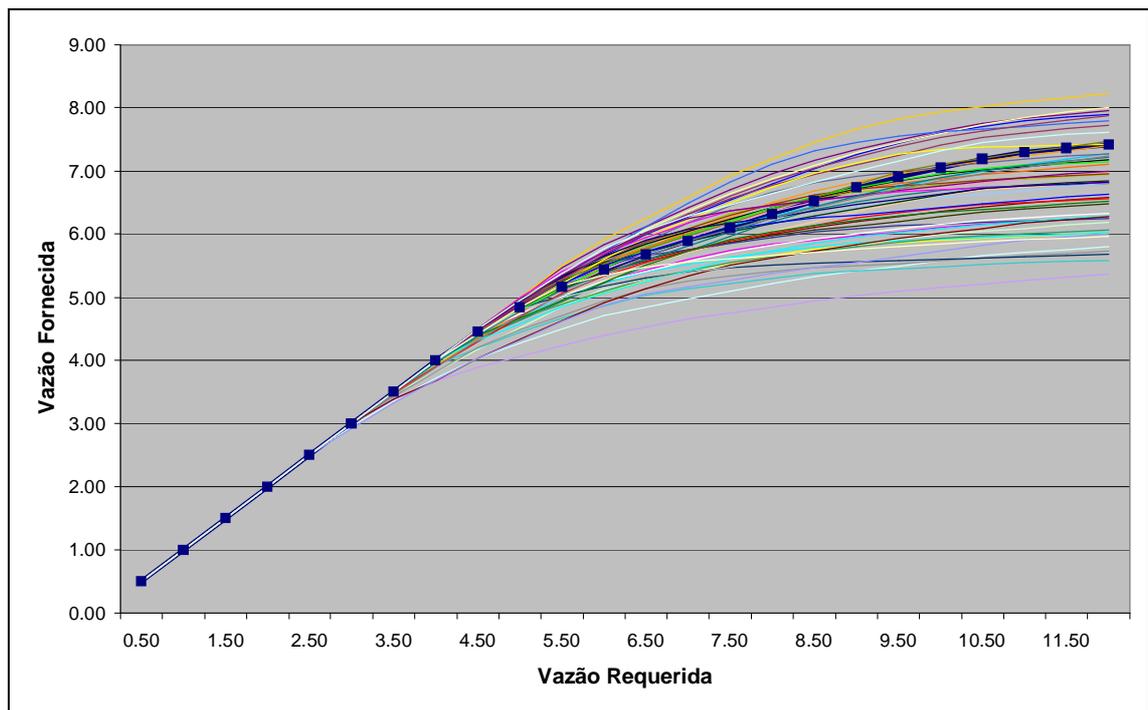


Figura 04 - Curvas de regularização para o rio Itaim em Santa Cruz

Como pode ser notado nos gráficos, o modelo apresentou uma ligeira tendência a superestimar as curvas de regularização quando os valores observados apresentam uma elevada persistência do período úmido, como é o caso do rio Piauí na Barragem Jenipapo (60 %). Valores baixos de persistência parecem provocar uma subestimação da vazão regularizada, com uma grande concentração de curvas abaixo da “curva histórica”, como é o caso do rio Itaim em Santa Cruz, que apresenta uma persistência do período úmido em torno de 15%.

A partir destes resultados, resolveu-se construir as curvas de regularização utilizando-se a geração de vazões anuais totalmente independentes, desconsiderando as persistências

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

dos períodos seco e úmido. As curvas obtidas são apresentadas nas figuras 07, 08 e 09 e um resumo dos resultados é apresentado na tabela 06.

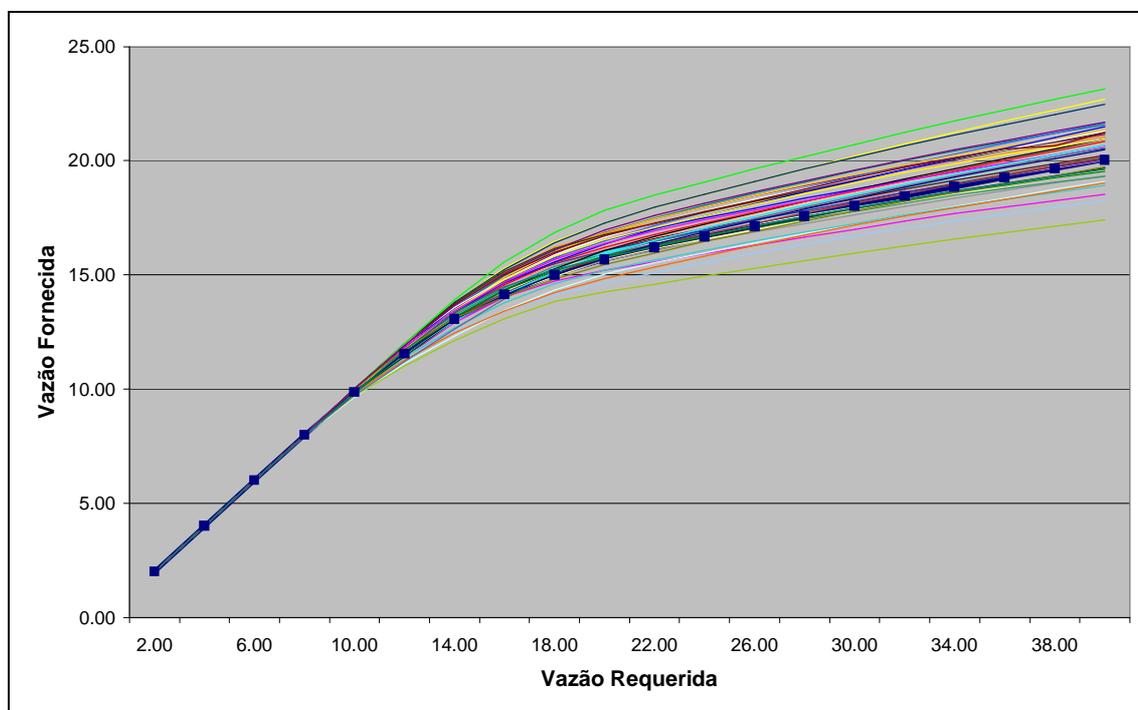


Figura 05 - Curvas de regularização para o rio Canindé em Francisco Ayres

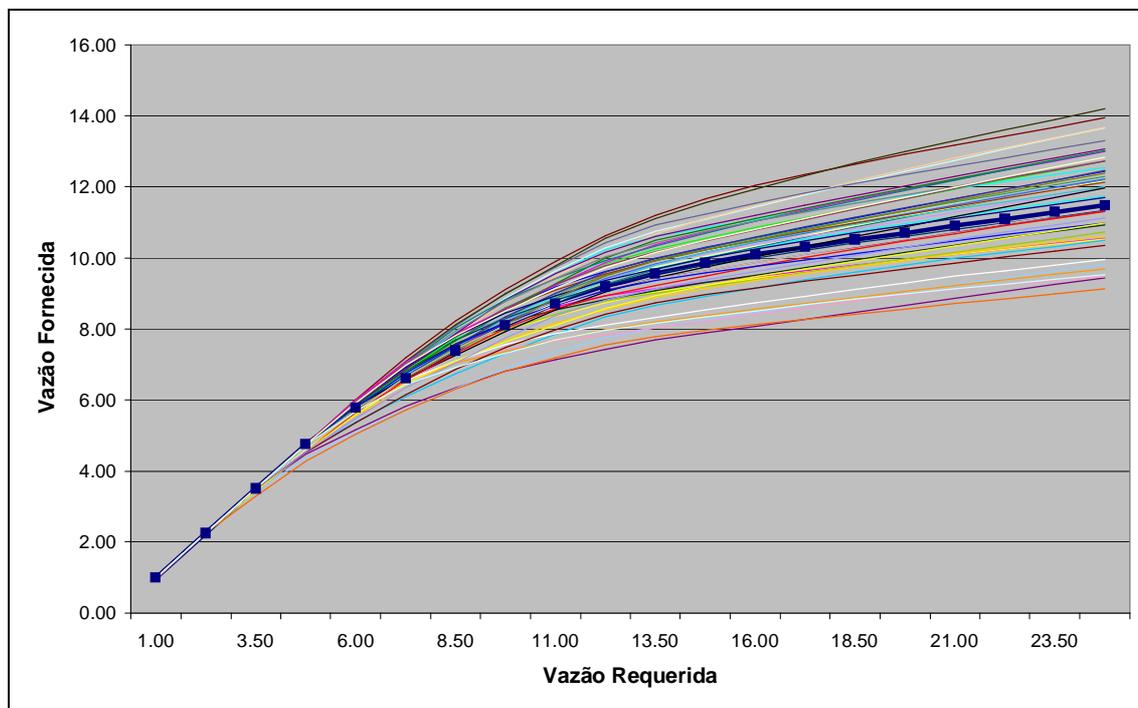


Figura 06 - Curvas de regularização para o rio Piauí na Barragem Jenipapo

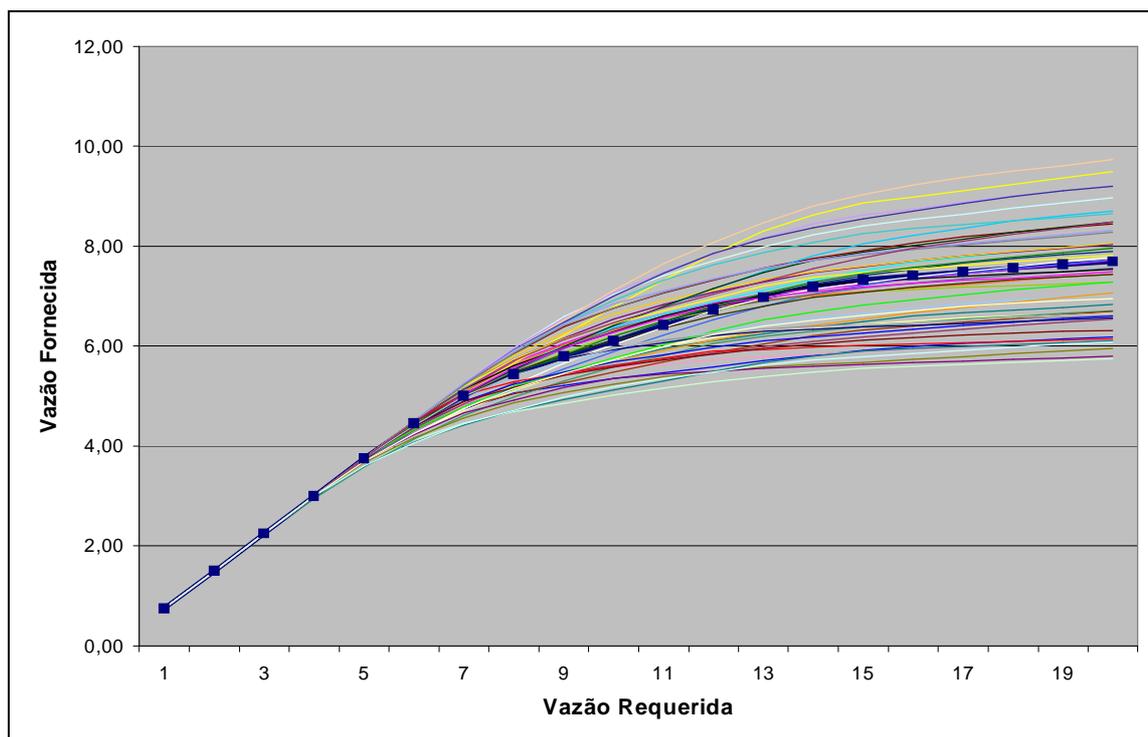
Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Figura 07 - Curvas de regularização para o rio Itaim em Santa Cruz com geração independente de vazões anuais

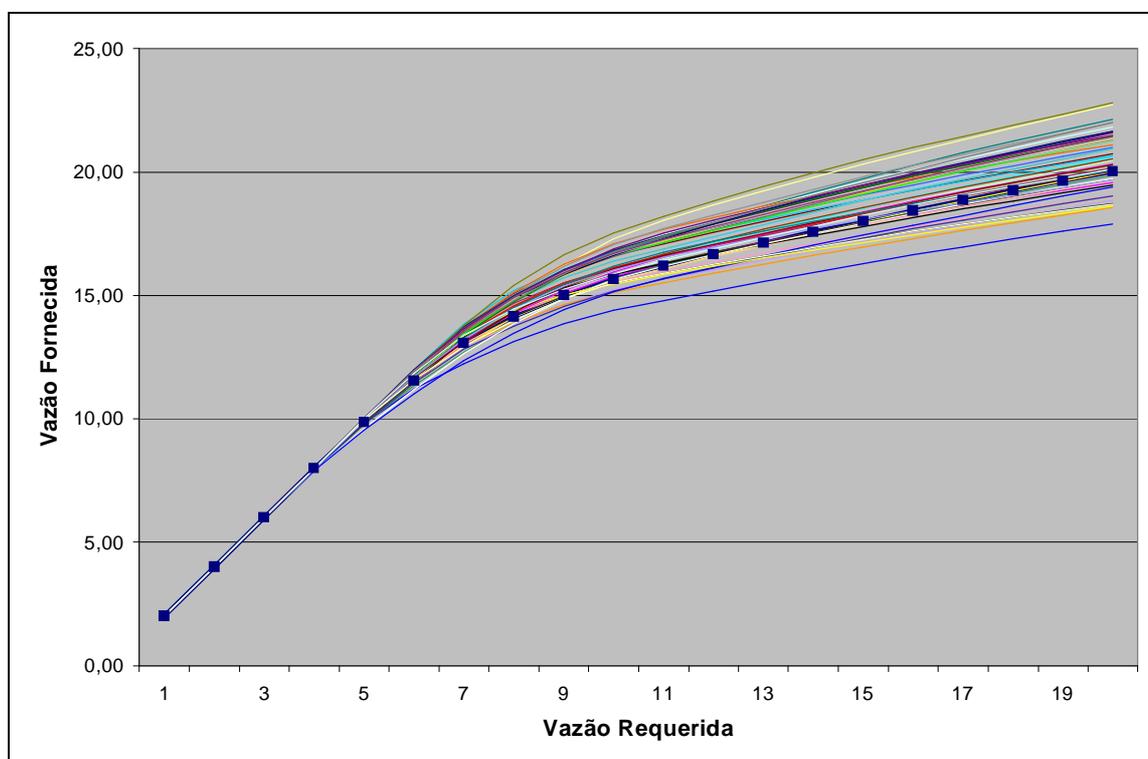


Figura 08 - Curvas de regularização para o rio Canindé em Francisco Ayres com geração independente de vazões anuais

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

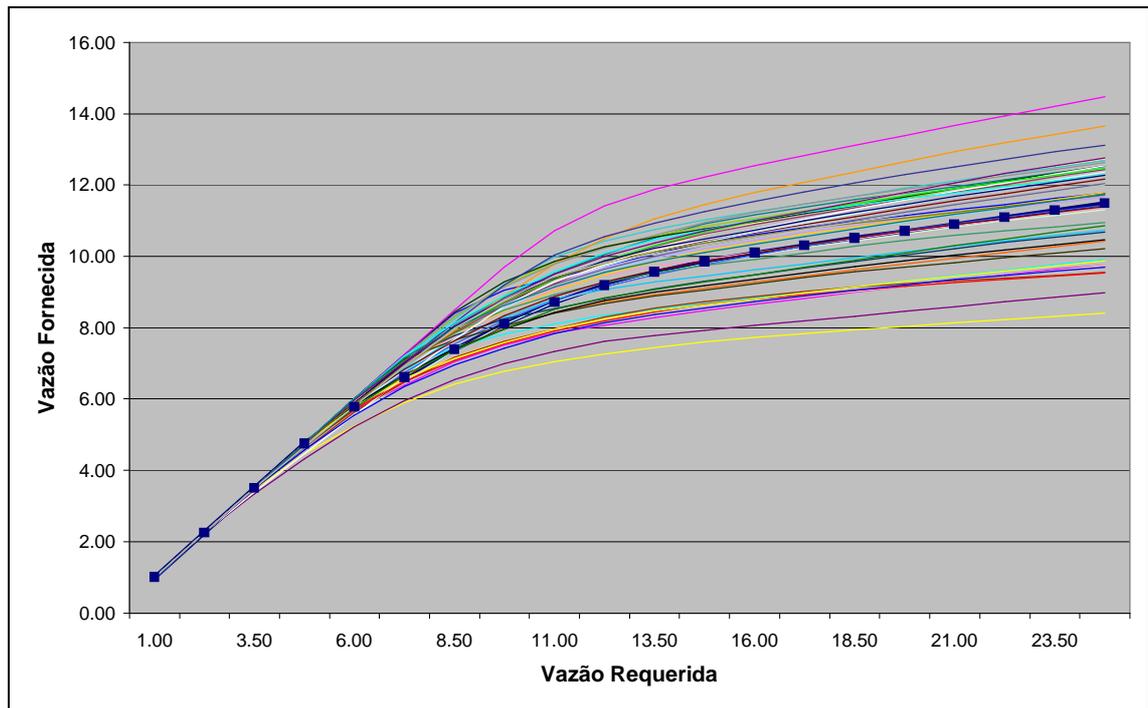


Figura 09 - Curvas de regularização para o rio Piauí na Barragem Jenipapo com geração independente de vazões anuais

Tabela 06 - Características principais observadas e obtidas a partir da utilização da geração de vazões anuais independente para as seções dos rios consideradas

Característica	Rio Itaim em Santa Cruz		Rio Canindé em Francisco Ayres		Rio Piauí na Barragem Jenipapo	
	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.
Vazão média anual	12,73	14,29	40,61	42,40	24,26	24,08
Desv. padrão das vazões anuais	16,42	20,52	39,03	39,81	19,78	24,12
Número de anos	28	28	28	28	21	21
Número de anos secos	21	19,42	18	17,84	11	13,51
Número de anos úmidos	7	8,58	10	10,16	10	7,49
Persistência do período seco	0,75	0,65	0,71	0,61	0,60	0,62
Persistência do período úmido	0,14	0,26	0,40	0,34	0,60	0,33

Observou-se, de maneira geral, que a geração de vazões anuais independentes se mostrou mais estável, com relação às curvas de regularização, do que o modelo proposto, ainda que as séries geradas não preservem as características de persistência, como mostra a tabela 06. Os resultados parecem indicar que a consideração da persistência dos períodos secos e úmidos na geração de séries sintéticas de vazões não acarreta melhoras significativas na estimativa da vazão regularizada por um

reservatório, podendo inclusive, em alguns casos, influir de forma inadequada nesta estimativa.

3.2 – Modelo de Geração de Precipitações Diárias

Para a geração das precipitações diárias segundo o modelo “Mero Modificado”, descrito no item 2.2.2.5.2, criou-se, inicialmente, uma pasta no programa EXCEL denominada “PrecDiaria.xls” contendo uma série de “macros” programadas em VBA capaz de retirar de uma série histórica de precipitações diárias os dados de entrada do modelo: média e desvio padrão do número de dias de chuva; média e desvio padrão da chuva diária; probabilidades de persistência do período chuvoso e não chuvoso para cada mês quando o número total de dias chuvosos é menor ou igual a dez dias; e probabilidades de persistência do período chuvoso e não chuvoso para cada mês quando o número total de dias chuvosos é maior do que dez dias.

Considerou-se, na elaboração do arquivo EXCEL, a mesma organização da série histórica de precipitações diárias utilizada no Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Piauí – SIRHPI, utilizado pela Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Piauí – SEMAR, que utiliza um banco de dados com 33 colunas: a primeira indica o ano, a segunda o mês e as 31 colunas seguintes registram as precipitações diárias correspondentes aos meses indicados em cada linha. Valores inexistentes ou não registrados são identificados com o valor de “-1”. Um exemplo dos parâmetros obtidos é apresentado na figura 10.

Para a validação do modelo “Mero Modificado” foi elaborada uma outra pasta, denominada “MeroModif.xls” com o objetivo de gerar um grande número de séries diárias e comparar suas estatísticas médias com os valores observados. As planilhas que compõe esta pasta e suas funções principais são descritas a seguir.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Microsoft Excel - PrecDiaria.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Arial 10 =Num_Dias!B7

Botão Obter Dados

Nº de Dias Chuvosos			Altura Precipitada			Persistência						
Mês	Média	D.P.	Mês	Média	Média	Mês	Geral		Secos		Chuvosos	
							Seco	Chuv.	Até 10	> 10	Até 10	> 10
Jan	8,62	5,67	Jan	12,10	18,66	Jan	0,79	0,51	0,84	0,65	0,22	0,63
Fev	8,42	5,55	Fev	12,24	15,31	Fev	0,76	0,48	0,81	0,54	0,29	0,63
Mar	9,20	6,10	Mar	13,70	16,23	Mar	0,77	0,50	0,81	0,59	0,29	0,66
Abr	5,55	4,40	Abr	13,29	17,29	Abr	0,84	0,40	0,86	0,66	0,32	0,54
Mai	1,31	1,84	Mai	6,13	10,77	Mai	0,94	0,25	0,94	0,94	0,25	0,00
Jun	0,28	0,66	Jun	1,72	2,62	Jun	0,96	0,05	0,96	0,96	0,05	0,00
Jul	0,08	0,41	Jul	1,88	1,98	Jul	0,96	0,00	0,96	0,96	0,00	0,00
Ago	0,13	0,34	Ago	3,86	4,15	Ago	0,96	0,00	0,96	0,96	0,00	0,00
Set	0,44	0,79	Set	13,46	13,07	Set	0,96	0,26	0,96	0,96	0,26	0,00
Out	2,27	2,83	Out	9,03	12,38	Out	0,92	0,30	0,92	0,75	0,29	0,55
Nov	6,17	5,45	Nov	13,82	18,16	Nov	0,84	0,49	0,87	0,55	0,40	0,62
Dez	7,38	5,33	Dez	12,31	14,34	Dez	0,82	0,51	0,85	0,68	0,31	0,69

Série \Parâmetros \ Num_Dias \ Chuva /

Pronto NUM

Figura 10 – Planilha do arquivo “PrecDiaria.xls” apresentando os parâmetros necessários para a geração de precipitações sintéticas a partir de dados históricos

3.2.1 – Descrição da Pasta "MeroModif.xls"

3.2.1.1 – Parâmetros

Esta planilha permite a entrada, dos parâmetros necessários para a geração das séries sintéticas. O usuário deve indicar, também, o número de séries a serem geradas e o número de anos em cada série. O botão “Gerar” inicia o processamento. A figura 11 apresenta um exemplo desta planilha.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Nº de Dias Chuvosos			Altura Precipitada			Persistência						
Mês	Média	D.P.	Mês	Média	D.P.	Mês	Secos	Chuvosos	Secos		Chuvosos	
									Até 10	> 10	Até 10	> 10
Jan	8,620	5,673	Jan	12,101	18,662	Jan	0,786	0,507	0,842	0,654	0,225	0,631
Fev	8,423	5,551	Fev	12,240	15,312	Fev	0,757	0,478	0,812	0,538	0,286	0,625
Mar	9,197	6,103	Mar	13,696	16,232	Mar	0,767	0,504	0,814	0,593	0,286	0,656
Abr	5,549	4,404	Abr	13,293	17,293	Abr	0,838	0,404	0,862	0,657	0,320	0,536
Mai	1,310	1,841	Mai	6,131	10,771	Mai	0,936	0,247	0,936	0,936	0,247	0,000
Jun	0,282	0,659	Jun	1,720	2,616	Jun	0,957	0,050	0,957	0,957	0,050	0,000
Jul	0,085	0,405	Jul	1,883	1,977	Jul	0,965	0,000	0,965	0,965	0,000	0,000
Ago	0,127	0,335	Ago	3,856	4,146	Ago	0,964	0,000	0,964	0,964	0,000	0,000
Set	0,437	0,788	Set	13,465	13,070	Set	0,957	0,258	0,957	0,957	0,258	0,000
Out	2,268	2,828	Out	9,031	12,377	Out	0,915	0,304	0,917	0,750	0,287	0,545
Nov	6,169	5,454	Nov	13,816	18,157	Nov	0,843	0,489	0,872	0,550	0,398	0,620
Dez	7,380	5,327	Dez	12,312	14,340	Dez	0,818	0,506	0,846	0,684	0,315	0,685

Nº de Séries: 100
Nº de Anos: 71
Gerar

Figura 11 – Exemplo da planilha “Parâmetros” da pasta “MeroModif.xls”

3.2.1.2 – Resultados

Aqui são apresentados os resultados médios das séries geradas pelo modelo. Além da média e desvio padrão do número de dias de chuva, média e desvio padrão da chuva diária e persistência dos períodos seco e chuvoso, também são apresentadas a precipitação média mensal e anual e a classificação das precipitações anuais geradas, segundo a metodologia apresentada no item 2.2.2.5.3, permitindo a avaliação da adequabilidade do modelo pela comparação entre os valores observados e os valores médios gerados.

3.2.1.3 – Gráficos

Esta planilha trás um total de seis gráficos que permitem a comparação visual entre os valores observados e gerados. Um exemplo desta planilha é apresentado na figura 12.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

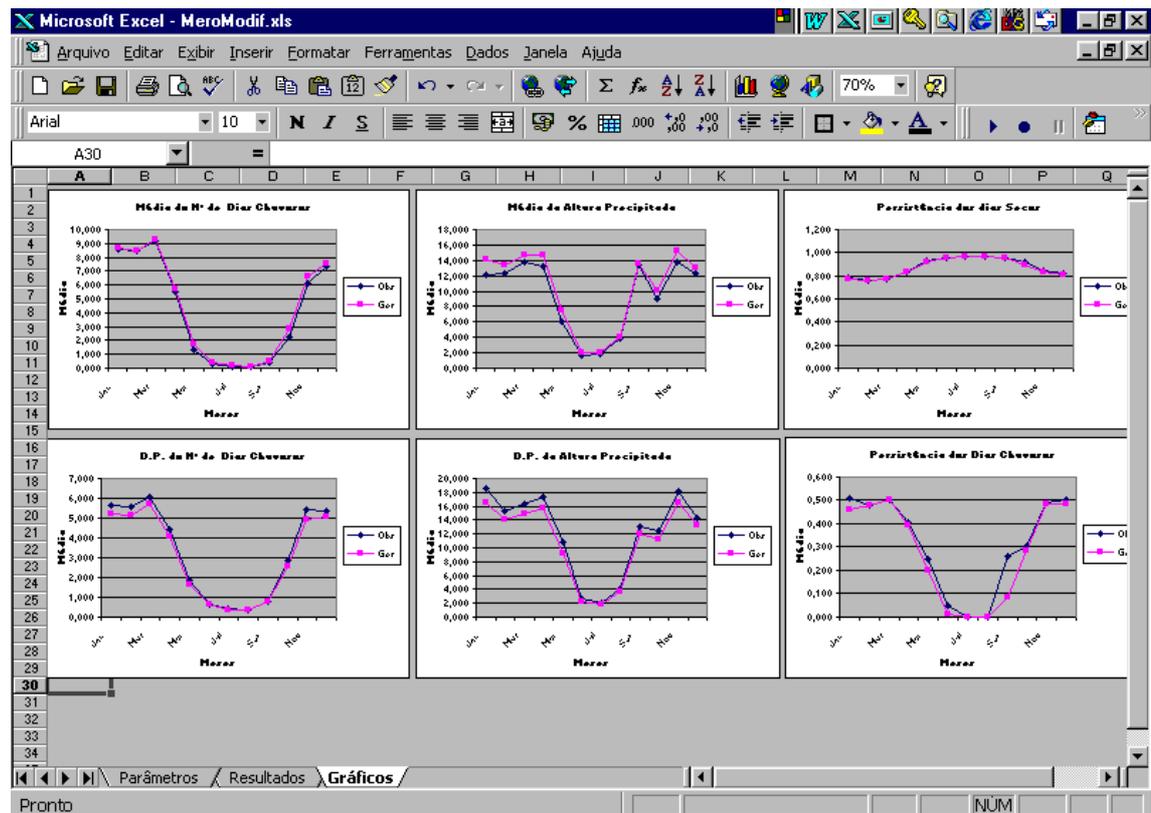


Figura 12 – Exemplo da planilha “Gráficos” da pasta “MeroModif.xls”

3.2.2 – Validação

Para validar o modelo foi escolhido o posto pluviométrico instalado pelo DNOCS em 1912 na sede municipal de São João do Piauí. As falhas foram preenchidas através da utilização do método da ponderação regional (item 2.1.4.2.2), utilizando como postos de apoio os pluviômetros instalados nas sedes municipais de Paulistana, Simplício Mendes e São Raimundo Nonato, que possuem observações também a partir de 1912.

Utilizou-se as precipitações diárias registradas entre 1913 e 1983 que foram obtidas junto ao banco de dados da Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Piauí - SEMAR, perfazendo um total de 71 anos. A precipitação média anual é de 618,8 mm. Outras estatísticas importantes da série preenchida são apresentadas nas tabelas 07 e 08.

Foram geradas 100 séries sintéticas com o mesmo número de anos da série histórica. Os principais resultados são apresentados na tabela 09.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Tabela 07 – Estatísticas básicas da precipitação diária observada em São João do Piauí

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Nº de dias chuvosos	8,62	8,42	9,20	5,55	1,31	0,28	0,08	0,13	0,44	2,27	6,17	7,38
D.P. do nº de dias chuvosos	5,67	5,55	6,10	4,40	1,84	0,66	0,41	0,34	0,79	2,83	5,45	5,33
Chuva média (mm)	12,10	12,24	13,70	13,29	6,13	1,72	1,88	3,86	13,46	9,03	13,82	12,31
D.P. da chuva média	18,66	15,31	16,23	17,29	10,77	2,62	1,98	4,15	13,07	12,38	18,16	14,34
Pers. período seco	0,79	0,76	0,77	0,84	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,92	0,84	0,82
Pers. período chuvoso	0,51	0,48	0,50	0,40	0,25	0,05	0,00	0,00	0,26	0,30	0,49	0,51
Total mensal (mm)	104,3	103,1	126,0	73,8	8,0	0,5	0,2	0,5	5,9	20,5	85,2	90,9

Tabela 08 – Classificação dos anos quanto à precipitação média anual

Classificação	Ocorrência (%)
Extremamente seco	7,04
Seco	11,27
Ligeiramente seco	21,13
Normal	26,76
Ligeiramente chuvoso	15,49
Chuvoso	5,63
Extremamente chuvoso	12,68

De maneira geral, o modelo consegue reproduzir muito bem o número de dias chuvosos para cada mês e o seus respectivos desvios padrões. Entretanto, com relação à chuva diária, foi observada uma ligeira superestimativa das alturas precipitadas, o que provocou a geração de vazões médias mensais e anuais superiores às observadas, sem exceder, no entanto, os valores médios observados em postos vizinhos, que variam em torno de 700 mm anuais. Talvez uma outra distribuição de probabilidades ajustada aos valores observados apresente valores médios mais próximos aos da série histórica.

O modelo consegue reproduzir de forma adequada as persistências dos períodos seco e chuvoso. Quanto à ocorrência de anos secos ou chuvosos, segundo a metodologia apresentada no item 2.2.2.5.3, a resposta do modelo também se mostrou bastante satisfatória. A soma dos percentuais de anos com precipitação abaixo da média (ligeiramente seco, seco e extremamente seco) para a série observada é de 39,4% contra

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

40,0% de média para as 100 séries geradas. Anos com precipitação acima da média (ligeiramente chuvoso, chuvoso e extremamente chuvoso) representam 33,8% dos anos observados contra 34,4% dos gerados. Foram observados 63,4% dos anos situados na faixa de normalidade (ligeiramente seco, normal e ligeiramente chuvoso), enquanto a média das 100 séries geradas apresentou 69,2% dos anos com esta característica, evidenciando a adequação do modelo aos objetivos propostos.

Tabela 09 – Estatística médias para 100 séries geradas e valores observados na série histórica

Mês	Média do N° de Dias de Chuva		D.P. do N° de Dias de Chuva		Média da Chuva Diária		D.P. da Chuva Diária		Persistência				Precipitação Média Mensal	
	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc	Período Seco		Período Chuv.		Obs	Calc
									Obs	Calc	Obs	Calc		
Jan	8.62	8.74	5.67	5.38	12.10	14.07	18.66	16.41	0.79	0.77	0.51	0.47	104.3	123.0
Fev	8.42	8.51	5.55	5.26	12.24	13.31	15.31	14.01	0.76	0.76	0.48	0.49	103.1	113.4
Mar	9.20	9.23	6.10	5.68	13.70	14.61	16.23	14.93	0.77	0.77	0.50	0.50	126.0	134.8
Abr	5.55	5.89	4.40	4.21	13.29	14.79	17.29	15.82	0.84	0.83	0.40	0.41	73.8	87.0
Mai	1.31	1.70	1.84	1.67	6.13	7.63	10.77	9.35	0.94	0.92	0.25	0.20	8.0	13.0
Jun	0.28	0.41	0.66	0.63	1.72	2.05	2.62	2.25	0.96	0.95	0.05	0.01	0.5	0.8
Jul	0.08	0.16	0.41	0.39	1.88	1.97	1.98	1.71	0.96	0.96	0.00	0.00	0.2	0.3
Ago	0.13	0.13	0.34	0.35	3.86	3.69	4.15	3.27	0.96	0.96	0.00	0.00	0.5	0.5
Set	0.44	0.55	0.79	0.76	13.46	13.97	13.07	12.17	0.96	0.95	0.26	0.09	5.9	7.7
Out	2.27	2.79	2.83	2.49	9.03	10.21	12.38	11.36	0.92	0.90	0.30	0.28	20.5	28.5
Nov	6.17	6.70	5.45	5.02	13.82	15.31	18.16	16.49	0.84	0.83	0.49	0.49	85.2	102.7
Dez	7.38	7.51	5.33	5.04	12.31	13.17	14.34	13.27	0.82	0.81	0.51	0.48	90.9	98.9

4 – APLICAÇÃO DOS ÍNDICES

A metodologia descrita no capítulo 2 foi desenvolvida para ser aplicada à bacias hidrográficas, que são consensualmente adotadas como unidade natural de gestão hídrica (SILANS et al., 1996), fato referendado inclusive pela legislações específicas, federal e estaduais, sobre recursos hídricos. Entretanto, devido às limitações inerentes ao presente trabalho e às dificuldades de obtenção de dados, o exemplo de aplicação da metodologia será conduzido para um município isoladamente, considerando-se, em uma grande simplificação, que a divisão político-administrativa coincida com os divisores de águas naturais, o que raramente acontece em situações reais .

Adotou-se, como área de estudo, o município de São João do Piauí, localizado na região sudeste do estado, por dois motivos principais: o município está localizado na região semi-árida e, afora registros pluviométricos, apresenta uma grande carência de dados hidro-climatológicos; o município apresenta a possibilidade de utilização de recursos superficiais, a partir do reservatório Jenipapo, e subterrâneos, utilizando as águas armazenadas no aquífero Serra Grande, um dos mais importantes do Nordeste.

Avaliou-se, pois, a sustentabilidade hídrica do município de São João do Piauí através do uso dos indicadores definidos por VIEIRA e VIEIRA (1995), descritos no capítulo 2. A determinação dos índices foi realizada através da avaliação das demandas atuais e futuras, da potencialidade hídrica e das disponibilidades hídricas atuais e futuras, tendo sido adotado como horizonte de planejamento o período de 25 anos.

Para a determinação da disponibilidade superficial foi empregado o modelo proposto no item 2.2.1 para a avaliação da vazão regularizada a partir do reservatório Jenipapo. Quanto à recarga potencial do aquífero Serra Grande que ocorre nos limites do

município, a mesma foi estimada a partir da utilização do modelo proposto no item 2.2.2.1.

4.1 - Caracterização da Área em Estudo

4.1.1 - Localização

O município de São João do Piauí situa-se na parte centro-meridional do Estado do Piauí, na microrregião homogênea do Alto-Médio Canindé, estando limitado, aproximadamente, pelas coordenadas geográficas 41°55' e 42°40' W e 8°05' e 8°30' S, e distante, aproximadamente, 500 km da capital Teresina. A figura 13 mostra a localização do município no estado.

Em 1994, seis novos municípios foram emancipados, total ou parcialmente, de São João do Piauí, reduzindo a área do município de 8.037,5 km² para apenas 1.488,8 km², o que representa cerca de 0,59% da área do estado.

4.1.2 – Clima

O clima é constituído por um conjunto de ocorrências meteorológicas que caracterizam o estado médio da atmosfera. Entre as principais ocorrências incluem-se a precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, insolação, ventos e evaporação.

A região do município de São João do Piauí é caracterizada, segundo Köppen, como pertencente ao tipo BSH, clima semi-árido, que aliado à distribuição e irregularidades das precipitações, imprime nesta zona duas estações: a seca, denominada regionalmente de verão, e a chuvosa, também chamada de inverno.

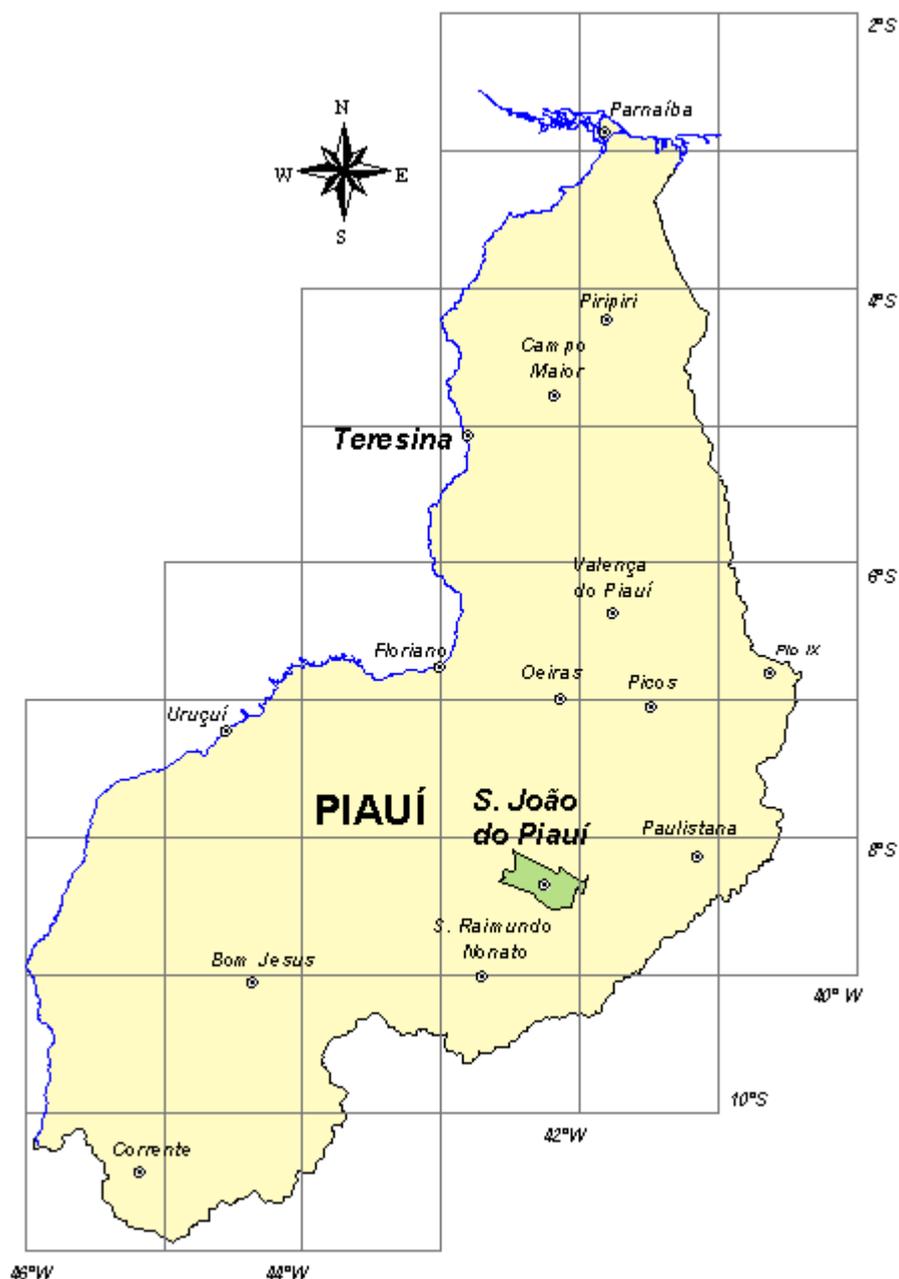


Figura 13 – Localização do município de São João do Piauí com relação ao estado

Para a região em estudo foram considerados os dados médios de temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, insolação, velocidade e direção dos ventos e evaporação apresentados pelo PDRH da bacia dos rios Canindé/Piauí, registrados pela estação meteorológica São João do Piauí do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, código nacional 842011, código INMET 82870, localizada nas coordenadas 08°22' de latitude sul, 42°18' de longitude oeste, e 235 m de altitude. Para a precipitação foram utilizados os dados dos postos da SUDENE obtidos junto à SEMAR.

4.1.2.1 – Temperatura

A tabela 10 apresenta as médias mensais das temperaturas máximas e mínimas para a estação de São João do Piauí, com a temperatura média sendo calculada através da média aritmética das médias máximas e mínimas. Como se pode perceber, a temperatura média anual é de 28,0°C, com pequena variação ao longo do ano. As temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de maio e junho (média das mínimas igual a 20,5°C) e o mês mais quente é outubro, com média das máximas igual a 36,7°C e temperatura média superior a 30°C.

4.1.2.2 – Umidade Relativa do Ar

Os valores registrados de umidade relativa são bastante baixos, característica de regiões com aridez severa. A umidade relativa média anual é da ordem de 52%, com os maiores valores mensais coincidindo com o período mais chuvoso. Os valores extremos são encontrados nos meses de janeiro (77%) e setembro (38%). A tabela 11 apresenta a distribuição mensal da umidade relativa do ar na região.

Tabela 10 - Temperaturas médias mensais máximas, mínimas e médias registradas na estação climatológica de São João do Piauí

Temp. (°C)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Máxima	32,7	33,2	32,4	33,3	33,9	34,0	33,6	34,2	36,3	36,7	35,6	34,8	34,2
Mínima	21,6	21,8	21,5	21,3	20,5	20,5	20,7	21,4	23,1	23,6	22,3	22,1	21,7
Média	27,2	27,5	27,0	27,3	27,2	27,3	27,2	27,8	29,7	30,2	29,0	28,5	28,0

Fonte: FAHMA (2000)

Tabela 11 - Médias mensais de umidade relativa do ar registradas na estação climatológica de São João do Piauí

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Umidade (%)	72	66	70	51	55	45	42	40	38	39	52	58	52

Fonte: FAHMA (2000)

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

4.1.2.3 – Insolação

A insolação média anual situa-se próxima a 3000 horas, o que equivale a uma incidência solar média diária ligeiramente superior a 8 horas/dia.

Os meses chuvosos têm os dias de menor insolação, a média mínima superando em pouco o limite de 6 horas diárias. O trimestre janeiro/março responde por aproximadamente 20% da insolação anual; por sua vez, 30% se concentra no trimestre julho/setembro, quando a média diária se aproxima de 10 horas de radiação. Os valores médios registrados são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Insolação média mensal e diária para São João do Piauí

Insolação (h)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Diária	6,1	6,9	6,3	8,2	9,1	9,6	9,9	10,0	9,3	8,7	7,5	6,9	8,2
Mensal	188,5	192,9	196,7	246,8	283,5	287,4	306,5	308,9	278,4	270,7	225,4	213,6	2999,3

Fonte: FAHMA (2000)

4.1.2.4 – Ventos

As velocidades médias dos ventos registradas são fracas, muito raramente atingindo a fronteira de 4 m/s. Os maiores valores ocorrem no período seco (junho-outubro), com médias variando ente 3,3 e 3,8 m/s. Nos meses chuvosos (dezembro a março), as velocidades médias dos ventos são menores, variando entre 1,9 e 2,5 m/s, sendo as mínimas observadas no mês de março. Os ventos leste e sudeste são os de maior relevância, com os ventos com direção nordeste ocorrendo com frequência secundária. A tabela 13 apresenta os valores médios observados.

Tabela 13 - Velocidade média mensal dos ventos para São João do Piauí

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Velocidade (m/s)	2,3	2,5	1,9	2,2	2,6	3,3	3,7	3,8	3,4	3,4	2,5	2,3	2,8

Fonte: FAHMA (2000)

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

4.1.2.5 – Evaporação

As condições climáticas locais induzem à ocorrência de elevadas taxas de evaporação, que provocam, em consequência, perdas hídricas acentuadas, em especial dos volumes acumulados em superfície livre.

A média anual da evaporação, medida em Tanque Classe A, é de quase 3.150 mm. O período de estiagem (maio/outubro) responde por 60 a 65% da evaporação total anual, apresentando, nos meses de ápice, taxas médias diárias um pouco superiores a 11 mm/dia. No período chuvoso, esses valores diários decaem, em média, para menos de 5,0 mm/dia. Os valores médios mensais e diários registrados são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Evaporação média mensal e diária para São João do Piauí

Evaporação (mm)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Diária	5,3	7,3	4,6	6,2	6,3	11,1	11,1	10,5	11,0	11,0	10,9	7,7	8,6
Mensal	165,6	204,7	143,3	185,0	196,8	331,8	342,8	324,6	329,6	342,3	327,2	240,1	3133,8

Fonte: FAHMA (2000)

4.1.2.6 – Precipitação

A figura 14 apresenta os Polígonos de Thiessen, com suas respectivas áreas, para os postos pluviométricos contidos ou circunvizinhos ao município. A tabela 15 traz o código de identificação nacional e da SUDENE, a localização geográfica (latitude e longitude), a altitude e o período de dados disponíveis (SUDENE, 1990) e a tabela 16 apresenta as precipitações médias mensais de cada posto e da região, calculada a partir dos polígonos de Thiessen.

O índice pluviométrico médio anual para o município é de 695 mm. O período chuvoso chamado inverno, começa em meados de novembro, prolongando-se descontinuamente até abril, quando as chuvas vão se tornando raras. O mês de março é o que apresenta, em geral, o maior índice de precipitação (cerca de 24% do total anual); o chamado verão ou estação seca, tem início em maio e estende-se até outubro; julho e agosto são os

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

meses mais secos.

O semestre novembro-abril concentra cerca de 94% do total anual, sendo os seis meses restantes praticamente secos. O trimestre janeiro-março é responsável por mais da metade (55,4%) da precipitação anual. Já o trimestre junho-agosto representa menos de 1% do total precipitado, sendo agosto o mês mais seco do ano, com média inferior a 1 mm.

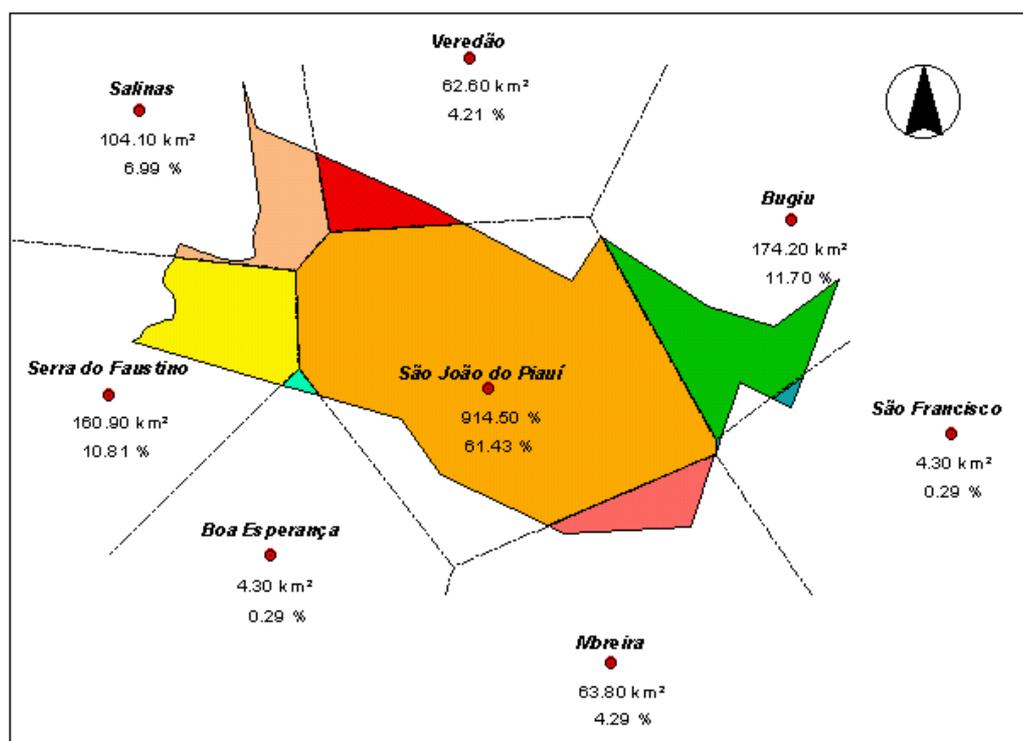


Figura 14 – Polígonos de Thiessen para o município de São João do Piauí

Tabela 15 – Postos pluviométricos contidos ou circunvizinhos ao Município de São João do Piauí

Posto	Cód. Nacional	Cód. SUDENE	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de Dados
Salinas	842005	3764287	8°06' S	42°34' W	170	1962-1985
Serra do Faustino	842008	3764782	8°22' S	42°36' W	300	1962-1985
Veredão	842010	3765147	8°03' S	42°16' W	320	1962-1985
São João do Piauí	842007	3765752	8°22' S	42°15' W	244	1910-1985
Bugiu	841002	3766407	8°12' S	41°58' W	250	1963-1985
São Francisco	841007	3766837	8°24' S	41°49' W	370	1962-1985
Boa Esperança	842000	3775012	8°31' S	42°27' W	250	1962-1985
Moreira	842004	3775275	8°37' S	42°08' W	250	1962-1985

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Tabela 16 – Precipitações médias mensais nos postos considerados e valores médios regionais segundo o método dos Polígonos de Thiessen

Posto	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Salinas	116,3	147,0	173,7	113,6	9,5	3,4	1,5	1,5	3,6	30,8	82,7	121,0	804,6
Serra do Faustino	119,5	140,9	139,7	87,9	14,7	2,2	10,7	0,6	5,9	37,5	93,6	118,3	771,5
Veredão	142,7	146,0	147,0	138,0	11,3	3,5	4,0	0,1	3,1	25,1	62,7	106,1	789,6
São João do Piauí	111,9	119,1	145,9	74,2	7,1	1,9	0,1	0,4	6,2	21,5	86,6	93,2	668,1
Bugiu	99,6	108,9	156,6	78,6	9,3	6,0	1,7	0,7	6,5	27,0	69,1	88,1	652,1
São Francisco	85,5	114,2	131,8	69,8	7,7	5,9	2,5	0,2	3,1	21,4	61,2	86,0	589,3
Boa Esperança	97,0	113,5	135,4	111,1	12,8	3,8	3,5	0,7	3,5	28,2	85,8	87,5	682,8
Moreira	96,3	117,6	130,4	92,2	11,1	8,6	3,6	0,4	3,8	21,1	74,3	98,4	657,8
Média Regional	112,1	123,3	147,7	82,5	8,7	2,9	1,9	0,5	5,8	24,7	83,4	98,0	691,5

A precipitação média anual cresce no sentido sudeste-nordeste, variando de 640 mm no extremo leste do município até valores em torno de 780 mm no extremo nordeste, como mostram as isoietas apresentadas na figura 15.

4.1.3 – Hidrografia

O Município está hidrograficamente ligado à bacia dos rios Canindé/Piauí, pertencente à grande bacia do rio Parnaíba. O principal curso d'água é o rio Piauí, que corta o Município na direção SE-NW, sendo que toda a rede fluvial é intermitente, secando, geralmente, logo após os meses de maio ou junho.

O rio Piauí tem como nascente uma lagoa pequena e profunda a cerca de 6 km da fronteira baiana. Considera-se que ele é formado por dois ribeirões: o que vem da Serra das Confusões e o sangradouro da lagoa que fica na Serra do Caracol. Ambos ficam a aproximadamente 600 m de altitude. Tem cerca de 520 km de curso até sua entrada no rio Canindé, a aproximadamente 65 km da foz dele no rio Parnaíba. Na nascente, o rio toma a direção leste, passando entre as serras que fazem fronteira com a Bahia e a de Bom Jesus do Gurguéia e, depois de um grande arco, toma a direção norte. Apesar de sua natureza torrencial, o Piauí é o rio da bacia parnaibana que mais demora a encher, deixando de apresentar fluxo de água várias vezes na estiagem.

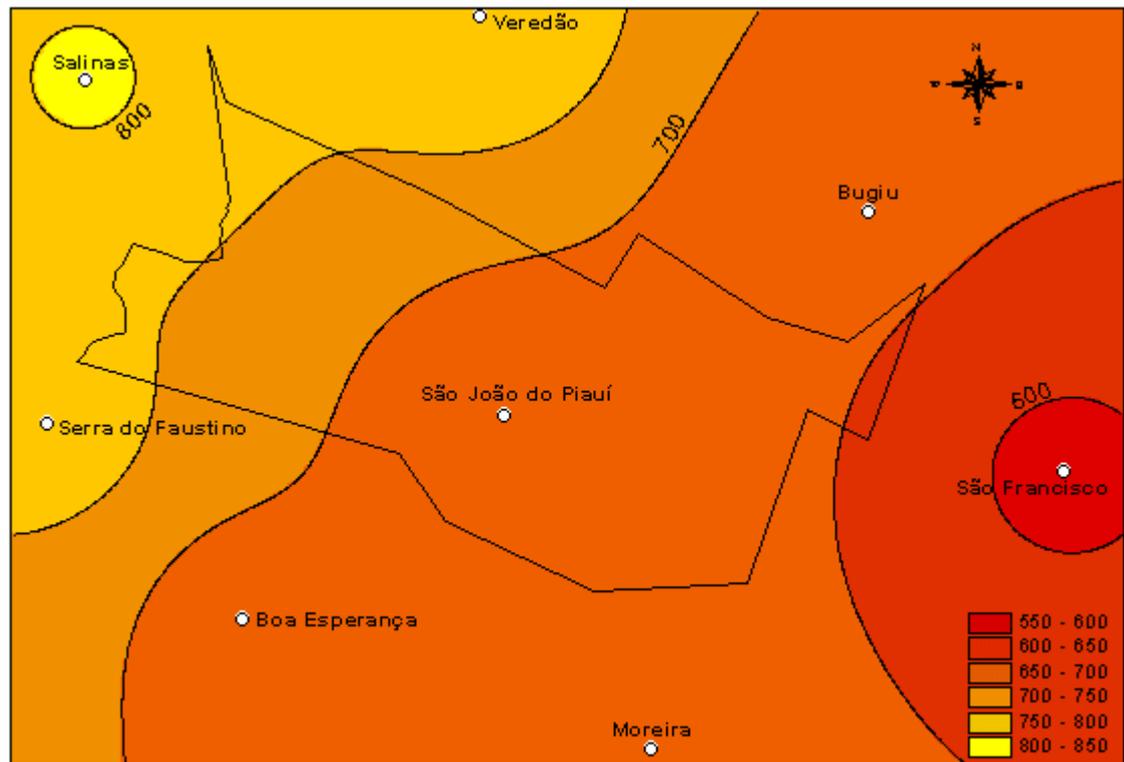


Figura 15 – Isoietas de precipitação média anual para o município de São João do Piauí

4.1.3.1 – Barragem Jenipapo

Atualmente encontram-se concluídas as obras da barragem Jenipapo, localizada no rio Piauí, aproximadamente 7 km a montante da sede municipal, com capacidade de acumulação de 248 hm³ e drenando uma área de 14.602 km². O relevo da bacia de contribuição deste reservatório é bastante movimentado, desenvolvendo-se por terrenos de formação geológica cristalina cujo regime pluviométrico, tanto mensal como anual, é muito irregular. A conjugação desses fatores conduz a ocorrência de um regime de escoamento bastante irregular, contrapondo-se períodos de vazões significativas com períodos de vazões nulas, caracterizando seu caráter de curso d'água intermitente.

Na figura 16 é apresentado o mapa hidrográfico do município de São João do Piauí, indicando, inclusive, a localização do lago da barragem Jenipapo. As principais características do barramento são apresentadas na tabela 17. As curvas cota x área e cota x volume são apresentadas na figura 17.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Devido a inexistência de postos fluviométricos na bacia, o estudo hidrológico da barragem, realizado pela firma SIRAC, determinou as vazões afluentes a partir do uso do modelo de simulação chuva-vazão diário MOPH2, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), para o período compreendido entre janeiro de 1963 e dezembro de 1983 (SIRAC, 1987). As vazões assim determinadas estão listadas na tabela 18.

Tabela 17 - Principais características da barragem Jenipapo

Características Técnicas	
Rio Barrado	Rio Piauí
Bacia	Canindé-Piauí
Capacidade	248 x 10 ⁶ m ³
Área da bacia hidrográfica	14.602 km ²
Área da bacia hidráulica	2.100 ha
Volume morto	13,25 x 10 ⁶ m ³
Características Estruturais	
Tipo	Enrocamento com núcleo argiloso
Extensão pelo coroamento	400,00 m
Largura do coroamento	8,00 m
Altura máxima	39,50 m
Cota do coroamento	254,00 m
Volume do maciço	122 x 10 ³ m ³
Volume do enrocamento	381 x 10 ³ m ³
Volume total	667,42 x 10 ³ m ³
Sangradouro	
Tipo	Perfil Creager
Largura	110,00 m
Descarga máxima (Tr = 100 anos)	3.108,04 m ³ /s
Cota da crista do vertedouro	245,50 m
Lâmina máxima	6,00 m

Fonte: Companhia de Desenvolvimento do Piauí - COMDEPI

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

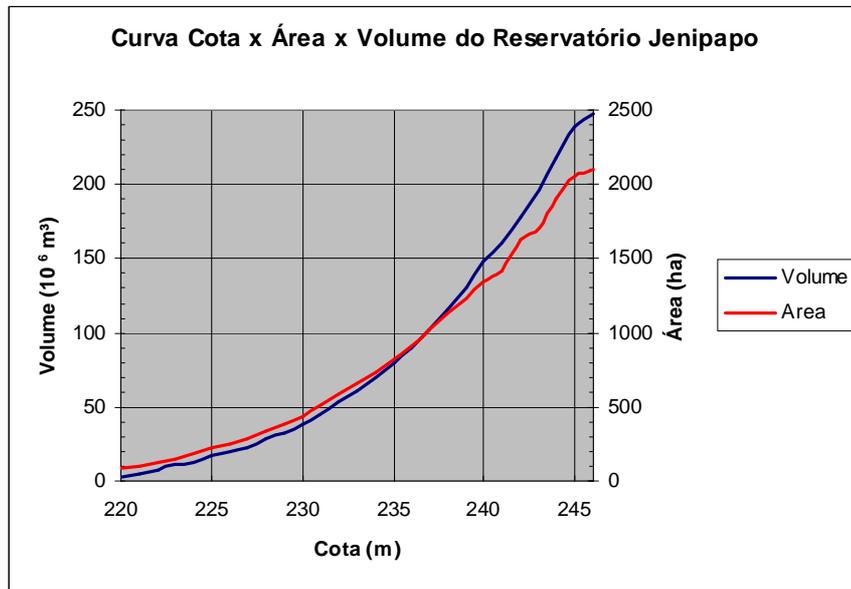


Figura 17 - Curvas cota x área e cota x volume do reservatório Jenipapo

Tabela 18 – Vazões afluentes calculadas para o período 1963/1983 em m³/s

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1963	0,0	0,0	0,0	94,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	119,9	17,9
1964	320,2	94,3	0,5	74,2	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	32,6	43,5
1965	0,1	0,0	150,9	310,9	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	38,6
1966	0,0	126,0	69,4	137,7	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	18,7	31,2	32,0
1967	0,1	0,4	236,1	122,4	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	52,2	34,3
1968	3,3	50,8	287,0	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	3,2	0,8	28,8
1969	79,3	0,1	295,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	82,5	38,1
1970	25,0	0,1	15,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4
1971	0,0	0,0	44,6	178,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,6
1972	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	74,4	6,2
1973	0,0	40,6	15,4	31,7	90,5	0,1	0,0	0,0	0,0	28,4	0,0	0,0	17,2
1974	0,0	97,4	770,1	126,4	46,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	86,8
1975	2,3	0,1	48,8	2,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
1976	0,0	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	120,1	0,0	0,0	12,9
1977	53,5	0,1	0,1	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	241,6	25,2
1978	78,3	0,1	212,6	18,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	21,9	27,8
1979	56,9	38,8	8,3	43,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,3
1980	12,2	495,0	0,4	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	42,4
1981	0,0	0,0	88,5	64,2	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	23,9	0,1	14,8
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	0,0	49,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2
Média	30,1	46,6	109,1	57,8	6,6	0,1	0,0	0,0	0,0	7,1	2,3	31,3	24,3
D.P.	71,7	109,7	181,1	80,6	21,7	0,1	0,0	0,0	0,0	26,6	6,4	59,1	19,8

Fonte: SIRAC(1987)

4.1.4 – Relevo

O relevo do município é predominantemente caracterizado pelo vale do rio Piauí. Na porção sudeste, correspondente a área de afloramento do cristalino, estão localizados os pontos mais altos, cuja altitude máxima fica em torno dos 500 metros.

De maneira geral, a paisagem é constituída pelo vale fluvial, o qual se correlaciona com a formação geológica onde o rio escavou sua calha. Verifica-se por todo o seu curso perfis transversais com predominância dos tipos de vales em “V” e “U”. O vale apresenta planícies de inundação caracterizadas por bacias, terraços e diques, onde solos passíveis de irrigação apresentam relevo plano e suave-ondulado, com uma declividade média de 0 a 3% (SIRAC, 1987).

4.1.5 – Vegetação

O município de São João do Piauí apresenta a ocorrência de duas regiões ecológicas, a Caatinga e o Cerrado, sendo que a amplitude espacial desta última pode ser considerada desprezível, ocupando apenas 0,85 km² (0,05% da área total) junto ao limite sudeste.

A Caatinga, que ocorre em 99,95% da área em estudo, é uma formação vegetal típica dos climas quentes, de chuvas relativamente escassas ou escassas, concentradas num pequeno período anual, estando composta de elementos caducifólios e hiperxerófilos cuja densidade e porte estão associados aos fatores pedológicos, climáticos e humanos (FAHMA, 2000).

Em São João do Piauí, a Caatinga apresenta-se na forma arbustiva, constituída por vários elementos pouco diversificados e com representativa presença de cactáceas; e arbórea, muito densa, e de porte médio a grande. Geralmente os elementos se apresentam com grande quantidade de galhos, que nascem quase que rentes ao solo e sobem numa profusão de ramos, espinhos e folhas pequenas, havendo acentuada presença de leguminosas. Não é rara uma presença considerável de cactáceas e bromeliáceas no conjunto vegetal.

Na região há um ligeiro predomínio da forma arbórea, que acompanha todo o vale do rio Piauí e de alguns de seus afluentes, representando cerca de 57% da área total. O mapa de vegetação do município é mostrado na figura 18.

4.1.6 - Geologia

4.1.6.1 - Situação Geológica

O município de São João do Piauí é constituído por rochas pertencentes à grande Bacia Sedimentar do Parnaíba e por rochas ígneas e metamórficas que compõem o substrato cristalino da bacia.

A Bacia do Parnaíba, abrangendo em sua totalidade os estados do Maranhão e Piauí e partes do Ceará, Tocantins e Pará, numa extensão de aproximadamente 600.000 km², é representada por sedimentos que vão desde o Devoniano até o Cretáceo, numa das mais completas seqüências paleozóicas do Brasil (MENTE et al., 1965).

Os depósitos paleozóicos, diferentemente dos existentes nas demais bacias brasileiras, encontram-se expostos também em amplas áreas da parte central da Bacia do Parnaíba. Nas bordas oriental e ocidental, principalmente na primeira, ocorrem extensas faixas, com direção norte-sul, de seqüências siluro-devonianas constituídas pelas formações Serra Grande (arenitos e conglomerados), Pimenteiras (siltitos e folhelhos), Cabeças (arenitos), Longá (folhelhos) e Poti (arenitos, siltitos, folhelhos e conglomerados). Tais formações são cobertas por seqüências permo-carboníferas, representadas por arenitos da Formação Piauí e siltitos, folhelhos e calcários com níveis de sílex, da Formação Pedra de Fogo, além de arenitos com níveis de evaporitos da Formação Motuca. Estas camadas do Paleozóico Superior formam uma ampla faixa de exposições que ocupa toda a parte centro-sul da bacia. Ao norte, esta faixa limita-se com arenitos eólicos finos da Formação Sambaíba, do Jurássico Inferior, que ocupam grandes trechos, sobretudo a leste do Rio Tocantins, e têm cerca da metade de sua área de ocorrência capeada por basaltos, também jurássicos, da Formação Mosquito (BARTORELLI e HARALYI, 1998).

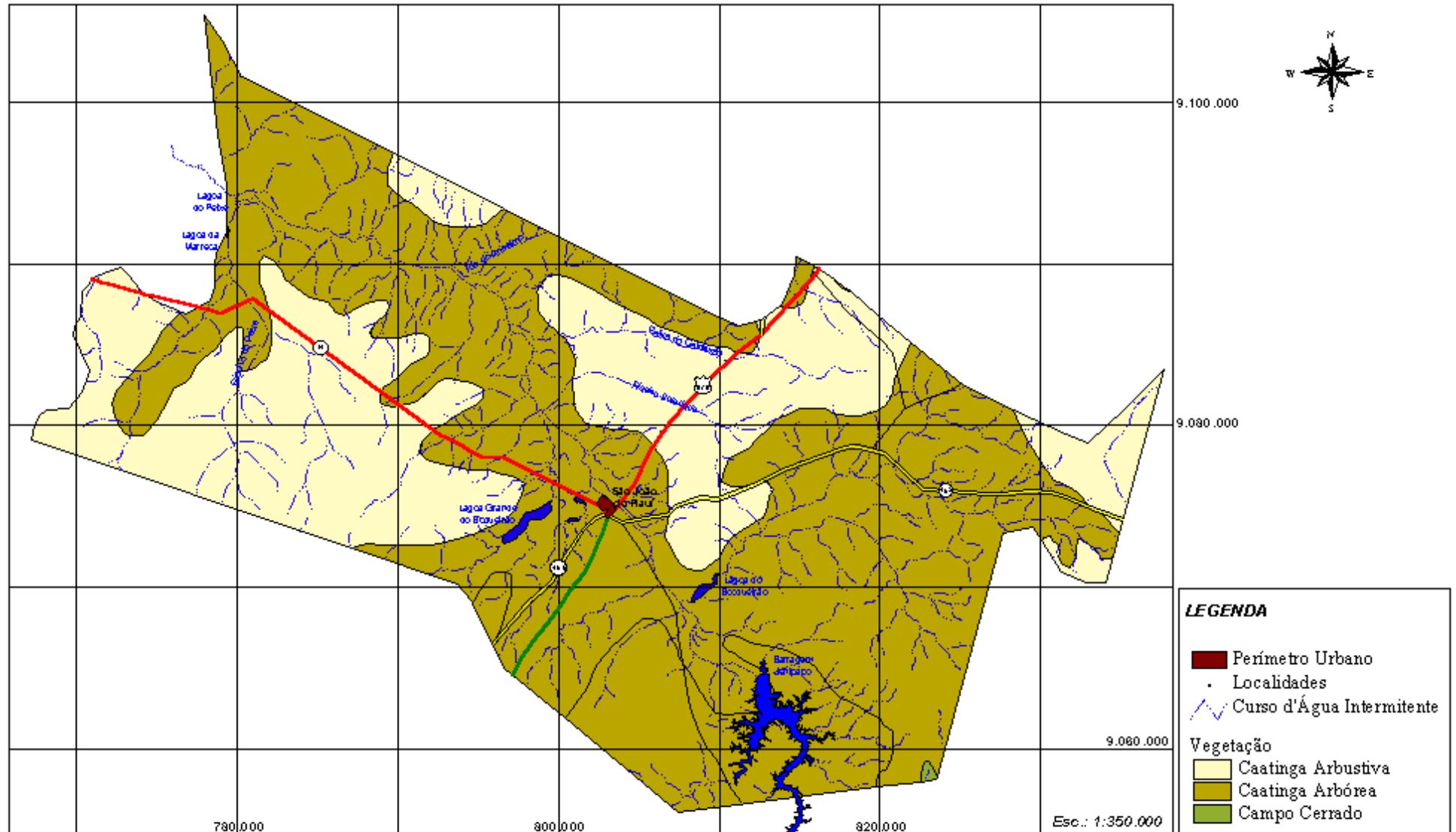


Figura 18 - Mapa de Vegetação do Município de São João do Piauí (Adaptado de DNPM, 1973)

Na área em estudo, as rochas sedimentares perfazem mais de 90% da superfície total, estando limitadas a sudeste pelo embasamento cristalino, como pode ser visto no mapa geológico do município apresentado na figura 19.

4.1.6.2 – Estratigrafia

A coluna estratigráfica, na área em estudo, está assim constituída:

- Coberturas arenosas, detríticas ou lateríticas – Quaternário/Terciário
- Formação Cabeças – Devoniano Médio
- Formação Pimenteiras – Devoniano Médio
- Formação Serra Grande – Siluro-Devoniano
- Embasamento Cristalino – Pré-Cambriano

4.1.6.2.1 – Embasamento Cristalino

A área cristalina é dominada por camadas de xistos e filitos e por compostos graníticos. Aparecem também, subordinadamente, gnaisses de composição e textura variáveis e intercalações não muito espessas de quartzito. (MENTE et al., 1965).

4.1.6.2.2 – Formação Serra Grande

Repousa em discordância angular com o cristalino. Consiste de espesso pacote de arenitos de granulação média à grossa e de arenitos conglomeráticos ou conglomerados, de cores claras, cinza, branco, ou mesmo vermelho claro. Secundariamente, arenitos siltosos ou siltitos podem aparecer.

Na composição destes sedimentos clásticos predomina o quartzo, podendo os seixos ser esporadicamente de quartzito e gnaisses. É comum a presença de caulim, que constitui o cimento (MENTE et al., 1965).

A formação é afossilífera e é considerada Siluro-Devoniano. A sua área de afloramento corresponde a cerca de 20% da área do município (298 km²).

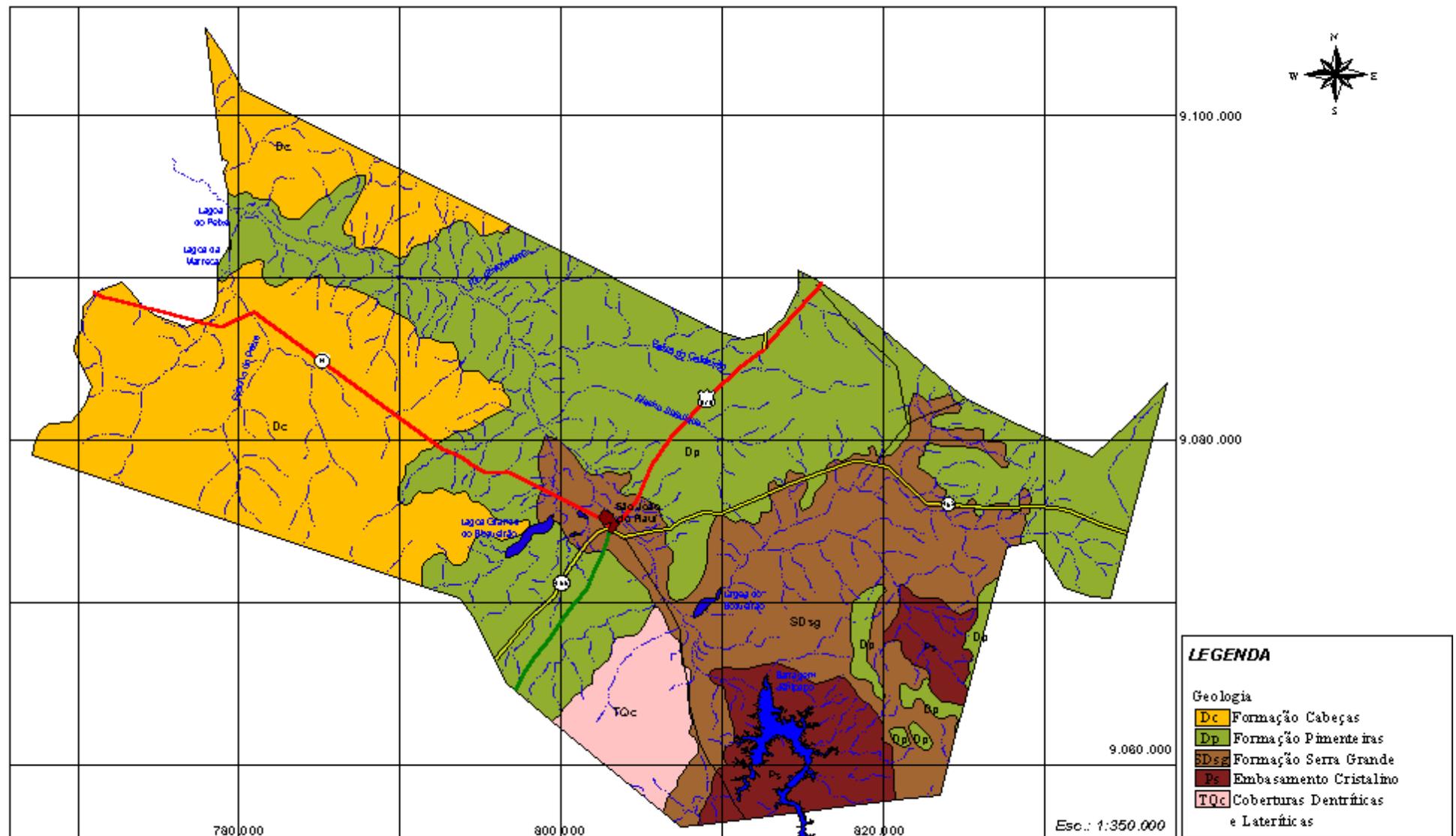


Figura 19 - Mapa Geológico do município de São João do Piauí (Adaptado de CPRM, 1998)

4.1.6.2.3 – Formação Pimenteiras

Na área em estudo é constituída por uma seqüência de clásticos predominantemente finos que se sobrepõe à Formação Serra Grande em contato normal. Ocorre extensivamente por toda a área central do município, estendendo-se pelo vale do rio Piauí.

Folhelhos, siltitos e arenitos ou conglomerados entram em sua composição, predominando os termos finos, com cores bastante variadas, onde são comuns vermelho, roxo, cinza e amarelo.

Os fósseis encontrados lhe dão a idade Devoniano Médio. Corresponde a 43% da área do município (625 km²).

4.1.6.2.4 – Formação Cabeças

Seqüência de arenitos finos e grosseiros, de cores claras, cinza, branco ou amarelo que repousa sobre a formação Pimenteira. Sua parte inferior é composta de arenitos finos a médios, de coloração amarela ou creme e também arenitos grosseiros conglomeráticos geralmente branco ou cinza. Para cima continuam arenitos grosseiros com estratificação cruzada, ora duros, ora friáveis, e arenitos mais finos, amarelo ou cinza. Intercalações de siltitos e folhelhos cinzentos ou vermelhos e roxos também ocorrem, apresentando certa semelhança com os fácies da formação Pimenteira, mas a espessura dos acamamentos e a maior predominância de arenitos marca bem o caráter da formação Cabeças (CRUZ, 1966). Na área em estudo apresenta-se com pequena espessura e apenas em sua parte inferior.

A idade desta formação é Devoniano Médio. Aflora em 425 km² do município, ou 29% da área total.

4.1.6.2.5 – Rochas Quaternárias/Terciárias

Ocupando 2% da área do município, correspondem à coberturas arenosas, detríticas ou lateríticas procedentes, principalmente, da erosão fluvial.

4.1.7 - Hidrogeologia

A análise geológica da área mostra que do conjunto de formações sedimentares distinguem-se dois aquíferos principais, o Serra Grande e o Cabeças, separados pelo aquífero Pimenteiras que, em situações localizadas, pode se apresentar como formação aquífera de baixa produção.

4.1.7.1 - Aquífero Cabeças

Constitui um dos melhores reservatórios de águas subterrâneas da Bacia do Parnaíba (COSTA e COSTA FILHO, 1995), mas dada a sua situação marginal e pequena espessura na área em estudo, não apresenta maiores possibilidades de exploração.

4.1.7.2 - Aquífero Pimenteiras

A principal característica hidrogeológica da Formação Pimenteira, em escala regional, é a de uma barreira que separa o aquífero Serra Grande do aquífero Cabeças sobreadjacente. Entretanto, esta formação não se individualiza como uma camada confinante uniforme e persistente. A alternância de folhelhos e siltitos com camadas de arenitos forma um conjunto extremamente irregular que funciona como um “sistema de aquíferos repetidos”, com a espessura das unidades produtoras variando entre 3 e 40 metros, mas com baixa capacidade produtiva (CRUZ, 1966).

Os poços profundos perfurados nesta formação procuram, em geral, atingir o aquífero inferior. Algumas áreas de descargas naturais são representadas por fontes e influência na drenagem superficial. O rio Piauí mantém, nos períodos de estiagem, vários “poços” influenciados pela água deste aquífero (MENTE et al., 1965).

4.1.7.3 - Aquífero Serra Grande

O aquífero Serra Grande é o mais importante e mais produtivo da área. O limite inferior deste aquífero, no contato com as rochas pré-cambrianas, não é conhecido e não há informação de nenhum poço que tenha atingido o cristalino. A espessura do aquífero, entretanto, é estimada como variando entre 100 e 250 metros (MENTE, et al., 1965).

A área de afloramento da Formação Serra Grande se estende do sul do estado do Piauí até o norte, na Serra da Ibiapaba e Serra Grande, nos limites do Piauí com o Ceará, perfazendo 1200 km de extensão, o que, por si só, já reflete bem as condições excepcionais desse aquífero.

A ocorrência de poços jorrantes dentro do Município é constante, principalmente nos poços perfurados na direção NW. Merecem destaques dois poços perfurados pela CPRM: o primeiro na Fazenda Marrecas, com 320 metros de profundidade, apresentou uma vazão de 180 m³/h e uma surgência de 38 metros, medida por manômetro; o segundo na Fazenda Lisboa, com 282 metros de profundidades, vazão de 45 m³/h e surgência, determinada por manômetro, de 31 metros.

Acredita-se que os principais exutórios do aquífero Serra Grande sejam a evapotranspiração na área de recarga e a infiltração vertical ascendente que vai desde a Formação Pimenteiras até o Aquífero Cabeças, em virtude da maior carga hidráulica do Aquífero Serra Grande (FAHMA, 2000).

Testes realizados pela SUDENE no município permitem que sejam adotados como representativos do Aquífero Serra Grande uma transmissividade $T = 6,97 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e um coeficiente de armazenamento $S = 2,8 \times 10^{-4}$. Supõe-se que a transmissividade aumente na direção oeste em função do aumento de espessura (SIRAC, 1987).

4.1.8 - Solos

O Mapa Exploratório de Reconhecimento de Solos do Estado do Piauí na escala 1:1.000.000, elaborado pelo convênio EMBRAPA/SUDENE, identificou 13 tipos de

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

unidades de mapeamento pedológicos compostos pela associação de dois ou mais tipos de solos para o município de São João do Piauí. Segundo este trabalho, há a predominância de unidades de mapeamento em que prevalecem as areias quartzosas (35,20% de toda a área do município), latossolos amarelos (26,81%) e solos litólicos (21,50%). O município apresenta, ainda, associações onde prevalecem podzólicos vermelho-amarelos (9,58%), solos aluviais (6,75%) e podzólicos vermelho-amarelos eutróficos (0,15% da área do município).

O mapa de solos do município, adaptado a partir do levantamento da EMBRAPA/SUDENE é apresentado na figura 20. A descrição de cada unidade de mapeamento é apresentada a seguir:

- a) AQ6 - Associação de: AREIAS QUARTZOSAS + LATOSSOLO AMARELO, textura média, ambos fase relevo plano + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO, raso e não raso, plíntico e não plíntico, textura arenosa e média/média e argilosa, fase relevo suave ondulado ou suave ondulado e ondulado + SOLOS LITÓLICOS, textura arenosa e média, fase pedregosa e rochosa, relevo suave ondulado e ondulado, substrato arenito, todos ÁLICOS e DISTRÓFICOS, A fraco e moderado, fase caatinga hipoxerófila e/ou caatinga/cerrado caducifólio. Ocorre em 3.217 ha, ou 21,22% da área do município;
- b) AQ10 - Associação de: AREIAS QUARTZOSAS + LATOSSOLO AMARELO textura média, ambos ÁLICOS e DISTRÓFICOS, A fraco e moderado, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano. Representa 13,98% da área total, ou seja, 2.120 ha;
- c) LA21 - Associação de: LATOSSOLO AMARELO textura média + LATOSSOLO AMARELO textura argilosa, ambos ÁLICOS e DISTRÓFICOS, A moderado, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano. Ocorre numa área de 624 ha (4,12% da área do município);

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

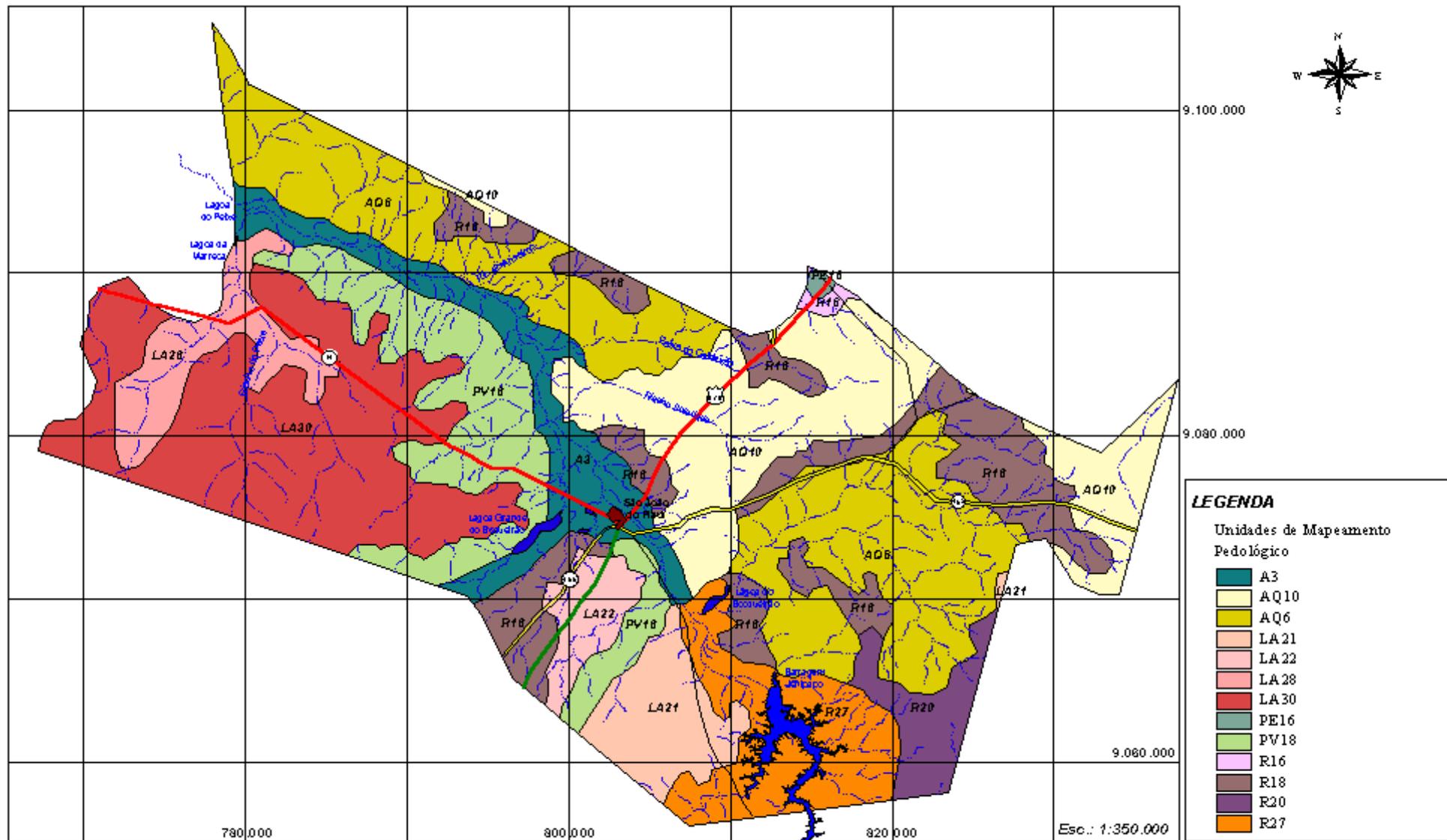


Figura 20 - Mapa de solos do município de São João do Piauí (Adaptado de EMBRAPA/SUDENE, 1986)

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

d) LA22 - Associação de: LATOSSOLO AMARELO ÁLICO e DISTRÓFICO textura média e argilosa, fase não pedregosa e pedregosa, relevo plano e suave ondulado + GRUPAMENTO INDISCRIMINADO de (PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO DISTRÓFICO e EUTRÓFICO, plântico e não plântico, textura média/argilosa e SOLOS LITÓLICOS ÁLICOS, DISTRÓFICOS e EUTRÓFICOS textura média e arenosa, fase pedregosa e rochosa, substrato arenito e siltito e/ou folhelho, ambos fase relevo suave ondulado ou suave ondulado e ondulado), todos A moderado, fase caatinga hipoxerófila. Corresponde a 325 ha, ou seja, 2,14% da área em estudo;

e) LA28 - Associação de: LATOSSOLO AMARELO textura média + AREIAS QUARTZOSAS, ambos ÁLICOS e DISTRÓFICOS, + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Tb DISTRÓFICO e EUTRÓFICO, plântico e não plântico, textura arenosa e média/média e arenosa + GRUPAMENTO INDISCRIMINADO de (PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO DISTRÓFICO e EUTRÓFICO, raso e não raso, plântico e não plântico, textura média e textura média/argilosa, fase relevo suave ondulado e ondulado e SOLOS LITÓLICOS ÁLICOS, DISTRÓFICOS e EUTRÓFICOS, textura média e arenosa, fase pedregosa e rochosa, relevo suave ondulado e ondulado, substrato arenito e siltito), todos A fraco e moderado, fase caatinga hipoxerófila e/ou caatinga/cerrado caducifólio. Representa 3,99% da área municipal, o que equivale a 604 ha;

f) LA30 - Associação de: LATOSSOLO AMARELO textura média + AREIAS QUARTZOSAS, ambos ÁLICOS e DISTRÓFICOS, A fraco e moderado, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano. Ocorre em 16,57% da área total, ou seja, 2.512 ha;

g) PV18 - Associação de: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO ÁLICO, DISTRÓFICO e EUTRÓFICO plântico e não plântico, textura média e textura média/argilosa, fase relevo suave ondulado + SOLOS LITÓLICOS ÁLICOS e DISTRÓFICOS e EUTRÓFICOS, textura arenosa e média, fase pedregosa e rochosa, relevo suave ondulado e ondulado, substrato arenito, siltito e folhelho + LATOSSOLO AMARELO ÁLICO e DISTRÓFICO textura média, fase relevo plano e suave ondulado, todos A moderado, fase caatinga hipoxerófila e/ou

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

caatinga/cerrado caducifólio. Apresenta área de ocorrência de 1.453 ha (9,58% da área municipal);

h) PE16 - Associação de: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Tb EUTRÓFICO e DISTRÓFICO, plântico e não plântico, textura média e textura média/argilosa + GRUPAMENTO INDISCRIMINADO de (PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Ta EUTRÓFICO, raso e não raso e BRUNO NÃO CÁLCICO, ambos textura média e textura média/argilosa, fase pedregosa II e não pedregosa), todos A moderado, fase caatinga hipoxerófila, com e sem carnaúba, relevo plano e suave ondulado + SOLOS ALUVIAIS Ta e Tb EUTRÓFICOS, A moderado, textura indiscriminada, fase floresta ciliar de carnaúba e floresta/caatinga de várzea com e sem carnaúba, relevo plano. Esta unidade de mapeamento representa apenas 22 ha da área do município (0,15% do total);

i) R16 - Associação de: SOLOS LITÓLICOS, textura média e arenosa, fase pedregosa e rochosa, substrato arenito, siltito e/ou folhelho + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO, raso e não raso, plântico e não plântico, textura arenosa e média/média e argilosa, ambos ÁLICOS, DISTRÓFICOS e EUTRÓFICOS, A moderado e fraco, fase erodida e não erodida, caatinga hipoxerófila e/ou caatinga/cerrado caducifólio, relevo suave ondulado e ondulado. Corresponde a uma área de apenas 42 ha, ou 0,28% do total;

j) R18 - Associação de: SOLOS LITÓLICOS, textura média e arenosa, fase pedregosa e rochosa, substrato arenito, siltito e/ou folhelho + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO, raso e não raso, plântico e não plântico, textura média e textura média/argilosa, ambos ÁLICOS, DISTRÓFICOS e EUTRÓFICOS, fase erodida e não erodida, relevo suave ondulado a forte ondulado + LATOSSOLO AMARELO ÁLICO e DISTRÓFICO, textura média, fase relevo plano e suave ondulado, todos A moderado e fraco, fase caatinga hipoxerófila e/ou caatinga/cerrado caducifólio. Esta unidade ocorre em 11,42% da área estudada, ou seja, 1.731 ha);

l) R20 - Associação de: SOLOS LITÓLICOS, textura média e arenosa, fase pedregosa e rochosa, relevo ondulado a montanhoso, substrato arenito, siltito e/ou folhelho e/ou quartzito + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO, raso e não

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

raso, plântico e não plântico, textura média e textura média/argilosa, fase relevo suave ondulado a forte ondulado, ambos ÁLICOS, DISTRÓFICOS e EUTRÓFICOS, A moderado e fraco, fase erodida e não erodida, caatinga hipoxerófila e/ou caatinga/cerrado caducifólio + AFLORAMENTO DE ROCHA. Representa 408 ha, ou 2,69% do total;

m) R27 - Associação de: SOLOS LITÓLICOS EUTRÓFICOS e DISTRÓFICOS, textura arenosa e média, fase pedregosa e rochosa, substrato gnaisse, granito, micaxisto e/ou quartzito + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO CONCRECIONÁRIO EUTRÓFICO, raso e não raso, plântico e não plântico, textura média e textura média/argilosa, ambos fase relevo suave ondulado a forte ondulado + BRUNO NÃO CÁLCICO, vértico e não vértico, textura média/argilosa, fase pedregosa II, relevo suave ondulado e ondulado, todos A fraco e moderado, fase erodida e não erodida, caatinga hiperxerófila. Ocorre me 1.078 ha, representando 7,11% da área municipal;

n) A3 - Associação de: SOLOS ALUVIAIS Ta e Tb + SOLOS ALUVIAIS Ta solódicos, ambos textura indiscriminada + CAMBISSOLO Ta e Tb textura média, argilosa e siltosa, fase substrato sedimentos, todos fase floresta ciliar de carnaúba, caatinga hipoxerófila e floresta/caatinga de várzea com carnaúba + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Ta e Th plântico e não plântico, textura arenosa e média/média e argilosa, fase caatinga hipoxerófila com e sem carnaúba, todos EUTRÓFICOS, A moderado, fase relevo plano. Esta unidade de mapeamento, que ocorre ao longo do vale do rio Piauí, corresponde a 6,75% da área em estudo (1.024 ha).

4.1.8.1 - Solos Irrigáveis

A SIRAC realizou, dentro do Projeto de Viabilidade de Irrigação do Vale do Rio Piauí, o estudo, em nível de semi-detalhe, de 3.266 ha ao longo do vale dentro do município de São João do Piauí, partindo da localidade Nica até a Fazenda Marrecas. Foram identificadas sete classes de solos representando solos individuais ou associações de dois tipos de solos. Segundo o estudo, 3.062 ha, ou 93,8% do total, seriam compostos por solos passíveis de serem irrigados, com predomínio de solos com aptidão para

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

policultura. A localização de cada unidade mapeada é apresentada na figura 21 e a sua descrição é feita a seguir (SIRAC, 1987):

a) *Ae1 - SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS*, A moderado, textura média, fase caatinga de várzea, relevo plano, drenagem boa e moderada.

Esta unidade possui uma área de 506 ha, correspondendo, portanto, 15,5% da superfície total levantada. São terras com solos profundos, bem e moderadamente drenados, com predominância de textura média, A fraco e moderado com espessura de 7 a 12 cm.

Encontram-se em áreas acessíveis e são utilizadas com culturas do milho e capineiras. Incluem terras com baixa exigência quanto ao uso de fertilizantes, para manutenção do seu estado nutricional, podendo ser exploradas com policultura (feijão, milho, algodão, fruticultura, pastagens e hortículas de verão).

b) *Ae2 - SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS*, A moderado, textura média, fase caatinga de várzea, relevo plano, drenagem moderada a imperfeita.

Esta unidade possui uma área de 436 ha, correspondendo, portanto, 13,3% da área levantada. São solos profundos, moderadamente a imperfeitamente drenado, de textura média, A moderado com espessura de 6 a 15 cm.

Encontram-se em áreas acessíveis e são utilizadas com culturas da banana, cana irrigada e capineiras. Incluem terras com baixas necessidades de fertilizante para manutenção de seu estado nutricional, podendo ser exploradas com policultura.

c) *Ae3 - SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS*, A moderado, textura média/arenosa, fase caatinga de várzea, relevo plano, drenagem moderada a imperfeita.

Esta unidade possui uma área de 461 ha, correspondendo, portanto 14,1% da área total. São terras com solos profundos, moderadamente e imperfeitamente drenados, textura média/arenosa, A moderado, com espessura de 10-35 cm.

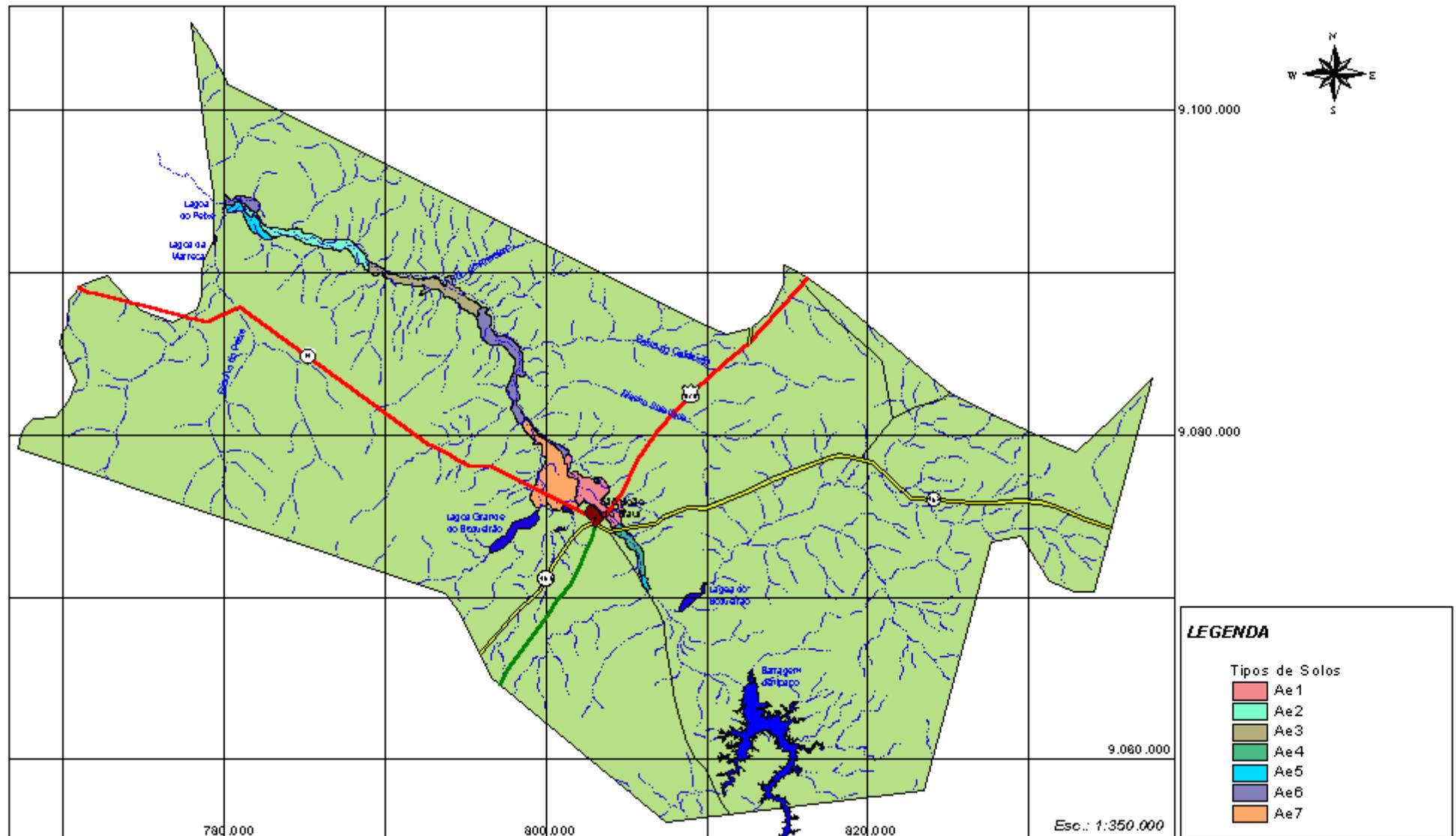


Figura 21 - Levantamento semi-detalhado dos solos do vale do rio Piauí em São João do Piauí (Adaptado de SIRAC, 1987)

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Encontram-se em áreas acessíveis e são utilizadas com culturas do milho e área de pastagem extensiva. Incluem terras com baixas necessidades de fertilizantes, para manutenção do seu estado nutricional, podendo ser exploradas com policultura.

d) *Ae4 - SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS SOLÓDICOS* (na superfície), A moderado, textura média e arenosa, fase caatinga de várzea, relevo plano e suave ondulado, drenagem boa e moderada.

Esta unidade possui uma área de 168 ha, correspondendo, portanto, a 5,1% da superfície levantada. São solos profundos, bem drenados de textura média e arenosa, A moderado, com espessura de 11-24 cm.

Encontram-se em áreas acessíveis e são utilizadas com cultura de milho e feijão. Incluem terras com baixas necessidades de fertilizantes, para manutenção de seu estado nutricional, podendo ser exploradas com policultura.

e) *Ae5 - Associação de: SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS + SOLONCHAK SOLONÉTZICO*, todos A moderado, textura média e argilosa, fase caatinga de várzea relevo plano drenagem má e muito má.

Esta unidade possui uma área de 204 ha, correspondendo a 6,2% da área levantada. São solos profundos, mal e muito mal drenados, de textura média e argilosa, A moderado com espessura de 15-20 cm.

Encontram-se em áreas acessíveis, e ocupadas apenas por vegetação constituída por gramíneas e carnaúbas. Incluem terras com exigências demasiadamente elevadas de práticas corretivas para a eliminação do excesso de sais, a fim de que possam ser utilizadas economicamente.

f) *Ae6 - Associação de: SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS* textura média/arenosa, fase drenagem imperfeita + *SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS*, textura média, fase drenagem boa e acentuada, ambos A moderado, fase caatinga de várzea, relevo plano.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Esta unidade possui uma área de 640 ha correspondendo, portanto 19,6% da superfície total levantada. São solos profundos, bem a imperfeitamente drenados, A fraco e moderado com espessura de 8-22 cm.

Encontram-se em áreas acessíveis e são utilizados com culturas do milho, feijão e pastagem extensiva. Incluem terras com baixas necessidades de fertilizantes, para manutenção de seu estado nutricional, podendo ser utilizados com policulturas desde que sejam irrigados por aspersão.

g) *Ae7 - ASSOCIAÇÃO DE SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS SALINOS* (em profundidade) + *SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS SOLÓDICOS*, ambos A moderado, textura média e argilosa fase caatinga de várzea relevo plano drenagem imperfeita e má.

Esta unidade possui uma área de 851 ha, correspondendo a 26,2% da superfície total. São solos profundos, moderadamente e imperfeitamente drenados, textura média e argilosa, A moderado com espessura de 10 a 18 cm.

Encontram-se em áreas acessíveis, e são utilizadas com a cultura do milho, feijão, algodão e fruticultura. Incluem terras com baixas necessidades de fertilizantes para manutenção do seu estado nutricional, devendo ser utilizadas com arroz, ou irrigação por sulco, desde que se faça as obras de drenagem necessárias.

4.1.9 - Demografia

A população total do município, segundo resultados preliminares do censo de 2000 do IBGE é de 17.666 habitantes, sendo que 11.352 pessoas vivem na sede municipal (64,3% do total) e os 6.314 restantes na zona rural, ou 35,7% da população total.

A figura 22 apresenta a evolução da população urbana no município segundo os censos de 1980, 1991 e 2000 e a contagem da população realizada em 1996. No período de 1980-1991, a população urbana cresceu a uma taxa geométrica média de 2,6%. No período de 1991 a 1996 a taxa decresceu para o valor de 1,9% ao ano, voltando a crescer no período de 1996 a 2000, quando atingiu o valor anual de 3,0%.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Quanto à população total, esta cresceu a uma taxa geométrica média de 3,4% ao ano no período 1996-2000, superando a taxa de crescimento da população urbana. Já a população rural saltou de 5.518 habitantes em 1996 para 6.314 em 2000, apresentando, pois, uma taxa geométrica média de 3,2% ao ano. A tabela 13 apresenta a população urbana, rural e total para o município de acordo com os dados do IBGE. É importante ressaltar que em 1994 foram desmembrados, total ou parcialmente de São João do Piauí, seis novos municípios, o que explica a variação brusca na população rural, e conseqüentemente na população total, registrados pelos dados censitários.

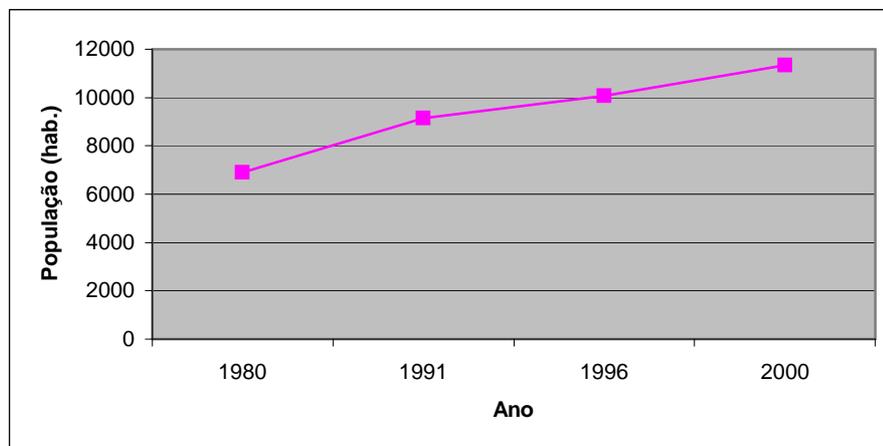


Figura 22 - Evolução da população urbana do município de São João do Piauí

Tabela 19 - Evolução da população do município de São João do Piauí

Ano	População		
	Urbana	Rural	Total
1980	6.907	27.646	34.553
1991	9.155	29.017	38.172
1996	10.071	5.518	15.589
2000	11.352	6.314	17.666

Fonte: IBGE

4.1.10 - Pecuária

A tabela 20 apresenta o número de cabeças para os diversos tipos de rebanhos existentes na área em estudo para os anos de 1990, 1997 e 1999 e a porcentagem que estes representavam em relação aos rebanhos estaduais para os respectivos anos. Na tabela também é apresentada a taxa de crescimento geométrico de cada rebanho verificada

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

para o período 1997-1999.

Tabela 20 - Efetivos da pecuária e das aves para o município de São João do Piauí, sua participação em relação ao estado e taxa geométrica de variação no período 1997-1999

Tipo de rebanho	Cabeças			% do Estado			Variação 1997-1999
	1990	1997	1999	1990	1997	1999	
Bovino	73.473	12.619	12.796	3,7	0,7	0,7	0,70%
Suíno	39.650	7.791	7.705	2,4	0,6	0,5	-0,55%
Eqüino	4.558	1.062	1.066	2,7	0,7	0,7	0,19%
Asinino	9.600	1.816	1.830	4,4	0,9	0,9	0,38%
Muar	2.084	330	328	4,0	0,9	0,8	-0,30%
Ovino	59.034	9.723	10.115	4,9	0,7	0,7	2,00%
Caprino	117.521	11.172	10.730	5,9	0,7	0,7	-2,00%
Galinhas	49.029	9.331	9.766	1,7	0,4	0,4	2,30%
Galos, Frangas, Frangos e Pintos	91.055	17.328	18.135	1,7	0,3	0,3	2,30%

Fonte: IBGE - Pesquisa da pecuária Municipal

Como pode ser notado, com a emancipação dos novos municípios, diminuiu substancialmente a participação de São João do Piauí com relação à composição dos rebanhos estaduais, principalmente quanto às três principais criações animais do município: caprino, que diminuiu de 5,9 para 0,7% do total estadual; ovino, 4,9 para 0,7%; e bovino, 3,7 para 0,7%. Os rebanhos suíno, muar e caprino foram os únicos que apresentaram redução do número de cabeças entre os anos de 1997 e 1999. As aves, por outro lado, tiveram o número de cabeças aumentado em uma taxa geométrica de 2,3% ao ano no mesmo período.

Excluindo as aves, o maior rebanho do município é o bovino, com mais de 12.000 cabeças, seguido de perto pelos rebanhos caprino (10.730) e ovino (10.115).

4.1.11 - Agricultura

A tabela 21 apresenta a produção agrícola do município para os anos de 1998 e 1999. Os dados demonstram o amplo predomínio das culturas temporárias com relação às permanentes. No ano de 1999, por exemplo, as culturas temporárias representavam mais de 98% de toda a área plantada. A principal cultura da região é o milho, que em 1999

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

representou mais de 48% da produção total em toneladas, tendo sido plantado em mais de 67% de toda a área cultivada. Quanto à rentabilidade, entretanto, o destaque fica por conta da banana, que rendeu em ambos os anos mais de R\$ 3.000,00 para cada hectare plantado.

Tabela 21 - Quantidade produzida, valor da produção e área plantada e colhida para as culturas exploradas no município de São João do Piauí para os anos de 1998 e 1999

Cultura	Quantidade Produzida (t)		Valor da Produção (1.000 R\$)		Área Plantada (ha)		Área Colhida (ha)	
	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999
Lavoura Permanente								
Banana	24	11	60	28	19	9	19	9
Castanha de caju	4	15	2	14	45	45	45	45
Coco-da-baía	20	20	6	6	4	4	4	4
Laranja	30	15	2	1	2	1	2	1
Manga	87	100	5	6	5	4	5	4
Total Lavouras Permanentes	165	161	75	55	75	63	75	63
Lavoura temporária								
Algodão herbáceo (em caroço)	1	11	1	6	86	25	86	25
Arroz (em casca)	226	57	87	17	262	169	262	85
Feijão (em grão)	10	173	14	93	479	866	479	866
Mandioca	458	1.525	32	107	83	83	83	83
Milho (em grão)	296	1.662	81	266	1.951	2.518	1.951	2.518
Total Lavouras Temporárias	991	3.428	215	489	2.861	3.661	2.861	3.577
Total Geral	1.156	3.589	290	544	2.936	3.724	2.936	3.640

Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal

Segundo o PDRH da bacia dos rios Canindé/Piauí (FAHMA, 2000), as atividades de irrigação no município "ainda são raras e quase sempre desprovidas de técnicas". Segundo LANNA e ROCHA (2000), existiriam em 2000 apenas 379,8 ha irrigados em São João do Piauí, não sendo discriminados, entretanto, as culturas e os métodos de irrigação utilizados.

4.2 - Avaliação das Demandas

4.2.1 - Abastecimento Urbano

4.2.1.1 - Situação Atual

O abastecimento urbano do município está atualmente a cargo da AGESPISA, companhia estadual de saneamento. Segundo dados da companhia, o abastecimento atinge 100% da população urbana, ou seja, 11.352 pessoas. A água explorada do aquífero Serra Grande, por meio de uma bateria de poços, é distribuída através de uma rede com 42.699 metros de extensão para um total de 3.560 ligações, sendo que 59% destas possuem hidrometração.

Não foi possível determinar o volume de água captado pela AGESPISA, tendo sido adotada, para a avaliação da demanda, a taxa *per capita* de 120 l/hab/dia, como sugerido na tabela 01. Desta forma, a demanda para o abastecimento urbano na situação atual é de 15,77 l/s. Admitindo-se uma perda na distribuição equivalente a 20%, a vazão captada é de 18,92 l/s ou 68,11 m³/h, explorada a partir do aquífero Serra Grande.

4.2.1.2 - Situação Futura

Atualmente, o Piauí não dispõe de nenhuma adutora de grande porte que promova o aproveitamento das grandes barragens construídas em seu território. Este quadro, entretanto, está em vias de sofrer uma drástica, e benéfica alteração. No âmbito do Proágua/Semi-árido, foram propostas pela SEMAR três adutoras que, aproveitando-se de barragens já existentes ou em vias de conclusão e que não possuíam aproveitamento efetivo, irão resolver os problemas de abastecimento de cerca de 28 cidades do semi-árido piauiense. A partir deste fato, os novos reservatórios propostos já contemplam a construção de adutoras para o abastecimento urbano das cidades circunvizinhas.

Para o horizonte de 25 anos, parece razoável supor que uma adutora também seja proposta para a barragem Jenipapo objetivando o abastecimento das sedes municipais mais próximas ao reservatório. Desta forma, admitiu-se que no ano de 2025 seriam

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

abastecidas, com as águas represadas, as cidades de São João do Piauí, Campo Alegre do Fidalgo, Capitão Gervásio Oliveira, João Costa, Nova Santa Rita e Pedro Laurentino.

Com exceção de São João do Piauí, todas as outras cidades foram criadas em 1994, sendo que todas elas são originadas, total ou parcialmente, de São João. Dado o caráter incipiente destas cidades, cujas populações eram inferiores a 500 habitantes em 2000, segundo o IBGE, resolveu-se adotar a taxa de crescimento geométrico de 3,53%, valor usualmente utilizado para projetos de abastecimento de água de pequenas comunidades. Já para a cidade de São João do Piauí foi adotada a taxa verificada no período 1996-2000. A tabela 22 apresenta as populações previstas e as vazões demandadas esperadas.

Tabela 22 - Populações previstas e demanda para abastecimento urbano a partir do reservatório Jenipapo para o ano de 2025

Cidade	Taxa de Crescimento (%)	População		Taxa "per capita" (l/hab/dia)	Demanda (l/s)
		2000	2025		
Campo Alegre do Fidalgo	3,53	417	985	120	1,64
Capitão Gervásio Oliveira	3,53	358	846	120	1,41
João Costa	3,53	453	1.071	120	1,78
Nova Santa Rita	3,53	402	950	120	1,58
Pedro Laurentino	3,53	447	1.056	120	1,76
São João do Piauí	0,030	11.352	23.992	150	49,98
Total	-	13.429	28.901	-	58,16

4.2.2 - Abastecimento Rural

4.2.2.1 - Situação Atual

Algumas comunidades rurais de maior porte do município de São João do Piauí possuem pequenos sistemas de abastecimento para suprir suas necessidades diárias captando a água do aquífero Serra Grande a partir de poços tubulares. Outros usuários, distribuídos de forma mais esparsa na área rural, utilizam-se de poços amazonas, tubulares, fontes e pequenos córregos. Dadas as características locais, optou-se por considerar que a demanda para abastecimento rural é totalmente suprida pela utilização de águas subterrâneas.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

A população rural do município, segundo o censo 2000, é de 6.314 habitantes. Considerando-se uma taxa de consumo *per capita* de 80 l/hab/dia, como adotado no PDRH da bacia dos rios Canindé/Piauí (item 2.1.3), a vazão total demandada é de 5,85 l/s, ou 21,05 m³/s.

4.2.2.2 - Situação Futura

A população rural para o ano de 2025 foi estimada através da diferença entre a população total e a população urbana previstas a partir de suas respectivas taxas de crescimento geométrico registradas no período de 1996-2000.

Como a taxa de crescimento da população total foi de 3,4% (item 4.1.8), a população prevista para 2025 seria de 38.605 habitantes. Como a população urbana prevista para o mesmo período é de 23.992 (item 4.2.1.2), a população rural estimada seria de 14.613.

Admitindo-se que, em 25 anos sejam melhoradas as condições de acesso e utilização da água na área rural do município, decidiu-se adotar a taxa de consumo *per capita* de 120 l/hab/dia, o que resultaria numa demanda total de 20,30 l/s, ou 73,07 m³/h, a serem supridas por águas subterrâneas.

4.2.3 - Abastecimento Industrial

4.2.3.1 - Situação Atual

Dada a falta de informações mais consistente sobre este tipo de uso, optou-se por adotar a recomendação do PLIRHINE de considerar o consumo industrial como um percentual do consumo humano urbano. Este percentual seria atualmente, para o Estado do Piauí, algo em torno de 0,68% (LANNA e ROCHA, 2000). Logo, o consumo industrial para o município de São João do Piauí corresponderia ao valor de 0,13 l/s.

4.2.3.2 - Situação Futura

Segundo MARWELL FILHO (1995) e LANNA e ROCHA (2000), é de se esperar que,

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

ao longo do horizonte de planejamento de 25 anos, o Piauí atinja os valores semelhantes de industrialização aos considerados pelo PLIRHINE. Desta forma, considerou-se que, em 2025, o consumo industrial do município seria correspondente a 25% do consumo para abastecimento urbano (item 2.1.1.2). Assim, o valor demandado seria de 12,50 l/s, a serem supridos a partir do reservatório Jenipapo.

4.2.4 - Abastecimento Animal

4.2.4.1 - Situação Atual

O consumo animal, na pecuária, foi estimado em função do consumo bovino, adotando-se a unidade hipotética BEDA, definida no item 2.1.2, e o coeficiente de demanda igual a 50 l/BEDA/dia, como recomenda o PLIRHINE.

A partir dos dados do número de cabeças por rebanho existentes no município apresentados na tabela 15, foi possível calcular a unidade BEDA como igual a 22.116 cabeças, e o consumo animal igual a 12,80 l/s. Deste total, parte seria suprido através de fontes superficiais (o lago da barragem e o trecho perenizado do rio Piauí) e subterrâneas.

Para determinar a parcela abastecida por águas superficiais utilizou-se o seguinte procedimento:

- Determinou-se a área limitada pela distância de 4 km (item 2.1.2) do rio e do reservatório, equivalente a 563 km². Somente os animais presentes nesta área teriam condições de serem abastecidos a partir das águas do reservatório;
- Calculou-se a parte da demanda suprida superficialmente multiplicando-se a demanda total de 12,80 l/s pela razão entre a área delimitada acima pela área total do município. O valor assim determinado é de 4,84 l/s.

A parte que caberia às águas subterrâneas seria, então, igual a 7,96 l/s. Quanto às aves, admitiu-se que todo o contingente seria abastecido através de poços e que o consumo *per capita* seria de 0,20 l/cabeça, o que resultaria em 0,06 l/s. Desta forma, o consumo animal total a ser suprido através do aquífero seria de 8,02 l/s.

4.2.4.2 - Situação Futura

O número de cabeças previstos para o ano 2025 é apresentado na tabela 23. Os valores foram calculados através do uso do método do crescimento geométrico (item 2.1.1.1) com as taxas observadas no período 1997-1999, apresentadas na tabela 14.

Tabela 23 - Efetivos da pecuária e das aves previstos para o município de São João do Piauí no ano de 2025

Tipo de rebanho	Taxa de Crescimento (%)	Cabeças	
		1999	2025
Bovino	0,70	12.796	15.341
Suíno	-0,55	7.705	6.676
Eqüino	0,19	1.066	1.120
Asinino	0,38	1.830	2.020
Muar	-0,30	328	303
Ovino	2,00	10.115	16.927
Caprino	-2,00	10.730	6.346
Galinhas	2,30	9.766	17.639
Galos, Frangas, Frangos e Pintos	2,30	18.135	32.755

O consumo animal a ser suprido pelos recursos superficiais, calculado segundo o procedimento listado no item anterior, para o ano de 2025 é de 5,49 l/s. Já a parcela a que caberia aos recursos subterrâneos é de 9,16 l/s.

4.2.4 - Demanda para Irrigação

A demanda para a irrigação foi determinada multiplicando-se a área de cultivo pela quantidade máxima de água requerida pelas culturas e subtraindo-se a precipitação dependente para cada mês.

As necessidades hídricas são tomadas como igual a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m), determinada através da evapotranspiração de referência multiplicada pelo coeficiente de cultura correspondente (equação 5). Para a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) foi utilizado o programa Cropwat 4, que calcula os valores diários de ET_o pelo método combinado de Penman-Monteith a partir de

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

informações sobre a localização da área (latitude e altitude) e das normais climatológicas de temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade média dos ventos a 2 metros de altura e horas diárias de incidência solar, como descrito no item 2.1.4.1. Os valores de ETo assim determinado são listados na tabela 24.

Para a determinação da precipitação dependente calculou-se, inicialmente, a série histórica da precipitação média ocorrida no município, partindo-se dos dados históricos das seis estações pluviométricas listadas na tabela 15 e dos polígonos de Thiessen mostrados na figura 14. As falhas mensais foram preenchidas através da utilização do método do vetor regional (item 2.1.4.2.2).

Tabela 24 – Valores de ETo calculados pelo método de Penman-Monteith

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Umidade (%)	Vel. Vento (m/s)	Insolação (h)	Eto (mm/dia)	ETo (mm/mês)
Jan	32,7	21,6	72,0	2,3	6,1	4,5	139,5
Fev	33,2	21,8	66,0	2,5	6,9	5,3	147,8
Mar	32,4	21,5	70,0	1,9	6,3	4,8	148,8
Abr	33,3	21,3	51,0	2,2	8,2	6,1	183,9
Mai	33,9	20,5	55,0	2,6	9,1	6,5	200,0
Jun	34,0	20,5	45,0	3,3	9,6	7,4	222,6
Jul	33,6	20,7	42,0	3,7	9,9	7,9	244,9
Ago	34,2	21,4	40,0	3,8	10,0	8,3	258,5
Set	36,3	23,1	38,0	3,4	9,3	8,4	250,8
Out	36,7	23,6	39,0	3,4	8,7	8,1	251,4
Nov	35,6	22,3	52,0	2,5	7,5	6,0	181,2
Dez	34,8	22,1	58,0	2,3	6,9	5,3	164,6
Total Anual							2.394,1

A partir da série histórica, determinou-se, para cada mês cuja precipitação média fosse superior a 50 mm, a precipitação provável através da utilização da distribuição gama incompleta, como descrito no item 2.1.4.2, para as probabilidades de excedência de 10, 25, 50, 75, 85, 90 e 95% . Estes valores estão listados na tabela 25. Considerou-se nula a precipitação dependente para os meses com precipitação média inferior a 50 mm.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Tabela 25 – Precipitação provável para o município de São João do Piauí

Prob. Exc. (%)	Jan (mm)	Fev (mm)	Mar (mm)	Abr (mm)	Nov (mm)	Dez (mm)	Total (mm)
95	32,5	22,9	40,4	7,6	25,3	25,8	154,4
90	44,4	34,1	55,0	14,2	33,2	34,8	215,7
85	54,1	43,6	66,8	20,8	39,4	42,0	266,8
75	71,0	61,1	87,4	34,6	50,1	54,6	358,9
50	111,8	105,9	137,0	76,5	75,1	84,7	591,0
25	166,1	168,9	202,8	144,4	107,4	124,3	914,0
10	227,6	243,2	277,1	231,8	143,2	168,9	1291,8

Pode-se notar claramente a inviabilidade da produção agrícola da região sem que haja a utilização de métodos de irrigação, pois em todos meses a evapotranspiração potencial supera a precipitação média, que corresponde, aproximadamente, à precipitação provável com 50% de probabilidade de excedência.

Como não se dispõe de dados consistentes sobre as culturas irrigadas, admitiu-se a seguinte distribuição, baseando-se nos dados de produção agrícola apresentados na tabela 15: 1 ha de laranja, 4 ha de coco-da-baía, 4 ha de manga, 9 ha de banana, 85 ha de arroz e 276,8 ha de feijão, perfazendo os 379,8 ha indicados em LANNA e ROCHA(2000).

Considerou-se, ainda, que as frutas sejam irrigadas por aspersão, com eficiência de 75%, o arroz por inundação, com eficiência de 50%, e o feijão por sulcos, com eficiência de irrigação de 60%. As vazões necessárias por hectare foram calculadas através do programa Cropwat 4, já considerando a precipitação provável a 75%, sendo apresentadas na tabela 26 juntamente com a vazão total necessária a cada mês.

Admitiu-se que toda a demanda seja satisfeita através de recursos superficiais. Para efeito de cálculo dos índices de sustentabilidade, que serão tomados para o intervalo anual, considerar-se-á como demanda para a irrigação a máxima vazão mensal requerida, ou seja, 225,16 l/s, ocorrida no mês de fevereiro.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Tabela 26 – Demanda necessária para a irrigação

Demanda necessária em l/s/ha							Demanda Total (l/s)
Mês	Coco	Laranja	Manga	Banana	Arroz	Feijão	
Jan	0.22	0.22	0.33	0.46	0.26	0.28	106.29
Fev	0.15	0.15	0.30	0.39	0.66	0.59	225.16
Mar	0.18	0.18	0.38	0.44	0.70	0.45	191.44
Abr	0.48	0.48	0.73	0.79	0.46	0.02	57.56
Mai	0.76	0.76	1.06	1.22	0.00	0.05	31.57
Jun	0.83	0.83	1.19	1.47	-	-	22.20
Jul	0.88	0.88	1.29	1.60	-	-	23.97
Ago	0.90	0.90	1.28	1.65	-	-	24.47
Set	0.87	0.87	1.17	1.61	-	-	23.57
Out	0.79	0.79	1.00	1.48	-	-	21.26
Nov	0.48	0.48	0.63	0.93	-	-	13.32
Dez	0.33	0.33	0.45	0.61	-	-	8.92

4.2.4.2 - Situação Futura

Para a situação futura, face à inexistência de planejamento agrícola para o município, admitir-se-á, por simplificação, que a cada mês a necessidade hídrica das diversas culturas em conjunto correspondam ao valor de ETo. Desta forma, descontando-se a precipitação provável com 75%, ter-se-ia a vazão máxima requerida por hectare igual a 0,97 l/s. Admitindo-se que toda a área identificada como passível de irrigação (3.062 ha) seja cultivada e que a eficiência média na irrigação seja de 75%, ter-se-ia uma vazão máxima mensal de 3.950,36 l/s.

4.2.5 - Demanda Ecológica

Seguindo recomendação de MARWELL (1995), a demanda ecológica foi adotada como sendo igual a 10% da vazão regularizada a partir do reservatório.

4.3 - Potencialidade Hídrica

A potencialidade hídrica de uma bacia, como definido no capítulo 2, pode ser considerada como igual ao escoamento superficial total, calculado em termos médios de longo período. A bacia do reservatório Jenipapo apresenta uma potencialidade correspondente a 24,3 m³/s ou 2,10 hm³ por ano, valor este considerado para o município de São João do Piauí.

4.3 - Disponibilidade Hídrica

4.3.1 – Disponibilidade Hídrica Superficial

Dado o caráter de intermitência do rio Piauí, a disponibilidade hídrica superficial corresponde à vazão regularizada a partir do reservatório Jenipapo. Para o presente trabalho, admitiu-se a vazão regularizada com 90% de garantia, ou seja, a vazão mensal demandada que é atendida plenamente em 90% do tempo.

Como os resultados apresentados no item 3.1.2 mostraram que o modelo proposto no item 2.2.1.1 não apresentava vantagens significativas com relação ao modelo de geração de vazões totalmente independentes, optou-se por determinar a vazão regularizada a partir do reservatório Jenipapo através da utilização da pasta “Regulariza.xls” desconsiderando a persistência.

Considerou-se a curva cota-área-volume do reservatório apresentada na figura 17. A simulação foi iniciada em abril considerando o reservatório a 50% de sua capacidade máxima. A evaporação efetiva mensal foi calculada multiplicando-se a evaporação potencial medida em “Tanque Classe A” (tabela 14) pelo coeficiente 0,75, subtraindo-se, em seguida, a precipitação dependente apresentada na tabela 19.

Foram simuladas 50 séries com 100 anos cada, com demanda variando de 0,50 m³/s até 14 m³/s a cada 0,50 m³/s, perfazendo um total de 140.000 anos simulados. A vazão regularizada com 100% de garantia foi adotada igual ao menor dos cinquenta valores correspondentes à demanda plenamente atendida em 100% do tempo. Para outros níveis de garantia foi realizada uma análise de frequência, sendo adotado o valor igualado ou superado em 95% dos casos. As vazões regularizadas assim obtidas estão listadas na tabela 27.

Tabela 27 – Vazões regularizadas pelo reservatório Jenipapo para diversas garantias

Garantia (%)	100	95	90	85	80	75
Vazão (m ³ /s)	3,00	4,75	6,48	7,70	8,85	9,88

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

A disponibilidade hídrica superficial para o município de São João do Piauí corresponde à vazão regularizada com 90% de garantia, ou seja, 6,48 m³/s, não devendo ser alterada substancialmente nos próximos 25 anos.

4.3.2 – Disponibilidade Hídrica Subterrânea

Segundo o cadastro realizado pela CPRM em 1999, existiam no município de São João do Piauí 200 poços profundos explorando o aquífero Serra Grande, apresentando uma vazão média de 19,22 m³/h. Admitindo-se todos os poços operando 24 horas por dia, tem-se a disponibilidade subterrânea máxima do município igual a 92.256 m³/h, ou 1,06 m³/s.

A disponibilidade hídrica subterrânea no futuro não deve superar em 1/3 das reservas reguladoras do aquífero, permitindo, assim, o seu uso sustentável. Para a determinação da recarga potencial utilizou-se o modelo “Smag Modificado”, apresentado no item 2.2.2.1, utilizando-se como dados de entrada precipitações diárias geradas pelo modelo “Mero Modificado”, validado no item 3.2.2. Desconsiderou-se a superestimação da altura média precipitada verificada na fase de validação devido às precipitações geradas apresentarem valores compatíveis com as condições locais observadas (item 4.1.2.6).

Como mais de 80% da área de afloramento do aquífero Serra Grande no município está sob a influência do posto localizado na sede municipal, segundo os polígonos de Thiessen apresentados na figura 14, utilizou-se como parâmetros de entrada os valores determinados para este posto específico, já apresentados na tabela 07.

Tomou-se como parâmetro de calibração do modelo a lâmina anual média escoada, calculada a partir do método da SUDENE/ORSTOM (item 2.2.2.4). Segundo o cruzamento geo-espacial dos mapas geológico (figura 19) e de solos (figura 20) do município, foi possível determinar a área de cada unidade de mapeamento pedológico presente na área de afloramento da formação Serra Grande. Estas áreas, apresentadas na tabela 28 juntamente com os seus respectivos valores de L₆₀₀, permitiram a determinação do coeficiente L₆₀₀ da área de afloramento, calculado pela média ponderada em relação à área, igual a 28,83.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

Adotando-se o coeficiente de correção climática (C) e o coeficiente de correção de anomalias (Cr) igual a unidade, e o coeficiente A igual a 0,0033, como recomendam os autores, e a partir da precipitação média anual de 618,8 mm (item 3.2.2), pode-se calcular a lâmina anual média escoada L(P) através da equação 41. Desta forma, tem-se:

$$L(P) = 1 \times 1 \times 28,83 \times e^{0,0033 \times (618,8 - 600)}$$

$$L(P) = 30,68 \text{ mm}$$

Tabela 28 – Área das unidades de mapeamento pedológicos e seus respectivos valores de L_{600} para a área de afloramento da formação Serra Grande no município

Unidade de Mapeamento	Área (km ²)	L_{600}
A3	32,75	52,0
AQ6	143,98	16,0
AQ10	6,91	2,0
LA21	10,74	8,0
LA22	0,01	16,0
PV18	5,26	22,0
R18	44,27	37,0
R20	28,05	57,0
R27	25,23	44,0

O modelo “Smop Modificado” também foi implementado através da criação de uma pasta do programa EXCEL denominada “Recarga.xls”, contendo “macros” programadas em VBA. A pasta é composta por duas planilhas: planilha “Recarga”, onde são indicados os parâmetros do modelo de recarga (abstração inicial - A_i , capacidade de saturação do solo - SAT e capacidade de campo - CC), a evapotranspiração potencial diária para cada mês, o número de séries desejado, o número de anos por série, o mês de início da simulação e a umidade inicial do solo, e os resultados médios anuais obtidos de precipitação, evapotranspiração potencial e real, escoamento superficial e recarga; e a planilha “Chuva”, contendo os parâmetros para a geração de séries sintéticas já apresentados no item 3.2.

A partir dos mapas de solo e de vegetação, foi possível estimar, de forma preliminar, o valor de CN para a área de afloramento: 60, correspondendo a florestas em condições normais, assentes sobre solos arenosos com permeabilidade superior à média. O valor

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

da abstração inicial, calculada pela equação 32, resulta em cerca de 30 mm. Este valor, entretanto, é muito alto para simulações diárias. Optou-se por seguir a recomendação do manual do modelo SMAP, que sugere a adoção dos seguintes valores:

- 2,5 mm para campo;
- 3,7 mm para mata;
- 5,0 mm para floresta densa.

O valor adotado foi de 3,7 mm.

A capacidade de campo foi estimada inicialmente em cerca de 20%, de acordo com valores apresentados na tabela 3, e a capacidade de saturação do solo em 500 mm. Os três parâmetros foram então calibrados através do método da tentativa e erro, fazendo-se variar, em especial, os dois últimos parâmetros.

Na fase de calibração foram simuladas 10 séries com 100 anos, buscando-se igualar o escoamento superficial médio calculado com a lâmina média anual escoada, calculada em 30,68 mm. Os valores obtidos são: A_i igual a 3,7 mm; SAT igual a 580 mm e CC igual a 25%, resultando nos seguintes valores médios:

- Precipitação: 690,5 mm;
- Evapotranspiração real: 459,6 mm;
- Escoamento superficial: 30,45 mm;
- Recarga: 184,4 mm.

Estes valores foram referendados com a simulação de 10 série com 1000 anos de dados, resultando em uma recarga média anual de 180 mm, o que corresponderia, para a área de afloramento de 298 km², a uma vazão anual de 1,70 m³/s.

Como se pode notar, o município já apresenta uma capacidade instalada que corresponde a mais de 60% da recarga potencial. Admitindo-se que apenas 1/3 da recarga anual possa ser utilizada, a disponibilidade hídrica subterrânea deveria ser limitada a 0,57 m³/s, ou 17,87 hm³/ano, o que evidencia a necessidade premente de haver um controle mais rígido na utilização da água subterrânea no município.

4.4 - Aplicação dos Índices de Sustentabilidade

4.4.1 – Índice de Utilização da Disponibilidade - IUD

O índice de utilização da disponibilidade é calculado pela razão entre a demanda e a disponibilidade. Para a situação atual, tem-se as seguintes demandas, supridas a partir de água subterrânea: 18,92 l/s para abastecimento urbano; 5,85 l/s para abastecimento rural; 0,13 l/s para abastecimento industrial; e 8,02 l/s para abastecimento animal. Já a disponibilidade superficial é responsável pelo abastecimento das seguintes demandas: 4,84 l/s para abastecimento animal; 225,16 l/s para irrigação; e 648 l/s para a demanda ecológica.

O índice de utilização da disponibilidade superficial, para a situação atual, é de:

$$IUD_{\text{super}} = \frac{4,84 + 225,16 + 648}{6480} = 0,135$$

Para a disponibilidade subterrânea, o IUD é de:

$$IUD_{\text{sub}} = \frac{18,92 + 5,85 + 0,13 + 8,02}{1060} = 0,031$$

Já para a disponibilidade total, tem-se:

$$IUD_{\text{atual}} = \frac{910,92}{7540} = 0,121$$

Para a situação futura foi admitido que a disponibilidade subterrânea, através do controle da utilização, seria reduzido ao valor sustentável de 0,57 m³/s. Os índices para a disponibilidade superficial, subterrânea e total são calculados como:

$$IUD_{\text{super}} = \frac{58,16 + 12,50 + 5,49 + 3950,36 + 648,00}{6480} = 0,721$$

$$IUD_{\text{sub}} = \frac{20,30 + 9,16}{570} = 0,052$$

$$IUD_{\text{futura}} = \frac{4703,97}{7050} = 0,667$$

4.4.2 – Índice de Utilização da Potencialidade - IUP

O índice de utilização da potencialidade é calculado pela razão entre a demanda e a potencialidade. Os valores para a situação atual e futura são calculados abaixo:

$$IUP_{\text{atual}} = \frac{910,92}{24300} = 0,037$$

$$IUP_{\text{futura}} = \frac{4703,97}{24300} = 0,194$$

4.4.3 – Índice de Ativação da Potencialidade - IAP

O índice de ativação da potencialidade é calculado pela razão entre a disponibilidade e a potencialidade. Os valores para a situação atual e futura são calculados abaixo:

$$IAP_{\text{atual}} = \frac{7540}{24300} = 0,310$$

$$IAP_{\text{futura}} = \frac{7050}{24300} = 0,290$$

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 – Conclusões

A utilização dos índices apresentados por VIEIRA e VIEIRA (1995) são uma forma simples e eficaz de se avaliar o grau de utilização dos recursos hídricos de uma bacia, possibilitando a identificação de demandas reprimidas e de potenciais de desenvolvimento das ofertas hídricas no momento atual. Os índices também podem ser facilmente utilizados para avaliar cenários futuros, permitindo aos gestores dos recursos hídricos ferramentas indispensáveis para o planejamento de ações que influam diretamente no controle das demandas ou no aumento da disponibilidade hídrica da bacia, permitindo o equilíbrio entre oferta e demanda através da utilização racional dos recursos existentes.

No semi-árido nordestino, que apresenta uma vulnerabilidade natural quanto à satisfação de suas demandas devido aos frequentes períodos de estiagens, o gerenciamento efetivo dos recursos hídricos é indispensável para permitir condições dignas de vida à sua população. Entretanto, observa-se, nesta região, uma carência muito grande de informações hidrológicas, em especial fluviométricas, o que dificulta substancialmente a avaliação de seu potencial hídrico e prejudica o planejamento de obras necessárias para aumentar a oferta de água na região.

Muitos reservatórios foram construídos sem haver um planejamento para a utilização racional das águas armazenadas. Muitos deles, especialmente no estado do Piauí, sequer possuem uma estimativa confiável das vazões por eles regularizadas, informação indispensável para qualquer plano de aproveitamento racional da obra.

Nas regiões em que existe a possibilidade de captação de águas subterrâneas armazenadas em rochas sedimentares, em geral não existe um controle eficaz da

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

quantidade de água captada e se desconhece a recarga potencial apresentada pelo aquífero, o que leva, em muitos casos, a uma exploração desordenada e prejudicial aos recursos subterrâneos.

Por esta razão, foram propostos neste trabalho dois modelos que se utilizam da geração estocásticas de dados, visando identificar, com maior acuidade, a disponibilidade superficial, representada pela vazão regularizada a partir de um reservatório, e o limite sustentável da disponibilidade subterrânea, representado pela recarga potencial do aquífero. Ambos os modelos foram implementados em arquivos do programa EXCEL, facilitando o seu uso e difusão.

Foi proposta a união de um modelo gerador de vazões afluentes estocástico com um modelo de simulação em rede de fluxo para permitir a avaliação da vazão regularizada por um reservatório a partir do método de Monte Carlo. O modelo de geração de vazões consistia na geração de vazões anuais que posteriormente eram desagregadas em vazões mensais. Este modelo foi proposto com o objetivo de preservar a persistência dos períodos secos e úmido, observados na série histórica, nas séries geradas. Acreditava-se que, com isso, seria possível uma melhor avaliação das vazões regularizadas do que considerando as vazões anuais totalmente independentes.

O modelo foi aplicado a três rios do semi-árido piauiense com diferentes valores de persistência dos períodos seco e úmido e os resultados mostraram que, apesar de serem mantidas nas séries geradas as principais características estatísticas observadas, inclusive a persistência, este fato não acarretou melhoras significativas na estimativa da vazão regularizada do que quando se considerava as vazões anuais totalmente independentes, o que parece indicar que o modelo mais simples é o mais eficiente para este objetivo específico.

Para a avaliação da recarga potencial foi adaptado um modelo de simulação diário do ciclo hidrológico de ampla difusão, o modelo SMAP, com um modelo de geração de séries sintéticas de precipitação diária.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

O modelo “Mero Modificado” foi criado a partir de uma adaptação do modelo “Mero” original, permitindo que fosse considerada a persistência dos dias secos e chuvosos através da utilização de uma cadeia de Markov de primeira ordem. Foram mantidas, entretanto, a geração do número de dias chuvosos no mês e a altura precipitada através da utilização da distribuição Gumbel, como no original.

De maneira geral, o modelo “Mero Modificado” conseguiu reproduzir de forma altamente satisfatória o número de dias chuvosos e a persistência dos períodos secos e chuvosos. Quanto à altura precipitada, foi verificada uma superestimativa da precipitação média diária para todos os meses, o que acarretou a geração de precipitações médias mensais e anuais acima dos valores observados, ainda que as diferenças não representem, em média, mais do que 15% dos dados observados. Como o modelo foi aplicado a apenas uma situação, não é possível tirar conclusões definitivas sobre a necessidade ou não de se alterar a função densidade de probabilidade de geração das alturas precipitadas.

Quanto ao modelo de recarga, este pareceu responder de forma adequada aos objetivos esperados, evidenciando que um modelo de simulação diária adotando o método do SCS para a determinação do escoamento superficial é altamente factível para as bacias sedimentares nordestinas, em especial do Piauí. Não foi possível, entretanto, desenvolver uma ferramenta de auto-calibração do modelo devido às limitações computacionais da planilha EXCEL. Este fato, contudo, não inviabiliza a utilização do modelo pois a calibração dos três parâmetros pode ser facilmente realizada por tentativa e erro.

Para pequenas áreas ou bacias sem dados fluviométricos, o método da SUDENE/ORSTOM é uma boa alternativa para se determinar o escoamento superficial direto, uma das informações necessárias para se calibrar o modelo de recarga.

Quanto ao município de São João do Piauí, verificou-se que a vazão regularizada pela barragem Jenipapo varia entre 3,00 m³/s para uma garantia de 100%, até 9,88 m³/s para uma garantia de 75%. A disponibilidade hídrica superficial foi adotada igual à vazão regularizada com 90% de garantia, ou seja, 6,48 m³/s.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

A recarga potencial calculada para o aquífero Serra Grande no município foi de 52,56 hm³ por ano, o que corresponde a uma vazão de 1,70 m³/s. Verificou-se que existe uma disponibilidade instalada no município capaz de captar até 1,06 m³/s através do bombeamento ininterrupto de 200 poços existentes, com vazão média de 19,22 m³/h. Este valor supera em mais de 83% o valor recomendado de um terço da recarga potencial, ou seja, 0,57 m³/s ou 17,87 hm³/ano, evidenciando a necessidade de se efetuar um controle rigoroso na utilização deste poços e na abertura de novos, impedindo a superexploração do aquífero no município.

A aplicação dos índices de sustentabilidade evidenciaram o baixo aproveitamento dos recursos existentes na situação atual. O índice de utilização da disponibilidade é de apenas 0,121, sendo que a maior demanda considerada foi a ecológica, adotada igual a 10% da vazão regularizada. O índice de utilização da disponibilidade subterrânea é ainda mais baixo (0,031) evidenciando uma clara falta de planejamento na construção de obras de captação das águas do aquífero.

Já para a situação futura, o IUD evidencia o grande potencial da região para a produção agrícola, pois mesmo irrigando todas as terras adequadas identificadas no vale do rio Piauí e o reservatório sendo responsável pelo abastecimento de seis cidades, o valor do índice de utilização da disponibilidade superficial é de cerca de 72,1%, e 66,7% para a disponibilidade total, já considerando a disponibilidade subterrânea como sendo igual a 1/3 da recarga potencial.

Quanto à ativação do potencial, percebe-se que o município atingiu cerca da metade do valor máximo tecnicamente disponibilizável, apresentando valores de IAP em torno de 30%.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente trabalho trata de aspectos importantes para a gestão dos recursos hídricos, em especial de regiões semi-áridas, apresentando aspectos importantes para a avaliação das demandas e das disponibilidades hídricas de uma bacia. Entretanto, pelas próprias

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

limitações impostas, alguns aspectos não receberam a atenção merecida e precisam, pois, de trabalhos futuros para a sua completa implementação. Entre eles, destaca-se:

- ◆ A necessidade de se verificar a supremacia da geração de vazões anuais independentes sobre a geração considerando a persistência na avaliação da vazão regularizada, através da aplicação dos modelos para outros rios intermitentes da região semi-árida brasileira;
- ◆ Aplicar o modelo “Mero Modificado” a outros postos pluviométricos para se verificar a necessidade, ou não, de se adotar uma função densidade de probabilidade diferente da função Gumbel para gerar a altura precipitada nos dias chuvosos;
- ◆ Realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros abstração inicial, capacidade de saturação do solo e capacidade de campo do modelo de recarga com relação ao escoamento superficial e à recarga;
- ◆ Desenvolver uma ferramenta de auto-calibração dos parâmetros do modelo de recarga;
- ◆ Desenvolver um módulo próprio para a simulação do reservatório ao invés de utilizar o MODSIM, aumentando a velocidade de processamento;
- ◆ Verificar, para a barragem Jenipapo, a veracidade das vazões afluentes determinadas pela SIRAC quando do seu projeto.

ANEXOS

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

ANEXO I – Valores de L_{600} para as unidades de mapeamento pedológicos identificadas para o Piauí

Unidade de Mapeamento Pedológico	L_{600}
A2	51
A3	52
AQ5	0
AQ6	16
AQ7	14
AQ8	12
AQ10	2
AQ11	16
AQ12	22
BV4	31
LA6	18
LA19	8
LA20	8
LA21	8
LA22	16
LA23	10
LA27	6
LA28	12
LA30	3
LA31	10
LA32	9
LA33	12
LA34	3
LA35	10
LA36	8
LA37	14
LE	12
LV1	6
LV2	14
NC2	36
NC3	32
NC4	53
PE1	18
PE2	21
PE3	18
PE4	42
PE5	51
PE6	29
PE7	31
PE8	34
PE14	24
PE15	29
PE16	24

Unidade de Mapeamento Pedológico	L_{600}
PE17	26
PE18	17
PE19	22
PE20	39
PE21	28
PE22	21
PE23	29
PE24	29
PE25	40
PE26	28
PL4	53
PT7	38
PT8	40
PV7	33
PV18	22
PV19	25
PV20	38
R8	37
R9	31
R10	54
R11	54
R12	50
R13	40
R14	46
R15	25
R16	43
R17	44
R18	37
R19	31
R20	57
R21	43
R22	51
R23	45
R24	45
R25	42
R26	54
R27	44
R28	44
R29	44
R30	32
RE	31
SS2	91

Fonte: MOLLE e CADIER (1992)

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

ANEXO II – Código fonte das “macros” programadas em VBA

a) Pasta “Regulariza.xls”

Esta pasta é responsável pelo tratamento dos dados observado, determinação dos fragmentos, ajuste das distribuições Normal, Log-Normal e Gama à série histórica, obtenção dos parâmetros de persistência, geração das vazões anuais e desagregação em vazões mensais, execução das simulação do reservatório, compilação dos resultados e montagem das curvas de regularização.

```

Option Explicit
Option Base 1
Public Directorio As String 'diretorio de trabalho
'Obs: No mesmo diretório da planilha devem estar os arquivos Modexec.bat e modsim.exe
Public Type STARTUPINFO
    cb As Long
    lpReserved As String
    lpDesktop As String
    lpTitle As String
    dwX As Long
    dwY As Long
    dwXSize As Long
    dwYSize As Long
    dwXCountChars As Long
    dwYCountChars As Long
    dwFillAttribute As Long
    dwFlags As Long
    wShowWindow As Integer
    cbReserved2 As Integer
    lpReserved2 As Long
    hStdInput As Long
    hStdOutput As Long
    hStdError As Long
End Type

Public Type PROCESS_INFORMATION
    hProcess As Long
    hThread As Long
    dwProcessID As Long
    dwThreadID As Long
End Type

Public Declare Function WaitForSingleObject Lib "kernel32" (ByVal hHandle As Long,
ByVal dwMilliseconds As Long) As Long

Public Declare Function CreateProcessA Lib "kernel32" (ByVal _

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

lpApplicationName As Long, ByVal lpCommandLine As String, ByVal _
lpProcessAttributes As Long, ByVal lpThreadAttributes As Long, _
ByVal bInheritHandles As Long, ByVal dwCreationFlags As Long, _
ByVal lpEnvironment As Long, ByVal lpCurrentDirectory As Long, _
lpStartupInfo As STARTUPINFO, lpProcessInformation As _
PROCESS_INFORMATION) As Long

Public Declare Function CloseHandle Lib "kernel32" (ByVal _
hObject As Long) As Long

Public Const NORMAL_PRIORITY_CLASS = &H20&
Public Const INFINITE = -1&

Public Sub Total()
    Dim valor As Single
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim n As Integer

    While Cells(n + 2, 1).Value <> ""
        valor = 0
        For i = 2 To 13
            valor = valor + Cells(n + 2, i).Value
        Next i
        Cells(n + 2, 14).Value = valor
        Cells(n + 2, 15).Value = valor / 12
        n = n + 1
    Wend
End Sub

Public Sub Fragmentos()
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim valor As Single
    Dim n As Integer 'número de anos da série histórica

    While Sheets("Série Histórica").Cells(n + 2, 1).Value <> ""
        n = n + 1
    Wend

    'Calcula e armazena os fragmentos
    For i = 2 To n + 1 'linhas
        For j = 2 To 13 'colunas
            Cells(i, j).Value = Sheets("Série Histórica").Cells(i, j).Value /
Sheets("Série Histórica").Cells(i, 14).Value
        Next j
    Next i

    'Copia os totais anuais
    For i = 2 To n + 1 'linhas
        Cells(i, 1).Value = Sheets("Série Histórica").Cells(i, 14).Value
    
```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Next i

'Ordena em função do total anual
Range(Cells(1, 1), Cells(n + 1, 13)).Select
Selection.Sort Key1:=Range("A2"), Order1:=xlDescending, Header:=xlGuess, _
    OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom
Range("A1").Select

'Determina o intervalo inferior de cada classe
For i = 2 To n
    Cells(i, 1).Value = (Cells(i, 1).Value + Cells(i + 1, 1).Value) / 2
Next i
Cells(n + 1, 1).Value = 0
End Sub

Public Sub Normal()
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim valor As Single
    Dim n As Integer 'número de anos da série histórica

    'Descobre o número de dados
    While Cells(n + 5, 3).Value <> ""
        n = n + 1
    Wend

    'Preenche a ordem
    Cells(5, 1).Value = 1
    For i = 6 To n + 4
        Cells(i, 1).FormulaR1C1 = "=R[-1]C+1"
    Next i

    'Copia a série e ordena
    For i = 5 To n + 4
        Cells(i, 4).Value = Cells(i, 3).Value
    Next i

    Range(Cells(5, 4), Cells(n + 4, 4)).Select
    Selection.Sort Key1:=Range("D5"), Order1:=xlDescending, Header:=xlGuess, _
        OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom
    Range("A5").Select

    'Calcula a média e o desvio padrão
    Range("D1").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[4]C:R[" & (n + 3) & "]C)"
    Range("D2").FormulaR1C1 = "=STDEV(R[3]C:R[" & (n + 2) & "]C)"

    'Calcula a probabilidade de excedência, excedência normal,
    'o absoluto das diferenças e a vazão pela distribuição normal
    For i = 5 To n + 4
        Cells(i, 5).FormulaR1C1 = "=1 - (RC[-4]/" & (n + 1) & ")"
        Cells(i, 6).FormulaR1C1 = "=NORMDIST(RC[-2],R1C4,R2C4,TRUE)"
    
```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Cells(i, 7).FormulaR1C1 = "=ABS(RC[-1]-RC[-2])"
Cells(i, 8).FormulaR1C1 = "=NORMINV(RC[-3],R1C4,R2C4)"
Next i

'Teste de Kolmogorov
Range("I1").FormulaR1C1 = "=MAX(R[4]C[-2]:R[" & (n + 3) & "]C[-2])"
Range("I2").FormulaR1C1 = "=1.14/SQRT(" & n & ")"

'Ajusta o gráfico
ActiveSheet.ChartObjects("Gráfico 2").Activate
With ActiveChart
    .SeriesCollection(1).XValues = "'Ajuste Normal"!R5C4:R" & (n + 4) & "C4"
    .SeriesCollection(1).Values = "'Ajuste Normal"!R5C8:R" & (n + 4) & "C8"
    .Refresh
End With
End Sub

Public Sub LogNormal()
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim valor As Single
    Dim n As Integer 'número de anos da série histórica

    'Descobre o número de dados
    While Cells(n + 5, 2).Value <> ""
        n = n + 1
    Wend

    'Preenche a ordem
    Cells(5, 1).Value = 1
    For i = 6 To n + 4
        Cells(i, 1).FormulaR1C1 = "=R[-1]C+1"
    Next i

    'Copia a série, tira os logaritimos e ordena
    For i = 5 To n + 4
        Cells(i, 4).Value = Cells(i, 3).Value
        Cells(i, 5).FormulaR1C1 = "=LN(RC[-1])"
    Next i

    Range(Cells(5, 4), Cells(n + 4, 4)).Select
    Selection.Sort Key1:=Range("D5"), Order1:=xlDescending, Header:=xlGuess, _
        OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom
    Range("A5").Select

    'Calcula a média e o desvio padrão
    Range("D1").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[4]C:R[" & (n + 3) & "]C)"
    Range("D2").FormulaR1C1 = "=STDEV(R[3]C:R[" & (n + 2) & "]C)"

    'Determina a média e o desvio padrão da lognormal
    Range("E1").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[4]C:R[" & (n + 3) & "]C)"

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Range("E2").FormulaR1C1 = "=STDEV(R[3]C:R[" & (n + 2) & "]C)"

'Calcula a probabilidade de excedência, excedência normal,
'o absoluto das diferenças e as vazões pela distribuição
For i = 5 To n + 4
    Cells(i, 6).FormulaR1C1 = "=1-(RC[-5]/" & (n + 1) & ")"
    Cells(i, 7).FormulaR1C1 = "=NORMDIST(RC[-3],R1C[-3],R2C[-3],TRUE)"
    Cells(i, 8).FormulaR1C1 = "=ABS(RC[-1]-RC[-2])"
    Cells(i, 9).FormulaR1C1 = "=LOGINV(RC[-3],R1C5,R2C5)"
Next i

'Teste de Kolmogorov
Range("J1").FormulaR1C1 = "=MAX(R[4]C[-2]:R[" & (n + 3) & "]C[-2])"
Range("J2").FormulaR1C1 = "=1.14/SQRT(" & n & ")"

'Ajusta o gráfico
ActiveSheet.ChartObjects("Gráfico 2").Activate
With ActiveChart
    .SeriesCollection(1).XValues = "'Ajuste Log-Normal"!R5C4:R" & (n + 4) & "C4"
    .SeriesCollection(1).Values = "'Ajuste Log-Normal"!R5C9:R" & (n + 4) & "C9"
    .Refresh
End With
End Sub

Public Sub GamaII()
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim valor As Single
    Dim n As Integer 'número de anos da série histórica

    'Descobre o número de dados
    While Cells(n + 5, 2).Value <> ""
        n = n + 1
    Wend

    'Preenche a ordem
    Cells(5, 1).Value = 1
    For i = 6 To n + 4
        Cells(i, 1).FormulaR1C1 = "=R[-1]C+1"
    Next i

    'Copia a série, tira os logaritimos e ordena
    For i = 5 To n + 4
        Cells(i, 4).Value = Cells(i, 3).Value
        Cells(i, 5).FormulaR1C1 = "=LN(RC[-1])"
    Next i

    Range(Cells(5, 4), Cells(n + 4, 4)).Select
    Selection.Sort Key1:=Range("D5"), Order1:=xlDescending, Header:=xlGuess, _
        OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Range("A5").Select

'Calcula a média e o desvio padrão
Range("D1").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[4]C:R[" & (n + 3) & "]C)"
Range("D2").FormulaR1C1 = "=STDEV(R[3]C:R[" & (n + 2) & "]C)"

'Determina a média e o desvio padrão da série logarítmica
Range("E1").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[4]C:R[" & (n + 3) & "]C)"
Range("E2").FormulaR1C1 = "=STDEV(R[3]C:R[" & (n + 2) & "]C)"

'Calcula os parâmetros da distribuição Gama
'Para o método da máxima verossimilhança
Range("G1").FormulaR1C1 = "=1/(4*R[2]C)*(1+SQRT(1+4*R[2]C/3))"
Range("G2").FormulaR1C1 = "=R[-1]C[-3]/R[-1]C"
Range("G3").FormulaR1C1 = "=LN(R[-2]C[-3])-R[-2]C[-2]"

'Calcula a probabilidade de excedência, excedência por gama,
' o absoluto das diferenças e as vazões
For i = 5 To n + 4
    Cells(i, 6).FormulaR1C1 = "=1-(RC[-5]/" & (n + 1) & ")"
    Cells(i, 7).FormulaR1C1 = "=GAMMADIST(RC[-3],R1C7,R2C7,TRUE)"
    Cells(i, 8).FormulaR1C1 = "=ABS(RC[-1]-RC[-2])"
    Cells(i, 9).FormulaR1C1 = "=GAMMAINV(RC[-3],R1C7,R2C7)"
Next i

'Teste de Kolmogorov
Range("J1").FormulaR1C1 = "=MAX(R[4]C[-2]:R[" & (n + 3) & "]C[-2])"
Range("J2").FormulaR1C1 = "=1.14/SQRT(" & n & ")"

'Ajusta o gráfico
ActiveSheet.ChartObjects("Gráfico 2").Activate
With ActiveChart
    .SeriesCollection(1).XValues = "'Ajuste Gama"!R5C4:R" & (n + 4) & "C4"
    .SeriesCollection(1).Values = "'Ajuste Gama"!R5C9:R" & (n + 4) & "C9"
    .Refresh
End With
End Sub

Public Sub LimparNormal()
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim valor As Single
    Dim n As Integer 'número de anos da série histórica
    Dim Col As Variant

    Col = Array(1, 4, 5, 6, 7, 8)

    'Descobre o número de dados
    While Cells(n + 5, 1).Value <> ""
        n = n + 1
    Wend

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```
'Apaga os dados
Range("A5:A" & n + 4).Select
Selection.ClearContents
```

```
Range("D5:H" & n + 4).Select
Selection.ClearContents
Range("A5").Select
```

```
'Apaga as fórmulas
Range("D1:D2").Value = ""
Range("I1:I2").Value = ""
```

End Sub

Public Sub LimparLog()

```
Dim i As Integer, j As Integer
Dim valor As Single
Dim n As Integer 'número de anos da série histórica
Dim Col As Variant
```

```
Col = Array(1, 4, 5, 6, 7, 8)
```

```
'Descobre o número de dados
While Cells(n + 5, 1).Value <> ""
    n = n + 1
Wend
```

```
'Apaga os dados
Range("A5:A" & n + 4).Select
Selection.ClearContents
```

```
Range("D5:I" & n + 4).Select
Selection.ClearContents
Range("A5").Select
```

```
'Apaga as fórmulas
Range("D1:D2").Value = ""
Range("E1:E2").Value = ""
Range("J1:J2").Value = ""
```

End Sub

Public Sub LimparGama()

```
Dim i As Integer, j As Integer
Dim valor As Single
Dim n As Integer 'número de anos da série histórica
Dim Col As Variant
```

```
Col = Array(1, 4, 5, 6, 7, 8)
```

```
'Descobre o número de dados
```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

While Cells(n + 5, 1).Value <> ""
    n = n + 1
Wend

'Apaga os dados
Range("A5:A" & n + 4).Select
Selection.ClearContents

Range("D5:I" & n + 4).Select
Selection.ClearContents

'Apaga as fórmulas
Range("D1:E2").Select
Selection.ClearContents

Range("G1:H2").Select
Selection.ClearContents

Range("A5").Select
Range("G3").Value = ""
Range("J1:J2").Value = ""
End Sub

Public Sub Pega_Parametros()
Select Case Range("H7").Value
    Case 1 'Normal
        Range("I4").Value = Worksheets("Ajuste Normal").Range("D1").Value
        Range("I5").Value = Worksheets("Ajuste Normal").Range("D2").Value
    Case 2
        'Log-Normal
        Range("I4").Value = Worksheets("Ajuste Log-Normal").Range("E1").Value
        Range("I5").Value = Worksheets("Ajuste Log-Normal").Range("E2").Value
    Case 3 'Gama
        Range("I4").Value = Worksheets("Ajuste Gama").Range("G1").Value
        Range("I5").Value = Worksheets("Ajuste Gama").Range("G2").Value
    Case 4 'Normal
        Range("I4").Value = Worksheets("Ajuste Normal").Range("D1").Value
        Range("I5").Value = Worksheets("Ajuste Normal").Range("D2").Value
    Case 5
        'Log-Normal
        Range("I4").Value = Worksheets("Ajuste Log-Normal").Range("E1").Value
        Range("I5").Value = Worksheets("Ajuste Log-Normal").Range("E2").Value
    Case 6 'Gama
        Range("I4").Value = Worksheets("Ajuste Gama").Range("G1").Value
        Range("I5").Value = Worksheets("Ajuste Gama").Range("G2").Value
End Select
End Sub

Public Sub Persistencia()
Dim Anual() As Single 'Vazão média anual

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Dim i As Integer
Dim nl As Integer 'Número de linhas
Dim na As Integer 'número de anos
Dim ns As Integer 'número de ocorrência de anos secos
Dim nu As Integer 'número de ocorrência de anos úmidos
Dim nss As Integer 'número de ocorrência de dois anos secos em seqüência
Dim nuu As Integer 'número de ocorrência de dois anos úmidos em seqüência
Dim Media As Single 'média das vazões médias anuais

nl = 2
While Worksheets("Série Histórica").Cells(nl, 2).Value <> ""
    na = na + 1
    ReDim Preserve Anual(1 To na)
    For i = 2 To 13
        Anual(na) = Anual(na) + Worksheets("Série Histórica").Cells(nl, i).Value
    Next i
    Anual(na) = Anual(na) / 12
    nl = nl + 1
    Media = Media + Anual(na)
Wend
Media = Media / na

For i = 1 To na - 1
    If Anual(i) < Media Then 'anos seco
        ns = ns + 1
        If Anual(i + 1) < Media Then 'dois anos secos em seqüência
            nss = nss + 1
        End If
    ElseIf Anual(i) > Media Then 'anos úmido
        nu = nu + 1
        If Anual(i + 1) > Media Then 'dois anos úmidos em seqüência
            nuu = nuu + 1
        End If
    End If
Next i

Range("B6").Value = nss / ns
Range("B7").Value = nuu / nu
Range("C8").Value = Media

End Sub

Public Sub Gera_Anual()
    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, k1 As Integer
    Dim nInt As Integer 'número de classes de fragmentos

    Dim ns As Integer 'número de séries
    Dim na As Integer 'número de anos por série

    Dim PUu As Single 'persistência do período úmido
    Dim PSs As Single 'persistência do período seco

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Dim Media As Single 'média da série histórica

Dim EstadoAnt As String 'Estado anterior "S" -> seco; "U" -> úmido

Dim ProbEst As Single 'Probabilidade para manutenção do estado
Dim ProbAno As Single 'Probabilidade para geração do total anual

Dim valor As Single 'precipitação anual gerada

Dim Frag() As Single 'Os fragmentos
Dim Total() As Single 'Total anual (vazão média anual x 12)

Dim Mensal() As Single 'Vetor com as vazões mensais para cada nao da série

Dim Vmax As Long, Vmin As Long, Vini As Long 'Vol. máximo, mínimo e inicial

Dim nCav As Integer 'numero de dados cota x área x volume
Dim CAV() As Long 'cota(1) x area(2) x volume(3)

Dim Evap(1 To 12) As Single 'evaporação

'Para cálculo da Persistência
Dim nas() As Integer 'número de anos secos por série
Dim nau() As Integer 'número de anos úmidos por série
Dim nss As Integer 'número de anos secos em seq.
Dim nuu As Integer 'número de anos úmidos em seq.
Dim Prbss() As Single 'Probabilidade de persistência de um ano seco
Dim Prbuu() As Single 'Probabilidade de persistência de um ano úmido

On Error GoTo erro

'Diretorio do arquivo xls
Diretorio = Application.ThisWorkbook.Path

'Cria arquivos auxiliares para executar o modsim
Call Cria_Arquivos

'Pega dados
PSs = Range("b6").Value
PUu = Range("b7").Value
Media = Range("C8").Value

ns = Range("C2").Value
na = Range("C3").Value

'Redimensiona a matriz de vazões mensais e de presistência
ReDim Mensal(1 To na, 1 To 12)
ReDim nas(1 To ns), nau(1 To ns), Prbss(1 To ns), Prbuu(1 To ns)

'Pega os volumes máximo, mínimo e inicial

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Vmax = Range("C11").Value
Vmin = Range("C12").Value
Vini = Range("C13").Value

'Pega cota x área x volume
While Range("E" & (13 + nCav)).Value <> ""
    ReDim Preserve CAV(1 To 3, 1 To nCav + 1)
    CAV(1, nCav + 1) = Range("E" & (13 + nCav)).Value
    CAV(2, nCav + 1) = Range("F" & (13 + nCav)).Value
    CAV(3, nCav + 1) = Range("G" & (13 + nCav)).Value
    nCav = nCav + 1
Wend

'Limpa planilhas
Worksheets("Fornecida").Cells.ClearContents
Worksheets("Garantia").Cells.ClearContents
Worksheets("Anual").Cells.ClearContents
Range("C19:C24").ClearContents

'Pega os fragmentos
nInt = 0
While Worksheets("Fragmentos").Range("A" & nInt + 1).Value <> ""
    nInt = nInt + 1
    ReDim Preserve Frag(1 To 12, 1 To nInt), Total(1 To nInt)
    Total(nInt) = Worksheets("Fragmentos").Cells(nInt + 1, 1).Value
    For i = 1 To 12
        Frag(i, nInt) = Worksheets("Fragmentos").Cells(nInt + 1, i + 1).Value
    Next i
Wend

If ns = 0 Then
    MsgBox "Não existem fragmentos. Preencha a planilha correspondente antes de
continuar. Este procedimento será encerrado!"
    Exit Sub
End If

'Pega a evaporação
For i = 1 To 12
    Evap(i) = Range("J" & (12 + i)).Value / 1000
Next i

'Cabeçalho da planilha de vazões anuais

Range("K6").Value = Time 'Tempo de início da simulação
Worksheets("Anual").Cells(1, 1).Value = "Nº secos"
Worksheets("Anual").Cells(2, 1).Value = "Nº úmidos"
Worksheets("Anual").Cells(3, 1).Value = "Pss"
Worksheets("Anual").Cells(4, 1).Value = "Puu"
Worksheets("Anual").Cells(5, 1).Value = "Média"
Worksheets("Anual").Cells(6, 1).Value = "D.P."

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

'Geração e Simulação
For i = 1 To ns
    Worksheets("Anual").Cells(7, i + 1).Value = "Sér. " & i
    Worksheets("Fornecida").Cells(1, i + 2).Value = "Sér. " & i
    Worksheets("Garantia").Cells(1, i + 2).Value = "Sér. " & i

    nss = 0: nuu = 0

    'Determina se o primeiro ano gerado é precedido por ano seco ou úmido
    If Rnd > 0.5 Then
        EstadoAnt = "S"
        'nas(i) = nas(i) + 1
    Else
        EstadoAnt = "U"
        'nau(i) = nau(i) + 1
    End If

    Randomize
    For j = 1 To na
        Range("E9").Value = "Gerando série " & i & ", ano " & j
        If EstadoAnt = "S" Then 'Ano anterior seco
            ProbEst = Rnd
            If ProbEst < PSs Then 'gera ano seco
                nas(i) = nas(i) + 1: nss = nss + 1
                Do
                    ProbAno = Rnd
                    Select Case Range("H7").Value
                        Case 1 'Normal
                            Range("I6").FormulaR1C1 = "=NORMINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

                        Case 2 'LogNormal
                            Range("I6").FormulaR1C1 = "=LOGINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

                        Case 3 'Gama II
                            Range("I6").FormulaR1C1 = "=GAMMAINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

                    End Select
                    valor = Range("I6").Value
                    If EstadoAnt = "S" Then
                        If valor < Media Then
                            nas(i) = nas(i) + 1
                            nss = nss + 1
                        Else
                            nau(i) = nau(i) + 1
                            EstadoAnt = "U"
                        End If
                    Else
                        If valor < Media Then
                            nas(i) = nas(i) + 1
                            EstadoAnt = "S"

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Else
    nau(i) = nau(i) + 1
    nuu = nuu + 1
End If
End If
Loop While valor > Media Or valor < 0
EstadoAnt = "S"
Else 'gera ano úmido
nau(i) = nau(i) + 1
Do
    ProbAno = Rnd
    Select Case Range("H7").Value
        Case 1 'Normal
            Range("I6").FormulaR1C1 = "=NORMINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

        Case 2 'LogNormal
            Range("I6").FormulaR1C1 = "=LOGINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

        Case 3 'Gama II
            Range("I6").FormulaR1C1 = "=GAMMAINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

    End Select
    valor = Range("I6").Value
    Loop While valor < Media Or valor < 0
    EstadoAnt = "U"
End If
Else '
    ProbEst = Rnd
    If ProbEst < PUu Then 'gera ano úmido
        nau(i) = nau(i) + 1: nuu = nuu + 1
        Do
            ProbAno = Rnd
            Select Case Range("H7").Value
                Case 1 'Normal
                    Range("I6").FormulaR1C1 = "=NORMINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

                Case 2 'LogNormal
                    Range("I6").FormulaR1C1 = "=LOGINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

                Case 3 'Gama II
                    Range("I6").FormulaR1C1 = "=GAMMAINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

            End Select
            valor = Range("I6").Value
            Loop While valor < Media Or valor < 0
            EstadoAnt = "U"
        Else 'gera ano seco
            nas(i) = nas(i) + 1
            Do
                ProbAno = Rnd

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

        Select Case Range("H7").Value
            Case 1 'Normal
                Range("I6").FormulaR1C1 = "=NORMINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

            Case 2 'LogNormal
                Range("I6").FormulaR1C1 = "=LOGINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

            Case 3 'Gama II
                Range("I6").FormulaR1C1 = "=GAMMAINV(" & ProbAno & ",R[-
2]C,R[-1]C)"

        End Select
        valor = Range("I6").Value
        Loop While valor > Media Or valor < 0
        EstadoAnt = "S"
    End If
End If
'Preenche planilha com valores anuais
If i = 1 Then
    Worksheets("Anual").Cells(j + 7, 1) = "Ano " & j
End If
Worksheets("Anual").Cells(j + 7, i + 1) = valor

'Fragmenta
For k = 1 To nInt
    If 12 * valor > Total(k) Then
        Exit For
    End If
Next k
If k < (nInt + 1) Then
    For k1 = 1 To 12
        Mensal(j, k1) = valor * 12 * Frag(k1, k)
    Next k1
Else
    For k1 = 1 To 12
        Mensal(j, k1) = valor * 12 * Frag(k1, nInt)
    Next k1
End If
Next j

Dim NF As Integer 'número de falhas a cada ano
Dim NFt As Integer 'número de falhas total para toda a série
Dim Garantia As Single 'garantia da oferta da demanda para a série

Dim QMedia As Long 'media da vazões fornecidas por ano
Dim SomaMedia As Single 'soma das médias anuais
Dim Dem As Single 'demanda inicial
Dim Incre As Single 'incremento da vazão
Dim Mensal2(1 To 12) As Single 'vazões do ano simulado
Dim QForn As Single 'Vazão média fornecida para a série
Dim n1 As Integer 'número de vazões simuladas

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Dim Demmax As Single 'Demanda máxima

Dem = Range("C15").Value
Demmax = Range("C17").Value
Incre = Range("C16").Value

nl = 0
Do
    SomaMedia = 0: NFt = 0
    For j = 1 To na
        NF = 0
        For k = 1 To 12
            Mensal2(k) = Mensal(j, k)
        Next k
Repete:
        Call Org(Vmax, Vmin, Vini, nCav, CAV())
        Call Ada(Mensal2(), Dem, Evap())

        If Dir(Diretorio & "\out.out") <> "" Then Kill (Diretorio & "\out.out")

        Call ExecCmd("command.com /c " & Chr(34) & (Diretorio & "\Modexec.bat")
& Chr(34))

        Call Le_Out(QMedia, Vini, NF)

        Range("E9").Value = "Simulando ano " & j & " para vazão " & Dem & "
m³/s, série " & i

        NFt = NFt + NF
        SomaMedia = SomaMedia + QMedia
    Next j
    Garantia = 1 - NFt / (12 * na)
    QForn = SomaMedia / na / 2628
    nl = nl + 1
    Worksheets("Fornecida").Cells(nl + 1, 1).Value = Dem
    Worksheets("Garantia").Cells(nl + 1, 1).Value = Dem

    Worksheets("Fornecida").Cells(nl + 1, i + 2).Value = QForn
    Worksheets("Garantia").Cells(nl + 1, i + 2).Value = Garantia

    Dem = Dem + Incre
Loop While Dem <= Demmax

'Calcula a persistência
Prbss(i) = nss / nas(i)
Prbuu(i) = nuu / nau(i)

'Estatísticas da série gerada
Worksheets("Anual").Cells(5, i + 1).FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[3]C:R[" & (j + 1)
& " ]C)"

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Worksheets("Anual").Cells(6, i + 1).FormulaR1C1 = "=STDEV(R[2]C:R[" & (j) &
"]C)"
Worksheets("Anual").Cells(1, i + 1).Value = nas(i)
Worksheets("Anual").Cells(2, i + 1).Value = nau(i)
Worksheets("Anual").Cells(3, i + 1).Value = Prbss(i)
Worksheets("Anual").Cells(4, i + 1).Value = Prbuu(i)

'Salva
ActiveWorkbook.Save

Range("K7").Value = Time
Next i

Worksheets("Fornecida").Cells(1, 1).Value = "Demanda"
Worksheets("Garantia").Cells(1, 1).Value = "Demanda"

'Preenche médias das séries
Dim Soma(1 To 4) As Single

For i = 1 To ns
    Soma(1) = Soma(1) + nas(i)
    Soma(2) = Soma(2) + nau(i)
    Soma(3) = Soma(3) + Prbss(i)
    Soma(4) = Soma(4) + Prbuu(i)
Next i

Range("C19").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(Anual!R5C2:R5C" & (ns + 1) & ")"
Range("C20").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(Anual!R6C2:R6C" & (ns + 1) & ")"
Range("C21").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(Anual!R1C2:R1C" & (ns + 1) & ")"
Range("C22").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(Anual!R2C2:R2C" & (ns + 1) & ")"
Range("C23").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(Anual!R3C2:R3C" & (ns + 1) & ")"
Range("C24").FormulaR1C1 = "=AVERAGE(Anual!R4C2:R4C" & (ns + 1) & ")"

'Simula para a série histórica
Call Reg_Historica

Range("E9").ClearContents
Range("K6").ClearContents
Range("K7").ClearContents

'Preenche o gráfico
Sheets("Curvas").Activate
With ActiveChart
    .SetSourceData
Source:=Worksheets("Fornecida").Range(Worksheets("Fornecida").Cells(1, 2),
Worksheets("Fornecida").Cells(nl + 1, ns + 2)), PlotBy:=xlColumns
    .SeriesCollection(1).XValues = "=Fornecida!R2C1:R" & (nl + 1) & "C1"
End With
Exit Sub

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

erro:
MsgBox Err.Description
If Err = 53 Then GoTo Repete
End Sub

Public Sub Cria_Arquivos()
  'Arquivo Bat
  Open Diretorio & "\modexec.bat" For Output As #1
  Print #1, Left$(Diretorio, 2)
  Print #1, "cd\" + Chr(34) + Mid$(Diretorio, 4) + Chr(34)
  Print #1, "Modsim" + " < " + "Modsim.asc"
  Close #1
  'Arquivo Asc
  Open Diretorio & "\Modsim.asc" For Output As #1
  Print #1, "y"
  Print #1, "org.org"
  Print #1, "ada.ada"
  Print #1, "out.out"
  Close #1
End Sub

Public Sub Org(Vmax As Long, Vmin As Long, Vini As Long, nCav As Integer, CAV() As Long)
  Dim i As Integer, j As Integer

  Dim nl As Boolean 'se é uma nova linha de cota x área x volume

  Open Diretorio & "\Org.org" For Output As #1
  Print #1, "
  1 0 1
0 0"
  Print #1, "Regularização"
  Print #1, "
  3 1 1
2 0"
  Print #1, "
  2 2"
  Print #1, "
  1 2001"
  Print #1, "
  1 1"
  Print #1, "
  0
0.0000"
  Print #1, " Reseva 1" & Space(10 - Len(Str(Vmax))) & Vmax & Space(10 -
Len(Str(Vmin))) & Vmin & Space(10 - Len(Str(Vini))) & Vini
  Print #1, " Regular 2"
  Print #1, " Dreno 3"
  Print #1, " 1"

  nl = True
  If nCav <> 0 Then
    Print #1, "
  1" & Space(5 - Len(Str(nCav))) & nCav
    For i = 1 To nCav
      If nl = True Then
        Print #1, " ";
        nl = False

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

End If
If i Mod 3 = 0 Then
    Print #1, Space(9 - Len(Str(CAV(1, i)))) & CAV(1, i) & Space(9 -
Len(Str(CAV(2, i)))) & CAV(2, i) & Space(9 - Len(Str(CAV(3, i)))) & CAV(3, i)
Else
    Print #1, Space(9 - Len(Str(CAV(1, i)))) & CAV(1, i) & Space(9 -
Len(Str(CAV(2, i)))) & CAV(2, i) & Space(9 - Len(Str(CAV(3, i)))) & CAV(3, i);
End If
Next i
If nCav Mod 3 <> 0 Then Print #1, ""
Else
    Print #1, "                1  1"
    Print #1, "                0  0  0"
End If

Print #1, "                0  0.0000"
Print #1, "            0.000  0  99  0.00000  0.00000  0.0"
0"
Print #1, "            2  0 00.000  0  0  99  0.00000  0.00000
0.0 0"
Print #1, "                1"
Print #1, "            315768000 00.000  0  0  99  0.00000  0.00000
0.0 0"
Print #1, "
0.0830.0830.0830.0830.0830.0830.0830.0830.0830.0830.083"
Print #1, "            101"
Print #1, "                1.0000000  1.0000000
1.0000000"
Print #1, "            1  99  100000.0 100000.0 100000.0 100000.0 100000.0
100000.0"
Print #1, "                100000.0 100000.0 100000.0 100000.0 100000.0
100000.0"
Print #1, "                0"
Print #1, "            1  1  2 262800000  0  0 0.00000  0.00000  0.00000
0.0 0"
Print #1, "            2  2  3 262800000  0  100 0.00000  0.00000  0.00000
0.0 0"
Close
End Sub

Public Sub Ada(vaz() As Single, Dem As Single, Evap() As Single)
    Dim i As Integer, j As Integer

    Dim VAflu(1 To 12) As Long 'vazões afluentes
    Dim Demanda As Long 'demanda
    Dim Mes As Integer 'mês
    Dim Mesini As Integer 'mês de início da simulação

    'Pega o mês inicia
    Mesini = Range("C14").Value

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

'Pega a evaporação
For i = 1 To 12
    Evap(i) = Range("J" & (12 + i)).Value / 1000
Next i

'Calcula as vazões em 1000m³
For i = 1 To 12
    VAflu(i) = vaz(i) * 2628
Next i
Demanda = Dem * 2628

'Preenche o arquivo
Open Diretorio & "\ada.ada" For Output As #1
    Mes = Mesini - 1
    For i = 1 To 5
        Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
        Print #1, Space(12 - Len(Str(VAflu(Mes)))) & VAflu(Mes) & ".";
    Next i
    Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
    Print #1, Space(12 - Len(Str(VAflu(Mes)))) & VAflu(Mes) & "."

    For i = 1 To 5
        Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
        Print #1, Space(12 - Len(Str(VAflu(Mes)))) & VAflu(Mes) & ".";
    Next i
    Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
    Print #1, Space(12 - Len(Str(VAflu(Mes)))) & VAflu(Mes) & "."

    For i = 1 To 6
        Print #1, "          0.0          0.0          0.0          0.0          0.0"
0.0"
    Next i

'Demanda
For j = 1 To 2
    For i = 1 To 5
        Print #1, Space(12 - Len(Str(Demanda))) & Demanda & ".";
    Next i
    Print #1, Space(12 - Len(Str(Demanda))) & Demanda & "."
Next j

For i = 1 To 2
    Print #1, "          0.0          0.0          0.0          0.0          0.0"
0.0"
Next i

'Evaporação
Mes = Mesini - 1
For i = 1 To 5

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

        Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
        Print #1, Space(6) & Format(Evap(Mes), "0.0000");
    Next i
    Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
    Print #1, Space(6) & Format(Evap(Mes), "0.0000")

    For i = 10 To 14
        Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
        Print #1, Space(6) & Format(Evap(Mes), "0.0000");
    Next i
    Mes = Mes + 1: If Mes > 12 Then Mes = 1
    Print #1, Space(6) & Format(Evap(Mes), "0.0000")

    For i = 1 To 2
        Print #1, "          0.000          0.000          0.000          0.000          0.000
0.000"
    Next i
    Close
End Sub

Public Sub Le_Out(QMedia As Long, Vini As Long, NF As Integer)
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim Linha As String
    Dim valor As Single
    Dim Soma As Long

    NF = 0

    Open Directorio & "\out.out" For Input As #1
    While Not EOF(1)
        Line Input #1, Linha
        Select Case Linha
            Case " Reservoir No. 1      Reseva      Simulation      Year 1      Calendar
Year 2001"
                For i = 1 To 19
                    Line Input #1, Linha
                Next i
                For i = 1 To 8
                    Input #1, valor
                    If i = 3 Then Vini = valor
                Next i
            Case " Demand Node No. 2      Regular      Simulation      Year 1      Calendar
Year 2001"
                For i = 1 To 5
                    Line Input #1, Linha
                Next i
                For i = 1 To 12
                    For j = 1 To 5
                        Input #1, valor
                        If j = 3 Then

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

        Soma = Soma + valor
    End If
    If j = 5 Then
        If valor <> 0 Then NF = NF + 1
    End If
    Next j
Next i
    QMedia = Soma / 12
End Select
Wend
Close
End Sub

Public Sub Reg_Historica()
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim na As Integer 'número de anos da série histórica
    Dim Mensal() As Single 'vazões mensais

    Dim NF As Integer 'número de falhas a cada ano
    Dim NFt As Integer 'número de falhas total para toda a série
    Dim Garantia As Single 'garantia da oferta da demanda para a série

    Dim QMedia As Long 'media da vazões fornecidas por ano
    Dim SomaMedia As Single 'soma das médias anuais
    Dim Dem As Single 'demanda inicial
    Dim Incre As Single 'incremento da vazão
    Dim Mensal2(1 To 12) As Single 'vazões do ano simulado
    Dim QForn As Single 'Vazão média fornecida para a série
    Dim nl As Integer 'número de vazões simuladas

    Dim Demmax As Single 'demanda máxima

    Dim Vmax As Long, Vmin As Long, Vini As Long 'Vol. máximo, mínimo e inicial

    Dim nCav As Integer 'numero de dados cota x área x volume
    Dim CAV() As Long 'cota(1) x area(2) x volume(3)

    Dim Evap(1 To 12) As Single 'evaporação

    'Diretorio do arquivo xls
    Diretorio = Application.ThisWorkbook.Path

    'Cria arquivos auxiliares para executar o modsim
    Call Cria_Arquivos

    'Pega os volumes máximo, mínimo e inicial
    Vmax = Range("C11").Value
    Vmin = Range("C12").Value
    Vini = Range("C13").Value

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

'Pega cota x área x volume
While Range("E" & (13 + nCav)).Value <> ""
    ReDim Preserve CAV(1 To 3, 1 To nCav + 1)
    CAV(1, nCav + 1) = Range("E" & (13 + nCav)).Value
    CAV(2, nCav + 1) = Range("F" & (13 + nCav)).Value
    CAV(3, nCav + 1) = Range("G" & (13 + nCav)).Value
    nCav = nCav + 1
Wend

'Pega a evaporação
For i = 1 To 12
    Evap(i) = Range("J" & (12 + i)).Value / 1000
Next i

Range("K6").Value = Time

'Pega vazões
While Worksheets("Série Histórica").Range("A" & (na + 2)).Value <> ""
    na = na + 1
    ReDim Preserve Mensal(1 To 12, 1 To na)
    For i = 1 To 12
        Mensal(i, na) = Worksheets("Série Histórica").Cells(na + 1, i + 1).Value
    Next i
Wend

'Pega dados
Dem = Range("C15").Value
Demmax = Range("C17").Value
Incre = Range("C16").Value

Worksheets("Fornecida").Cells(1, 2).Value = "Sér. Hist."
Worksheets("Garantia").Cells(1, 2).Value = "Sér. Hist."

Do
    SomaMedia = 0: Nft = 0
    For j = 1 To na
        NF = 0
        For i = 1 To 12
            Mensal2(i) = Mensal(i, j)
        Next i
        Call Org(Vmax, Vmin, Vini, nCav, CAV())
        Call Ada(Mensal2(), Dem, Evap())

        If Dir(Diretorio & "\out.out") <> "" Then Kill (Diretorio & "\out.out")

        Call ExecCmd("command.com /c " & Chr(34) & (Diretorio & "\Modexec.bat") &
Chr(34))

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Call Le_Out(QMedia, Vini, NF)

Range("E9").Value = "Simulando ano " & j & " para vazão " & Dem & " m³/s,
série histórica."

NFT = NFT + NF
SomaMedia = SomaMedia + QMedia
Next j
Garantia = 1 - NFT / (12 * na)
QForn = SomaMedia / na / 2628
nl = nl + 1

Worksheets("Fornecida").Cells(nl + 1, 1).Value = Dem
Worksheets("Garantia").Cells(nl + 1, 1).Value = Dem

Worksheets("Fornecida").Cells(nl + 1, 2).Value = QForn
Worksheets("Garantia").Cells(nl + 1, 2).Value = Garantia

Dem = Dem + Incre
Loop While Dem <= Demmax

Worksheets("Fornecida").Cells(1, 1).Value = "Demanda"
Worksheets("Garantia").Cells(1, 1).Value = "Demanda"

Range("K7").Value = Time
End Sub

'Funções API

Public Sub ExecCmd(ByVal sCmdLine As String)
Dim Proc As PROCESS_INFORMATION
Dim Start As STARTUPINFO
Dim lRet As Long

'Initialize the STARTUPINFO structure
Start.dwFlags = &H1
Start.wShowWindow = 2&
Start.cb = Len(Start)

'Start the shelled application
lRet = CreateProcessA(0&, sCmdLine, 0&, 0&, 0&, NORMAL_PRIORITY_CLASS, 0&, 0&,
Start, Proc)

'Wait for the shelled application to finish
lRet = WaitForSingleObject(Proc.hProcess, INFINITE)
lRet = CloseHandle(Proc.hProcess)
End Sub

'Exemplo de uso: ExecCmd ("command.com /c dir /")

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

b) Pasta “PrecDiaria.xls”

Esta pasta é responsável pela obtenção, a partir de uma série histórica de observações de precipitações diárias, dos parâmetros necessários para a geração da chuva diária pelo modelo “Mero Modificado”.

Public Sub Dados()

```

Dim i As Integer
Dim NDC(1 To 12) As Long 'número de dias chuvosos por mês
                        'para meses com menos de 10 dias chuvosos
Dim NDS(1 To 12) As Long 'número de dias secos por mês
                        'para meses com menos de 10 dias chuvosos
Dim NDCC(1 To 12) As Long 'número de dias chuvosos seguidos por outro dia chuvoso
                        'quando forem menos de 10 dia chuvosos no mês considerado
Dim NDSS(1 To 12) As Long 'número de dias não chuvosos seguidos por outro dia seco
                        'quando forem menos de 10 dia chuvosos no mês considerado
Dim NDC10(1 To 12) As Long 'número de dias chuvosos por mês
                        'para meses com mais de 10 dias chuvosos
Dim NDS10(1 To 12) As Long 'número de dias secos por mês
                        'para meses com mais de 10 dias chuvosos
Dim NDCC10(1 To 12) As Long 'número de dias chuvosos seguidos por outro dia chuvoso
                        'quando forem mais de 10 dia chuvosos no mês considerado
Dim NDSS10(1 To 12) As Long 'número de dias não chuvosos seguidos por outro dia seco
                        'quando forem mais de 10 dia chuvosos no mês considerado

Dim NDCg(1 To 12) As Long 'número de dias chuvosos por mês
Dim NDSg(1 To 12) As Long 'número de dias secos por mês
Dim NDCCg(1 To 12) As Long 'número de dias chuvosos seguidos por outro dia chuvoso
                        'para qualquer número de dias chuvosos
Dim NDSSg(1 To 12) As Long 'número de dias não chuvosos seguidos por outro dia seco
                        'para qualquer número de dias chuvosos

Dim nd(1 To 12) As Long 'número de dias chuvosos por mês

Dim n As Integer 'linha lida na planilha com a série
Dim Ano As Integer 'ano
Dim Mes As Integer 'mes

Dim nc As Integer 'número de dias chuvosos
Dim ncc As Integer 'número de dias chuvosos seguidos por outro chuvoso
Dim nss As Integer 'número de dias sem chuva seguidos por outro seco
Dim soma As Integer 'soma do total precipitado
Dim valor As Single 'total precipitado no dia

Dim EstAnt As String '"C" para chuvoso, "S" para seco

Dim Anol As Integer 'primeiro ano da série

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

'Limpa as planilhas e preenche o cabeçalho
Dim Meses As Variant
Dim Texto As Variant

Meses = Array("Jan", "Fev", "Mar", "Abr", "Mai", "Jun", "Jul", "Ago", "Set", "Out",
"Nov", "Dez")
Texto = Array("Pcc", "Pss", "Pcc10", "Pss10", "Pccg", "Pssg", "Média", "D.P.",
"Ano")

Worksheets("Num_Dias").Cells.ClearContents
Worksheets("Chuva").Cells.ClearContents

For i = 1 To 9
    Worksheets("Num_Dias").Cells(i, 1).Value = Texto(i - 1)
    If i > 4 Then
        Worksheets("Chuva").Cells(i - 4, 1).Value = Texto(i - 1)
    End If
Next i

For i = 1 To 12
    Worksheets("Num_Dias").Cells(9, i + 1).Value = Meses(i - 1)
    Worksheets("Chuva").Cells(3, i + 1).Value = Meses(i - 1)
Next i

n = 1
While Worksheets("Série").Range("A" & n + 1).Value <> ""
    soma = 0: nc = 0: ncc = 0: ns = 0: nss = 0
    EstAnt = ""

    n = n + 1
    Ano = Worksheets("Série").Range("A" & n).Value
    If n = 2 Then Ano1 = Ano
    Mes = Worksheets("Série").Range("B" & n).Value
    For i = 3 To 33
        valor = Worksheets("Série").Cells(n, i).Value
        If valor <> -1 Then
            If valor <> 0 Then
                nd(Mes) = nd(Mes) + 1
                Worksheets("Chuva").Cells(nd(Mes) + 3, Mes + 1).Value = valor
                If EstAnt = "C" Then ncc = ncc + 1
                nc = nc + 1
                EstAnt = "C"
            Else
                If EstAnt = "S" Then nss = nss + 1
                ns = ns + 1
                EstAnt = "S"
            End If
            soma = soma + valor
        End If
    Next i
End While

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

If nc > 10 Then
    NDC10(Mes) = NDC10(Mes) + nc
    NDCC10(Mes) = NDCC10(Mes) + ncc
    NDS10(Mes) = NDS10(Mes) + ns
    NDSS10(Mes) = NDSS10(Mes) + nss
Else
    NDC(Mes) = NDC(Mes) + nc
    NDCC(Mes) = NDCC(Mes) + ncc
    NDS(Mes) = NDS(Mes) + ns
    NDSS(Mes) = NDSS(Mes) + nss
End If
NDCg(Mes) = NDCg(Mes) + nc
NDCCg(Mes) = NDCCg(Mes) + ncc
NDSg(Mes) = NDSg(Mes) + ns
NDSSg(Mes) = NDSSg(Mes) + nss

Worksheets("Num_Dias").Cells(Ano - Ano1 + 10, 1).Value = Ano
Worksheets("Num_Dias").Cells(Ano - Ano1 + 10, Mes + 1).Value = nc

Range("B18").Value = "Processando ano: " & Ano
Wend

For i = 1 To 12
    If NDC(i) <> 0 Then
        Worksheets("Num_Dias").Cells(1, i + 1).Value = NDCC(i) / NDC(i)
    Else
        Worksheets("Num_Dias").Cells(1, i + 1).Value = 0
    End If
    If NDS(i) <> 0 Then
        Worksheets("Num_Dias").Cells(2, i + 1).Value = NDSS(i) / NDS(i)
    Else
        Worksheets("Num_Dias").Cells(2, i + 1).Value = 0
    End If
    If NDC10(i) <> 0 Then
        Worksheets("Num_Dias").Cells(3, i + 1).Value = NDCC10(i) / NDC10(i)
    Else
        Worksheets("Num_Dias").Cells(3, i + 1).Value = 0
    End If
    If NDS10(i) <> 0 Then
        Worksheets("Num_Dias").Cells(4, i + 1).Value = NDSS10(i) / NDS10(i)
    Else
        Worksheets("Num_Dias").Cells(4, i + 1).Value = NDSS(i) / NDS(i)
    End If

    If NDCg(i) <> 0 Then
        Worksheets("Num_Dias").Cells(5, i + 1).Value = NDCCg(i) / NDCg(i)
    Else
        Worksheets("Num_Dias").Cells(5, i + 1).Value = 0
    End If

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```
If NDSg(i) <> 0 Then
    Worksheets("Num_Dias").Cells(6, i + 1).Value = NDSSg(i) / NDSg(i)
Else
    Worksheets("Num_Dias").Cells(6, i + 1).Value = 0
End If

Worksheets("Num_Dias").Cells(7, i + 1).FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R10C:R" & (Ano -
Ano1 + 10) & "C)"
Worksheets("Num_Dias").Cells(8, i + 1).FormulaR1C1 = "=STDEV(R10C:R" & (Ano -
Ano1 + 10) & "C)"

Worksheets("Chuva").Cells(1, i + 1).FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R4C:R" & (nd(i) + 3)
& "C)"
Worksheets("Chuva").Cells(2, i + 1).FormulaR1C1 = "=STDEV(R4C:R" & (nd(i) + 3) &
"C)"
Next i
Range("B18").Value = ""
End Sub
```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

c) Pasta “Recarga.xls”

Esta pasta calcula a recarga potencial através da simulação diária do ciclo hidrológico pelo modelo “SMAP Modificado”, gerando as precipitações diárias pelo modelo “Mero Modificado”.

```
Option Explicit
Option Base 1

Dim Dados(1 To 9, 1 To 12) As Single
'Dados:
'1 - Média dos dias de chuva no mês
'2 - Desvio Padrão dos dias de chuva no mês
'3 - Média da Precipitação dos dias de chuva no mês
'4 - Desvio Padrão da Precipitação dos dias de chuva no mês
'5 - Probabilidade de um dia seco ser seguido por outro para até 10 dias
'6 - Probabilidade de um dia seco ser seguido por outro para mais de 10 dias
'7 - Probabilidade de um dia chuvoso ser seguido por outro para até 10 dias
'8 - Probabilidade de um dia chuvoso ser seguido por outro para mais de 10 dias
'9 - Evaporação média diária (mm)

Dim Modelo(1 To 12) As String 'Modelo que será usado: "M" - Mero, "P" - persistência
'O programa admite que usará persistência quando o produto do número médio de dias
'de chuva e a chuva média diária for superior a 20 mm

Dim Dias_Mes As Variant 'número de dias por mês
Public EVTo(1 To 365) As Single

Public Sub PegaDados()
    Dim i As Integer

    'Pega dados da chuva diária
    For i = 1 To 12
        Dados(1, i) = Worksheets("Chuva").Range("C" & (i + 3)).Value
        Dados(2, i) = Worksheets("Chuva").Range("D" & (i + 3)).Value
        Dados(3, i) = Worksheets("Chuva").Range("G" & (i + 3)).Value
        Dados(4, i) = Worksheets("Chuva").Range("H" & (i + 3)).Value
        Dados(5, i) = Worksheets("Chuva").Range("K" & (i + 3)).Value
        Dados(6, i) = Worksheets("Chuva").Range("L" & (i + 3)).Value
        Dados(7, i) = Worksheets("Chuva").Range("M" & (i + 3)).Value
        Dados(8, i) = Worksheets("Chuva").Range("N" & (i + 3)).Value
        If Dados(1, i) * Dados(3, i) > 30 Then
            Modelo(i) = "P"
        Else
            Modelo(i) = "M"
        End If
        Dados(9, i) = Worksheets("Recarga").Range("C" & (i + 3)).Value
    Next i
End Sub
```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

End Sub

Public Sub Gera_Chuva(Chuva() As Single)

Dim i As Integer, j As Integer

Dim d1 As Integer, d2 As Integer 'contadores auxiliares

Dim ano As Integer 'contador do ano

Dim nd As Integer 'conta o número de dias

Dim NdC As Integer 'número de dias com chuva gerado pelo modelo

Dim Dia As Integer 'dia considerado

Dim Matual As Integer 'mês atual

Dim nc As Integer 'número de dias chuvosos gerados por Markov

Dim n As Integer 'número de dias transcorridos na geração por Markov

Dim P As Single 'probabilidade

Dim Y As Single 'variável reduzida

Dim x As Single 'variável dependente

Dim PbSC As Single 'prob. dia chuvoso seguir um ã chuvoso

Dim PbCC As Single 'prob. persistência dia chuvoso

Dim Erro As Boolean, OK As Boolean

Dim Estado As String "C" - chuvoso; "S" - seco

Dim Chove(1 To 31) As Integer '0-> não chove no dia

'1-> chove no dia

'Ex.: Chove(21)=1->chove no dia 21

Dim NChove(1 To 31) As Integer '0-> chove no dia. '1-> não chove

'1-> chove no dia

Randomize

Matual = Range("k4").Value - 1

For j = 1 To 12

Erse Chove, NChove 'Apaga os valores de quais dias chove ou não

Matual = Matual + 1: If Matual > 12 Then Matual = 1

'Gera o número de dias de chuva no mês

Do

P = Rnd

Y = -Log(-Log(1 - P))

x = 0.7797 * Dados(2, Matual) * Y + (Dados(1, Matual) - 0.45 * Dados(2,

Matual))

NdC = Int(x + 0.5)

Loop While NdC < 0 Or NdC > Dias_Mes(Matual)

If NdC > 0 Then

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

If NdC < 10 Or (NdC <= 20 And Modelo(Matual) = "P") Then 'Gera os dias
chuvosos por Markov
  Erro = True
  While Erro = True
    n = 0 'zera a contagem de dias chuvosos e dos dias decorridos
    Erro = False
    'Gera o primeiro dia chuvoso considerado
    P = Rnd
    Dia = Int(P * Dias_Mes(Matual) + 0.5)
    If Dia = 0 Then Dia = 1
    Chove(Dia) = 1
    Estado = "C"
    n = 1: nc = 1

    If NdC > 10 Then
      PbSC = (1 - Dados(6, Matual))
    Else
      PbSC = (1 - Dados(5, Matual))
    End If
    If NdC > 10 Then
      PbCC = Dados(8, Matual)
    Else
      PbCC = Dados(7, Matual)
    End If
    'A partir daí gera por cadeia de Markov
    Do While nc < NdC
      Dia = Dia + 1
      If Dia > Dias_Mes(Matual) Then Dia = 1
      n = n + 1: If n > Dias_Mes(Matual) Then Exit Do
      P = Rnd
      If Estado = "S" Then

        If P <= PbSC Then 'Chove
          nc = nc + 1
          Chove(Dia) = 1
          Estado = "C"
        End If
      Else
        If P <= PbCC Then 'Continua Chovendo
          nc = nc + 1
          Chove(Dia) = 1
        Else
          Estado = "S"
        End If
      End If
    Loop
    If n > Dias_Mes(Matual) Then Erro = True: Erase Chove
  Wend
ElseIf NdC > 20 Then 'gera os dias não chuvosos
  If NdC < Dias_Mes(Matual) Then

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

'Gera o primeiro dia
Do
  P = Rnd
  Dia = Int(P * Dias_Mes(Matual) + 0.5)
Loop While Dia = 0
NChove(Dia) = 1
For dl = 1 To (Dias_Mes(Matual) - NdC - 1)
  'Gera verificando se o dia sorteado já foi sorteado antes
  Do
    OK = True
    Do
      P = Rnd
      Dia = Int(P * Dias_Mes(Matual) + 0.5) 'Gera um novo
dia
    Loop While Dia = 0
    If NChove(Dia) = 1 Then 'já gerou este dia
      OK = False
    End If
  Loop While OK = False
  NChove(Dia) = 1
Next dl
End If
'Determina os dias chuvosos excluindo os não chuvosos
For dl = 1 To Dias_Mes(Matual)
  If NChove(dl) = 0 Then Chove(dl) = 1
Next dl
Else 'gera por Mero os dias chuvosos
'Gera o primeiro dia
Do
  P = Rnd
  Dia = Int(P * Dias_Mes(Matual) + 0.5)
Loop While Dia = 0
Chove(Dia) = 1
For dl = 1 To (NdC - 1)
  'Gera verificando se o dia sorteado já foi sorteado antes
  Do
    OK = True
    Do
      P = Rnd
      Dia = Int(P * Dias_Mes(Matual) + 0.5) 'Gera um novo dia
    Loop While Dia = 0
    If Chove(Dia) = 1 Then 'já gerou este dia
      OK = False
    End If
  Loop While OK = False
  Chove(Dia) = 1
Next dl
End If
End If

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

        For dl = 1 To Dias_Mes(Matual) 'gera o total precipitado e preenche a tabela
            nd = nd + 1
            If Chove(dl) = 1 Then
                P = Rnd
                Y = -Log(-Log(1 - P))
                x = 0.7797 * Dados(4, Matual) * Y + (Dados(3, Matual) - 0.45 *
Dados(4, Matual))
                If x <= 0 Then 'Ocorre a precipitação mínima registrada de 0,1 mm
                    x = 0.1
                End If
            Else
                x = 0
            End If
            Chuva(nd) = x
        Next dl
    Next j
End Sub

```

Public Sub Calcula()

```

    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer
    Dim Nanos As Integer 'Número de anos
    Dim Nser As Integer 'Número de séries
    Dim Mesi As Integer 'Mês inicial
    Dim Chuvad(1 To 365) As Single 'Matriz com a chuva de um ano hidrológico

    Dim Ai As Single 'abstração inicial (mm)
    Dim SAT As Single 'saturação do solo (mm)
    Dim CC As Single 'capacidade de campo (%)

    Dim RES() As Single 'resultados por séries: 1-Prec; 2-EVP; 3-EVR; 4-ES;5-REC
    Dim RESmed() As Single 'resultados médios de todas as séries séries: 1-Prec; 2-EVP;
3-EVR; 4-ES;5-REC

    Dim Aux() As Single 'Auxiliar para pegar a EVTo e calcular a média
    Dim Aux1 As Integer, Aux2 As Integer

    Dias_Mes = Array(31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31)

    Nser = Worksheets("Recarga").Range("K2").Value
    Nanos = Worksheets("Recarga").Range("k3").Value
    Mesi = Worksheets("Recarga").Range("k4").Value

    'Pega Parâmetros
    Ai = Worksheets("Recarga").Range("G3").Value
    SAT = Worksheets("Recarga").Range("G4").Value
    CC = Worksheets("Recarga").Range("G5").Value

    'Apaga resultados

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

Worksheets("Recarga").Range("F14:J14").Value = ""

ReDim RESmed(1 To 5, 1 To Nser)

'Pega as características da chuva
Call PegaDados

'Pega Evapotranspiração potencial
ReDim Aux(1 To 12)
For i = 1 To 12
    Aux(i) = Worksheets("Recarga").Range("C" & (3 + i)).Value
Next i
Aux1 = Mes1 - 1
Aux2 = 0
For i = 1 To 12
    Aux1 = Aux1 + 1: If Aux1 > 12 Then Aux1 = 1
    For j = 1 To Dias_Mes(Aux1)
        EVTo(Aux2 + j) = Aux(Aux1)
    Next j
    Aux2 = Aux2 + Dias_Mes(Aux1)
Next i

For k = 1 To Nser
    ReDim RES(1 To 5, 1 To Nanos)
    For i = 1 To Nanos
        Worksheets("Recarga").Range("J8").Value = "Calculando ano " & i & ", série "
& k

        'Gera a chuva
        Erase Chuvad
        Call Gera_Chuva(Chuvad())

        'Calcula Recarga por ano
        Call Recarga(Chuvad(), Ai, SAT, CC, i, RES())
    Next i

    'Média Anual
    Dim Col As Variant

    Col = Array("F", "G", "H", "I", "J")
    For i = 1 To 5
        ReDim Aux(1 To Nanos)
        For j = 1 To Nanos
            Aux(j) = RES(i, j)
        Next j
        RESmed(i, k) = Media(Aux(), Nanos)
    Next i
Next k

For i = 1 To 5

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

    ReDim Aux(1 To Nser)
    For j = 1 To Nser
        Aux(j) = RESmed(i, j)
    Next j
    Worksheets("Recarga").Range(Col(i) & "14").Value = Media(Aux(), Nser)
Next i
Worksheets("Recarga").Range("J8").Value = ""
End Sub

Public Function Media(x() As Single, n As Integer)
    Dim i As Integer
    Dim Somal As Single

    For i = 1 To n
        Somal = Somal + x(i)
    Next i

    Media = Somal / n
End Function

Public Function Desvio_Padrao(x() As Single, n As Integer, Med As Single) As Single
    Dim i As Integer
    Dim soma As Single

    For i = 1 To n
        soma = soma + (x(i) - Med) ^ 2
    Next i

    If n > 1 Then
        Desvio_Padrao = Sqr(soma / (n - 1))
    Else
        Desvio_Padrao = 0
    End If
End Function

Public Sub Recarga(Chuvad() As Single, Ai As Single, SAT As Single, CC As Single, ano As
Integer, RES() As Single)
    Dim i As Integer
    Dim P As Single 'Precipita
    Dim ES As Single 'Escoamento
    Dim EP As Single 'Evapt. potencial
    Dim ER As Single 'Evapt. real
    Dim AGUT As Single 'Parâmetro de recarga
    Dim RSOLO As Single 'Umidade no solo
    Dim S As Single
    Dim REC As Single

    RSOLO = 0 'inicia seco
    AGUT = 500 * CC / 100

```

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

```

For i = 1 To 365
  P = Chuvad(i)
  EP = EVTo(i)

  If P > Ai Then
    S = SAT - RSOLO
    ES = (P - Ai) ^ 2 / (P - Ai + S)
  Else
    ES = 0
  End If

  If (P - ES) > EP Then
    ER = EP
  Else
    ER = (P - ES) + (EP - (P - ES)) * RSOLO / SAT
  End If

  If RSOLO > AGUT Then
    REC = RSOLO - AGUT
  Else
    REC = 0
  End If

  RSOLO = RSOLO + P - ES - ER - REC

  RES(1, ano) = RES(1, ano) + P
  RES(2, ano) = RES(2, ano) + EP
  RES(3, ano) = RES(3, ano) + ER
  RES(4, ano) = RES(4, ano) + ES
  RES(5, ano) = RES(5, ano) + REC
Next i
End Sub

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A. *Precipitação Pluviométrica Provável em Municípios do Cerrado Piauiense*. Teresina, EMBRAPA-CPAMN, 1997.
- ARAÚJO, J. K.; CAMPOS, J. N. B. Utilização do Método dos Fragmentos no Estudo da Disponibilidade Hídrica de Açudes no Semi-Árido. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., Rio de Janeiro, 1991. *Anais*. Rio de Janeiro, ABRH/APRH, 1995. Vol. 1, p.467-474.
- AZEVEDO, J. R. G. Geração de Séries Sintéticas dos Parâmetros Climatológicos Influentes no Cálculo da Demanda D'água Derivada para Irrigação. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 1., Recife, 1992. *Anais*. Recife, Ed. Universitária da UFPE/GRH-UFPE/ABRH, 1992. Vol. 1, p.323-330.
- AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; ZAHED FILHO, K. Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo. In: PORTO, R. L. L., org. *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Porto Alegre, Ed. Universidade/ABRH/EDUSP, 1997. p.164-237.
- BARTORELLI, A.; HARALYI, N. Geologia do Brasil. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A., edit. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE, 1998. p.57-67.
- BARTH, F. T; POMPEU, C. T. Fundamentos para a Gestão de Recursos Hídricos. In: BARTH, F. T. et al. *Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. São Paulo, NOBEL/ABRH, 1987. p.1-91.
- BEAR, J. *Hydraulics of Groundwater*. Israel, McGraw-Hill, 1979.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 5.ed. Viçosa, Imprensa Universitária/UFV, 1989.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M., org. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre, Ed. Universidade/ABRH/EDUSP, 1993. p.177-241.
- BRAGA JÚNIOR, B. P. F. Técnicas de Otimização e Simulação Aplicadas em Sistemas de Recursos Hídricos. In: BARTH, F. T. et al. *Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. São Paulo, NOBEL/ABRH, 1987. p.425-518.
- CAMPOS, J. N. B. *Dimensionamento de reservatórios: o Método do Diagrama Triangular de Regularização*. Fortaleza, Edições UFC, 1996.
- CAMPOS, J. N. B., STUDART, T. M. C. Incertezas Hidrológicas: avaliando e ensinando. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5., Natal, 2000. *Anais*. ABRH, 2000. v.2. p.572 - 582.
- CAMPOS, STUDART, MARTINZ E COÊLHO. SIMRES: Laboratório Computacional de Reservatórios, 2000 (<http://www.deha.ufc.br/nilson/simres>) .
- CAMPOS, J. N. B.; IBIAPINA, N. G. Uma Equação para a Máxima Capacidade de Regularização em um Reservatório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Vitória, 1997. *Anais*. ABRH, 1997. CD-ROM.
- CARVALHO, N. L. *Estudo de Viabilidade para Transposição de Águas do Rio Preto (Bahia) para o Rio Gurguéia*. Teresina, SEPLAN-PI, 1995.
- CIRILO, J. A.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Regionalização de Parâmetros de Modelos Hidrológicos para Bacias Hidrográficas do Estado de Pernambuco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., Rio de Janeiro, 1991. *Anais*. Rio de Janeiro, ABRH/APRH, 1995. Vol. 3, p.172-182.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- CIRILO, J. A.; LUCENA, J. H. Modelos de Simulação Hidrológica Aplicados a Bacias Hidrográficas do Estado de Pernambuco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 1., Recife, 1992. *Anais*. Recife, Ed. Universitária da UFPE/GRH-UFPE/ABRH, 1992. Vol. 1, p.211-222.
- CLEARY, R. Águas Subterrâneas. In: RAMOS, F et al. *Engenharia Hidrológica*. Rio de Janeiro, Editora da UFRJ/ABRH, 1989. p.291-404.
- CONEJO, J. G. L. *Análise, Geração e Desagregação de Precipitações Diárias*. São Paulo, 1976. 63p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- COSTA, W. D. *Hidrogeologia de Meios Porosos*. Apostila em meio digital, 2000.
- COSTA, W. D. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C; MELO FILHO, J. Coord. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza, CPRM/LABHID-UFPE, 1997. p.341-365.
- COSTA, W. D.; COSTA FILHO, W. D. Disponibilidade de Águas Subterrâneas no Semi-Árido do Nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., Recife, 1995. *Anais*. Vitória, ABRH, 1995. Vol. 2, p.127-132.
- COSTA NETO, Pedro L. O. *Estatística*. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 264p.
- CPRM. *Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba – Mapa Geotécnico Preliminar*. Teresina, 1998. Escala: 1:250.000. 1 mapa.
- CPRM. *Mapa Geológico do Estado do Piauí*. Teresina, 1995. Escala: 1:1.000.000. 1 mapa.
- CRUZ, W. Recursos de Água Subterrânea em Simplício Mendes – Piauí. *Água Subterrânea*, ano 2, n.5, p.13-20, 1966.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- DACACH, Nelson G. *Sistemas Urbanos de Água*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1979. 2ed. 490p.
- DAKER, Alberto. *Água na Agricultura: manual de hidráulica Agrícola*. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1969. 3v.
- DINIZ, L. S. Abastecimento D'água no Estado da Paraíba. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., Salvador, 1996. *Anais*. Salvador, ABRH, 1996. p.137-142.
- DNPM. *Projeto RADAM - Mapa Fitoecológico*. Rio de Janeiro, 1973. Escala: 1:1.000.000. 1 mapa.
- DSG. *Carta Topográfica SC.23-X-B-III – São João do Piauí*. 1974. Escala: 1:100.000. 1 mapa.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Roma: *FAO – Irrigation and Drainage, paper 24*, 1984.
- DRACUP, J. A.; LEE, K. S.; PAULSON, E.G. On the Definiton of Droughts. *Water Resources Research*, 16(2), p.297-302, 1980.
- FAHMA. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Canindé/Piauí, no Estado do Piauí: relatório de andamento*. Teresina, MMA, SEMAR, 2000. 14v.
- FERNANDES, Paulo. Conceitos Básicos de Cadeias de Markov. <http://www.inf.pucrs.br/~paulof/courses/ad/markov0.html>. Última atualização: 1999.
- FERREIRA, J. P. C. L.; OLIVEIRA, M. M. Avaliação da Recarga Potencial dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., Recife, 1995. *Anais*. Vitória, ABRH, 1995. Vol. 2, p.145-152.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- FILL, H. D. Informações Hidrológicas. In: BARTH, F. T. et al. *Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. São Paulo, NOBEL/ABRH, 1987. p.95-210.
- FREIRE, P. K. C.; RAMOS, A. M. ; SILANS, A. M. B. P. Metodologia para Análise de Consistência de Dados Pluviométricos Mensais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Vitória, 1997. *Anais*. ABRH, 1997. CD-ROM
- FREITAS, M. A. S. A. O Modelo GAR(1)/Método dos Fragmentos Aplicado na Geração Sintética de Vazão em Rios Intermitentes do Semi-Árido Brasileiro. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., Salvador, 1996a. *Anais*. Salvador, ABRH, 1996. p.533-541.
- FREITAS, M. A. S. A. A Aplicação do Modelo Alternating Renewal Reward/ Fragmentos na Geração de Vazão no Semi-Árido. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., Salvador, 1996b. *Anais*. Salvador, ABRH, 1996. p.543-551.
- FREITAS, M. A. S. A. Geração de Vazão em Região Semi-Árida Usando o Modelo Alternating Renewal Reward / Fragmentos (ARRF). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Vitória, 1997. *Anais*. ABRH, 1997. CD-ROM.
- GHIRARDI, ANGELA O; DAMÁZIO, JORGE. M.; COSTA, FERNANDA. S. Um método de Estimação dos Parâmetros do Modelo ARMA(1,1) com Preservação do Comprimento Médio de In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., Recife, 1995. *Anais*. Vitória, ABRH, 1995. Vol. 1, p.265-270.
- GÓIS, R. S. S; SRINIVASAN, V. S.; SILVA, W. A. Avaliação de Alguns Modelos Determinísticos Chuva-Vazão em Bacias Hidrográficas de Diferentes Regiões do Estado da Paraíba. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., Salvador, 1996. *Anais*. Salvador, ABRH, 1996. p.559-564.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

HAAN, C. T. *Statistical Methods in Hydrology*. Ames, Iowa State University Press, 1977. 378p.

HIEZ, G. et al. Aplicação do Método do Vetor Regional a Análise da Pluviometria Anual da Bacia Amazônica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., Rio de Janeiro, 1991. *Anais*. Rio de Janeiro, ABRH/APRH, 1995. Vol. 1, p.367-377.

JENSEN, M. E. *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. New York, ASCE, 1973.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G.. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. New York, *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70*, 1990.

KELMAN, J. Modelos Estocásticos no Gerenciamento dos Recursos Hídricos. In: BARTH, F. T. et al. *Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. São Paulo, NOBEL/ABRH, 1987. p.325-424.

KENDALL, D.R.; DRACUP, J. A. On the Generation of Drought Events Using an Alternating Renewal-Reward Model, *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 6, 55-68, 1992.

LANNA, A. E. ; ROCHA, J. *Estudos para a Cobrança de Água no Estado do Piauí: Relatório Parcial*. Teresina, SEMAR, 2000.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR., B. P. F.; CONEJO, J. G. L. Simulação Hidrológica: Aplicação de um Modelo Simplificado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 4., Fortaleza, 1981. *Anais*. São Paulo, ABRH, 1981. Vol. 2, p.42-62.

MARWELL Fº, Pedro. Projeto Áridas Tema 7: Análise de sustentabilidade do Estado do Piauí quanto aos recursos hídricos. Teresina, SEPLAN, 1995.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- MEDEIROS, J. D. F.; GUEDES, F. X.; CHAGAS, L. M. F. Estudo da Ocorrência de Anos Secos na Bacia do Rio Piranha-Açu. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., Salvador, 1996. *Anais*. Salvador, ABRH, 1996. p.511-522.
- MENTE, A.; GUSMÃO, G. A.; CRUZ, W. *Estudo Hidrogeológico da Região de São João do Piauí*. Recife, SUDENE, 1965.
- MOLLE, F.; CADIER, E. *Manual do Pequeno Açude: construir, conservar e aproveitar pequenos açudes*. Recife, SUDENE/ORSTOM/TAPI, 1992.
- NASCIMENTO, Carlos E. S. Geração Estocástica de Chuvas Diárias na Bacia do Rio Canoa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 8., Foz do Iguaçu, 1989. *Anais*. ABRH, 1997. Vol. 2, p.101-107.
- PORTO, R. L., Estudos de Operação do Sistema França - São José do Jacuípe, Relatório Técnico para a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia, 1997.
- PORTO, R. L., Estudos de Operação do Reservatório de Ponto Novo no Rio Itapicuru, Relatório Técnico para a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia, 1999.
- RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos, EESC/USP, 1998. 819p.
- SAINT-FOULC, J. D. *El Riego por Aspersión*. Barcelona, Técnicos Asociados, 1975. 3ed. 252p.
- SAMANI, Z. A.; HARGREAVES, G. H. *A crop water evaluation manual for Brazil*. Logan, International Irrigation Center, 1985.
- SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. *Gestão das Águas: 6 anos de percurso*. São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, 1997.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

- SILANS, A. M. B. P et al. Sustentabilidade Hídrica da Bacia do Rio do Peixe. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., Salvador, 1996. *Anais*. Salvador, ABRH, 1996. p.265-271.
- SILVA, A. P. B. A.; MATTOS, A. Estudo das Condições Hidrometeorológicas do Estado de Sergipe para Aproveitamento Hidroagrícola. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 1., Recife, 1992. *Anais*. Recife, Ed. Universitária da UFPE/GRH-UFPE/ABRH, 1992. Vol. 1, p.307-321.
- SILVA, G. A.; SIMÕES, R. A. G. Água na Indústria. In: REBOUÇAS, A. C. et al. *Águas Doces no Brasil – Capital Ecológico, Uso e Conservação*. São Paulo, Escrituras Editora, 1999. p.339-369.
- SIRAC. *Vale do Rio Piauí – Estudo de Viabilidade: Hidrologia*. Tomo II, v.3, 1987.
- SOUZA FILHO, F. A; CAMPOS, J. N. B. A Outorga como Instrumento de Gestão: Estudo de Caso. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., Salvador, 1996. *Anais*. Salvador, ABRH, 1996. p.327-333.
- SOUZA FILHO, F. A; PORTO, R. L. L. Modelo de Otimização da Alocação Intra-Anual de Estoques de Água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Vitória, 1997. *Anais*. ABRH, 1997. CD-ROM.
- SMITH, M.; ALLEN, R.; PEREIRA, L. Revised FAO Methodology for Crop Water Requirements. In: ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, San Antonio, USA, 1996.
- STEDINGER, JERY. R.; LETTENMAIER, DENNIS R.; VOGEL, RICHARD M. Multisite ARMA(1,1) and Disaggregation Models for Annual Streamflow Generation. *Water Resources Research*, vol. 21, no. 4, p.497-509, April, 1985.

Instrumentos para a Avaliação da Sustentabilidade Hídrica em Regiões Semi-Áridas

STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B.; COSTA, A. M. A Alocação e o Uso dos Recursos Hídricos no Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Vitória, 1997. *Anais*. ABRH, 1997. CD-ROM

SUDENE. *PLIRHINE, Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil*. Recife, 1980.

SUDENE. *Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado Piauí*. Recife, 1990.

SUDENE. *Análise da Pluviometria e Isoietas Homogeneizadas do Nordeste Brasileiro*. Recife, 1994.

TELLES, D. A. *Determinação das Demandas de Água para Irrigação: Evapotranspiração de Referência no Estado de São Paulo*. São Paulo, 1996. 2v. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

VIEIRA, V. P. B. Água Doce no Semi-Árido. In: REBOUÇAS, A. C. et al. *Águas Doces no Brasil – Capital Ecológico, Uso e Conservação*. São Paulo, Escrituras Editora, 1999. p.509-532.

VIEIRA, V. P. B.; VIEIRA, L. A. A. Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido Nordestino. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., Recife, 1995. *Anais*. Vitória, ABRH, 1995. Vol. 2, p.17-23.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975.