



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**BALANÇO HÍDRICO DO BOTA-FORA BF4 DA MINA
OSAMU UTSUMI, INB, COMO SUBSÍDIO PARA
PROJETOS DE REMEDIAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA**

AUTOR: JÚNIO RENÉ TOLEDO FAGUNDES

ORIENTADOR: Adilson do Lago Leite, D.Sc.

CO-ORIENTADOR: Carlos Eduardo Ferraz de Mello, D.Sc.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia.

Ouro Preto, julho de 2005.

F156b Fagundes, Júnio René Toledo.
Balanço hídrico do bota-fora BF4 da mina de Urânio Osamu Utsumi, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida [manuscrito]. / Júnio. - 2005.
xvi, 121f. : il., color. graf., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite.
Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Ferraz de Mello.
Área de concentração: Geotecnia.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

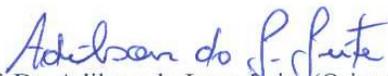
1. Geotecnia - Teses. 2. Minas - Drenagem - Teses. 3. Balanço Hidrológico –
Teses. 4. Urânio - Minas e mineração – Osamu Utsumi - Teses.I.

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

**BALANÇO HÍDRICO DO BOTA-FORA BF4 DA MINA OSAMU
UTSUMI, INB, COMO SUBSÍDIO PARA PROJETOS DE
REMEDIAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA**

AUTOR: JÚNIO RENÉ TOLEDO FAGUNDES

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 15 de julho de 2005, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



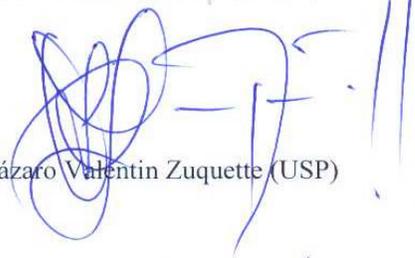
Prof. Dr. Adilson do Lago Leite (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Carlos Eduardo Ferraz de Mello (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)



Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette (USP)

*“De tudo, ficaram três coisas:
a certeza de que estamos sempre começando...
a certeza de que é preciso continuar...
a certeza de que seremos interrompidos antes de terminar...”*

*Portanto, devemos:
Fazer da interrupção um caminho novo...
da queda, um passo de dança...
do medo, uma escada...
do sonho, uma ponte...
da procura, um encontro...”*

(Fernando Sabino)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nada menos que TUDO.

À Fundação Gorceix e à CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos professores orientadores Adilson do Lago Leite e Carlos Eduardo Ferraz de Mello, pelos ensinamentos e pela oportunidade que me foi dada.

Aos professores Romero César Gomes, Luís de Almeida Prado Bacellar, Antenor Rodrigues Barbosa Júnior e Lázaro Valentin Zuquette pelas contribuições ao trabalho.

Aos colegas e verdadeiros companheiros de curso Germano, Deílton, Fernanda, Eleonardo, Wagner, Tadeu e Luiz Heleno pelos bons momentos vividos nestes dois anos.

Aos amigos Leonardo, Flávia e Heber pela cooperação e ajuda.

Aos funcionários Válter Dornellas e Róvia pela disposição no atendimento.

À INB, em especial ao José Fernando Carrazedo Taddei, pelo fornecimento dos dados necessários ao trabalho.

Ao INMET, através do seu 5º DISME, pelo gentil fornecimento de informações meteorológicas.

À Micheli, por sua sincera e gostosa companhia amorosa.

Aos meus queridos pais e irmãos, pelo incondicional apoio e incentivo à eterna busca do “algo mais”.

A Mina Osamu Utsumi, localizada no município de Caldas/MG, é pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil (INB), de onde extraiu-se urânio desde 1982 até 1996. A exploração da mina teve início em 1977, com o decapeamento do material sotoposto à jazida de urânio. Os resíduos gerados a partir deste processo eram, por decisões de planejamento, dispostos em locais denominados bota-foras, lançados segundo o método ponta de aterro, sem nenhuma selagem de base.

Segundo maior depósito de estéreis da INB, o bota-fora BF4 representa o foco de estudo deste trabalho. Constituindo um dos grandes responsáveis para o volume total dos efluentes ácidos que são tratados pela INB, os contribuintes hídricos para a geração de drenagem ácida (DAM) em sua região de abrangência são ainda desconhecidos.

Sendo a DAM um problema de origem hídrica, e considerando o grande número de informações meteorológicas disponibilizado pelo Laboratório de Controle Ambiental da INB (LCA/INB), o presente trabalho teve como objetivo principal a obtenção do balanço hídrico na região do bota-fora BF4. Seus resultados serviriam, em princípio, como um instrumento preliminar de investigação dos principais componentes hídricos causadores da DAM no local, além de fornecer subsídios técnicos para futuras intervenções remediadoras.

Registros históricos de precipitação, velocidade dos ventos, temperatura, umidade etc, juntamente com dados de vazão dos efluentes ácidos do BF4 foram utilizados neste balanço hídrico. A evapotranspiração foi obtida com a utilização do modelo matemático proposto por Penman. Além disso, algumas hipóteses foram consideradas e assumidas nos cálculos.

Os resultados obtidos indicaram a chuva como o principal contribuinte para a formação da DAM no BF4, o que concorda com medidas que visem a redução da infiltração neste bota-fora.

Palavras-chave: drenagem ácida de mina; balanço hídrico; Mina Osamu Utsumi.

ABSTRACT

The Osamu Utsumi Mine, Caldas MG, Brazil, is one of the Industrias Nucleares do Brasil (INB) nuclear facilities and produced uranium from 1982 to 1996. Mine overburden had been created since 1977, when uranium production began. These wastes were dumped mainly, in river valleys without any liner.

The second largest waste rock pile in the site, BF4 was the focus of this Dissertation. BF4 contributes intensively for the acid mine drainage (AMD) generated and treated in this mine complex. However the water contributors for the AMD generation in BF4 watershed remain undetermined.

As AMD is mainly a water problem and considering the generous amount of available data at this site produced by the INB Environmental Control Laboratory (LCA), this research focused on the determination of the water balance at the BF4 waste pile. The results of this water balance were intended as an indication of the main hydric contributors for AMD generation at this site, which would collaborate with the decision-making process for future remediation measures.

Historical weather data such as precipitation, wind velocities, temperature, humidity etc, along with the flux rate of AMD at the base of BF4 were applied in the water balance. Evapotranspiration was determined using the Penman Equation. Besides, some other hypotheses were inferred and assumed.

The results indicated that the rain is the main water contributor to the AMD generation at the BF4, which corroborates remediation measures that take into account reducing infiltration at this waste pile.

Key-words: acid mine drainage, water balance, Osamu Utsumi Mine.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE.....	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	XII
CAPÍTULO 1	1
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
CAPÍTULO 2.....	7
DRENAGEM ÁCIDA	7
2.1 – INTRODUÇÃO	7
2.2 – TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE MINERAÇÃO.....	9
2.3 – MINERAIS ENVOLVIDOS NA GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA.....	11
2.4 – REAÇÕES DE GERAÇÃO DE DAM POR OXIDAÇÃO DA PIRITA.....	12
2.5 – REAÇÕES DE NEUTRALIZAÇÃO.....	14
2.6 – A ATUAÇÃO MICROBIOLÓGICA	15
2.7 – LIXIVIAÇÃO DE METAIS PESADOS	17
2.8 – FATORES INTERVENIENTES	19
2.9 – PREVISÃO DE DAM	21
2.10 – TÉCNICAS DE PREVENÇÃO E TRATAMENTO.....	22
CAPÍTULO 3.....	28
A MINA OSAMU UTSUMI E O BOTA-FORA BF4.....	28
3.1 – LOCALIZAÇÃO.....	28
3.2 – FINALIDADE	28
3.3 – CONTEXTO GEOLÓGICO.....	30
3.4 – ASPECTOS FÍSICOS, CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS	33
3.5 – HISTÓRICO DA MINA OSAMU UTSUMI	34
3.6 – GERENCIAMENTO DO PROCESSO MINERÁRIO	36
3.7 – PRODUÇÃO DE MINÉRIOS E RESÍDUOS.....	37
3.8 – O BOTA-FORA BF4.....	40
3.9 – DRENAGEM ÁCIDA E CUSTOS ENVOLVIDOS.....	43
CAPÍTULO 4.....	47
BALANÇO HÍDRICO E SEUS COMPONENTES.....	47
4.1 – INTRODUÇÃO	47
4.2 – CICLO HIDROLÓGICO.....	47
4.3 – EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO.....	49

4.4 – COMPONENTES DA EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO	51
4.4.1 – Precipitação (P)	51
4.4.2 – Evapotranspiração (ET)	55
4.4.3 – Infiltração (I)	57
4.4.4 – Escoamento superficial (R)	59
4.4.5 – Escoamento subterrâneo (G)	62
4.4.6 – Variação do volume de água acumulada no elemento de controle (ΔV_{EC})	65
4.5 – BACIA HIDROGRÁFICA	69
4.5.1 – Características geométricas	72
4.5.2 – Características do sistema de drenagem	73
4.5.3 – Características de relevo	75
4.5.4 – Influência das rochas, solos e cobertura vegetal	77
CAPÍTULO 5	78
BALANÇO HÍDRICO DO BOTA-FORA BF4	78
5.1 – INTRODUÇÃO	78
5.2 – A MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO BF4	81
5.3 – COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO NO BF4	82
5.3.1 – Precipitação (P)	82
5.3.2 – Evapotranspiração Potencial (ET_p)	88
5.3.2.1 – Temperatura (T)	88
5.3.2.2 – Umidade relativa do ar (UR)	89
5.3.2.3 – Velocidade dos ventos (U_2)	91
5.3.2.4 – Insolação (n)	92
5.3.2.5 – Outros parâmetros	94
CAPÍTULO 6	96
RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
6.1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ET_p)	96
6.2 – DIFERENÇA [$P - ET_p$] NO BF4	99
6.3 – VAZÃO MEDIDA NA BNF (G_{out})	103
6.4 – COMPARAÇÃO DE VALORES – BALANÇO HÍDRICO	105
6.5 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO (P) E VAZÃO NA BNF (G_{out})	107
6.6 – CORRELAÇÃO ENTRE P E OS NÍVEIS DO PIEZÔMETRO BF4PT03	109
CAPÍTULO 7	112
CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 – Processo de formação de drenagem ácida de mina em pilha de rejeito (Yanful e St-Arnaud, 1990, citado por Pastore e Mito, 2000).	9
Figura 2. 2 – Fluxograma geral das atividades de uma indústria mineira (Luz, 1995).	10
Figura 2. 3 – Estágios de formação da drenagem ácida (Fergusson e Erickson, 1987, citado por Pastore e Mito, 2000).	13
Figura 2. 4 – Influência do pH, da temperatura e concentração de O ₂ , respectivamente, na atividade relativa da T. ferrooxidans (Jaynes et al., 1984, citado por Evangelou, 1995).	17
Figura 2. 5 – Comportamento de alguns metais pesados em função do pH em Argo (American Water Resources Association, 1974, citado por Sengupta, 1993).	18
Figura 2. 6 – Exemplos esquemáticos de (a) contenção e (b) tratamento passivos (Shackelford e Jefferis, 2000).	23

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1 – Localização regional da mina. Planalto de Poços de Caldas. (Fonte: Cipriani, 2002. Adaptado).	29
Figura 3. 2 – Detalhes geográficos do Planalto de Poços de Caldas e Localização do CIPC (Fonte: INB. Obs.: UTM = CIPC, citado por Cipriani, 2002).	30
Figura 3. 3 – Arranjo Físico do CIPC no Planalto de Poços de Caldas (Fonte: INB, citado por Cipriani, 2002).	37
Figura 3. 4 – Fluxograma do gerenciamento dos rejeitos líquidos e sólidos no CIPC (Fonte: Cipriani, 2002).	40
Figura 3. 5 – Vista parcial do talude principal do bota-fora BF4. Na base deste talude encontra-se o dreno principal e a lagoa de contenção de drenagem ácida (BNF).	41
Figura 3. 6 – Bacia BNF de contenção dos efluentes ácidos do BF4.	45
Figura 3. 7 – Vista parcial da cava da mina inundada.	45

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1 – Esquema geral do ciclo hidrológico (Barbosa Jr., 2002).	48
Figura 4. 2 – Aplicação do balanço hídrico em superfície.	50
Figura 4. 3 – Exemplo de um pluviômetro.	53
Figura 4. 4 – Pluviógrafo do Laboratório de Controle Ambiental da INB.	53
Figura 4. 5 – Exemplos de lisímetros (Lencastre e Franco, 1984).	56
Figura 4. 6 – Perfil típico de um solo, contemplando as zonas de aeração (vadosa) e saturação (Tucci, 2002).	57
Figura 4. 7 – Variação do perfil de umidades (Tucci, 2002).	58
Figura 4. 8 – Variação de capacidade de infiltração durante uma precipitação (Barbosa Jr., 2002).	59
Figura 4. 9 – Variação típica de um hidrograma e da capacidade de infiltração com a chuva (Tucci, 2002. Adaptado).	62
Figura 4. 10 – Permeâmetros de carga fixa e variável (Tucci, 2002).	64

Figura 4. 11 – Perfil de umidade e representação do volume de água acumulado (V_{EC}) na zona não saturada do solo (Tucci, 2002).	66
Figura 4. 12 – Curvas características de θ e K em função de h_p para solos arenosos (Freeze e Cherry, 1979. Adaptado).	67
Figura 4. 13 – Representação esquemática de uma bacia hidrográfica (Ramos et al., 1989).	70
Figura 4. 14 – Divisores de água superficial ou topográfico e freático ou subterrâneo (Lencastre e Franco, 1984).	70
Figura 4. 15 – Critério de Horton-Strahler para ordenamento de cursos d'água (Lencastre e Franco, 1984).	74
Figura 4. 16 – Conceito de bacia retangular para a obtenção do l_{es} (Lencastre e Franco, 1984).	75
Figura 4. 17 – Curva hipsométrica da bacia do rio Capivari (Barbosa Jr., 2002).	75
Figura 4. 18 – Representação do perfil longitudinal do rio Mondego (Lencastre e Franco, 1984).	76
Figura 4. 19 – Distribuição de frequência das declividades da bacia do rio Capivari (Barbosa Jr, 2002).	76

CAPÍTULO 5

Figura 5. 1 – Delimitação da bacia de contribuição do BF4 (em cor magenta).	82
Figura 5. 2 – Localização das estações M/1, M/2, 017, 018 e 125 em relação ao BF4.	83
Figura 5. 3 – Registro das precipitações anuais acumuladas de 1977 a 2004 (Fonte: LCA/INB).	84
Figura 5. 4 – Análise de dupla massa (precipitações anuais acumuladas) – 1990 a 2004.	85
Figura 5. 5 – Estudo semi-estatístico das precipitações anuais acumuladas das Estações M/1 e M/2.	86
Figura 5. 6 – Variação do índice pluviométrico médio ao longo do ano (1977 a 2004).	87
Figura 5. 7 – Série histórica de temperaturas na Estação M/2 (01/1997 a 11/2004).	89
Figura 5. 8 – Evolução da umidade relativa do ar – médias mensais (01/1989 a 02/1998).	90
Figura 5. 9 – Diferença entre as médias de U_2 : (a) Estação M/2; (b) Estação M/1.	92
Figura 5. 10 – Variação do parâmetro n (insolação diária) ao longo do ano – valores médios (01/89 a 12/04).	93

CAPÍTULO 6

Figura 6. 1 – Diferenças em porcentagem entre os valores mensais de ET_p segundo as análises (1-a), (1-b), (2-a) e (2-b).	98
Figura 6. 2 – Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,30$) – $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$.	101
Figura 6. 3 – Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,35$) – $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$.	101
Figura 6. 4 – Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,30$) – $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$.	102
Figura 6. 5 – Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,35$) – $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$.	102
Figura 6. 6 – Flutuação anual dos volumes médios mensais G_{out} drenados na BNF (01/1998 a 08/2004).	105
Figura 6. 7 – Correlação da precipitação com a vazão na BNF – período de 01/1997 a 08/2004.	108
Figura 6. 8 – Correlação da precipitação com as leituras efetuadas no piezômetro BF4PT03 (04/2000 a 05/2002).	111

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2. 1 – Principais minerais associados com a DAM.....	11
Tabela 2. 2 – Bactérias envolvidas na DAM e suas condições de proliferação.....	16

CAPÍTULO 3

Tabela 3. 1 – Produção Mineira do CIPC até 1997.	38
Tabela 3. 2 – Composição mineralógica (média de porcentagem) de algumas rochas encontradas no corpo B.....	42
Tabela 3. 3 – Concentrações observadas nas águas do BF4 e as concentrações máximas permitidas segundo a Portaria n.º 518/04 e a Resolução n.º 357/05.....	43
Tabela 3. 4 – Volume de águas ácidas tratadas no CIPC, consumo e custo dos insumos usados no tratamento no período de 1994 a 2001.	46

CAPÍTULO 5

Tabela 5. 1 – Comparação entre as precipitações mensais (mm) da Estação M/1 e do INMET – anos 1980 e 1983.....	84
Tabela 5. 2 – Índices pluviométricos mensais médios e média geral anual (1977 a 2004).	88
Tabela 5. 3 – Médias mensais de temperatura (T) na Estação M/2 (01/1997 a 11/2004).	89
Tabela 5. 4 – Médias mensais de umidade relativa do ar (UR) na Estação M/2 (01/1989 a 02/1998).	90
Tabela 5. 5 – Médias mensais de velocidade dos ventos (U_2) (Estação M/1 – Mirante – 01/89 a 04/1991).	92
Tabela 5. 6 – Valores mensais médios de insolação diária – 01/89 a 12/04 (Fonte: INMET).	93
Tabela 5. 7 – Valores para pressão de saturação do vapor d’água (e_s).	94
Tabela 5. 8 – Valores de R_i e N aplicados para o BF4.....	95

CAPÍTULO 6

Tabela 6. 1 – Evapotranspiração potencial mensal (mm) segundo os valores de α , β e de a (albedo) adotados.	96
Tabela 6. 2 – Diferenças em porcentagem entre os valores de ET_p quanto às análises (1-a), (1-b), (2-a) e (2-b).....	98
Tabela 6. 3 – Infiltração ($P - ET_p$) no BF4 para $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$, segundo os valores de albedo adotados.	100
Tabela 6. 4 – Infiltração ($P - ET_p$) no BF4 para $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$, segundo os valores de albedo adotados.	100
Tabela 6. 5 – Volumes médios mensais e anual médio de G_{out} coletados na BNF (01/1998 a 08/2004).	104
Tabela 6. 6 – Comparação entre os volumes médios acumulados na BNF e os volumes de infiltração obtidos do balanço hídrico do BF4 ($\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$).	106
Tabela 6. 7 – Comparação entre os volumes médios acumulados na BNF e os volumes de infiltração obtidos do balanço hídrico do BF4 ($\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$).	106
Tabela 6. 8 – Perfuração e revestimento usados no piezômetro BF4PT03.	110

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

%S	percentual total de enxofre
017	estação meteorológica da mina Osamu Utsumi
018	estação meteorológica da mina Osamu Utsumi
125	estação meteorológica da mina Osamu Utsumi
ABA	balanço ácido-base (acid-base accounting)
DAM	Drenagem ácida de mina
AP	máximo potencial de produção ácida
APP:S	produção potencial de alcalinidade: enxofre (Alcalinity Potential Production: Sulfur)
ATP	Trifosfato adenosina
BC	British Columbia
BF4	bota-fora 4
BF4PT01	piezômetro 01 do BF4
BF4PT02	piezômetro 02 do BF4
BF4PT03	piezômetro 03 do BF4
BF8	bota-fora 8
BNF	bacia D5 – contenção dos efluentes ácidos ao pé do BF4
CIPC	Complexo Mínero-Industrial do Planalto de Poços de Caldas
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEP	Department of Environmental Protection
DISME	Distrito de Meteorologia
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DUA	diuranato de amônio
DUCA	diuranato de cálcio
Eh	potencial de oxi-redução
EMCBC	Environmental Mining Council of British Columbia
EPA	Environmental Protection Agency

EUA	Estados Unidos da América
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LCA	Laboratório de Controle Ambiental
M/1	estação meteorológica da mina Osamu Utsumi
M/2	estação meteorológica da mina Osamu Utsumi
NNP	potencial de neutralização efetiva
NP	máximo potencial de neutralização
Nuclebras	Empresas Nucleares do Brasil S. A.
pH	potencial hidrogeniônico
PVC	policloreto de vinila
TF	Thiobacillus ferrooxidans
U	urânio (elemento químico)
US	United States
US\$	dólar norte americano
UTM	Unidade de tratamento de minério
<i>a</i>	albedo
<i>A</i>	área de drenagem da bacia hidrográfica
<i>b</i>	espessura do aquífero
<i>b, c</i>	coeficientes introduzidos para considerar o efeito das nuvens para a radiação de onda longa
<i>C</i>	capacidade de umidade específica
<i>C</i>	coeficiente de escoamento superficial
<i>E</i>	evaporação
<i>e</i>	pressão de vapor
<i>E_i</i>	poder evaporante à sombra
<i>e_s</i>	pressão parcial de vapor saturado à temperatura da superfície evaporante
<i>ET</i>	evapotranspiração
<i>ET_p</i>	evapotranspiração potencial
<i>ET_r</i>	evapotranspiração real

f	capacidade de infiltração
g	aceleração da gravidade
G	escoamento subterrâneo
G_{in}	escoamento subterrâneo de entrada
G_{out}	escoamento subterrâneo de saída
h	carga hidráulica total
h_e	carga geométrica
h_p	carga de pressão
i	gradiente hidráulico
I	infiltração
i	intensidade de uma precipitação
K	condutividade hidráulica
k_0	permeabilidade intrínseca do meio poroso
K_c	coeficiente de compacidade
K_f	fator de forma
L	calor latente de vaporização
L	comprimento axial da bacia hidrográfica
l	largura média da bacia hidrográfica
l_{es}	percurso médio do escoamento superficial
N	duração máxima da insolação diária
n	insolação diária efetiva
NA	nível de água
P	precipitação ou altura pluviométrica
P_{ef}	precipitação efetiva ou excedente
Per	perímetro da bacia hidrográfica
Q	vazão
R	escoamento superficial
R^2	coeficiente de determinação
R_{in}	escoamento superficial de entrada
R_{liq}	radiação efetivamente absorvida pela superfície
R_{out}	escoamento superficial de saída
R_t	radiação de ondas curtas no topo da atmosfera

S	coeficiente de armazenamento
S	grau de saturação
S_s	armazenamento específico
T	temperatura
T	transmissividade
T	transpiração
t_b	tempo de base
t_c	tempo de concentração
t_d	duração de uma precipitação
t_e	tempo de recessão
t_l	tempo de retardo
t_m	tempo de ascensão
t_p	tempo de pico
T_r	tempo de recorrência
U_2	velocidade do vento a 2 metros da superfície evaporante
UR	umidade relativa do ar
V	velocidade darcyniana
V_{EC}	volume de água armazenado no elemento de controle
Vol_S	volume escoado superficialmente por ocasião de chuva
Vol_T	volume de água precipitada
V_p	velocidade de percolação
V_T	volume total
V_v	volume de vazios
V_w	volume de água presente no solo
z	profundidade
ΔV_{EC}	variação do volume de água armazenado no solo
Δ	variável auxiliar que representa a medida da variação da pressão de saturação do vapor com a variação da temperatura, num ponto em que a temperatura é igual à temperatura do ar
Δh	diferença de potencial hidráulico
ΔL	comprimento percorrido pela partícula de água no solo

ΔV_{ECS}	variação do volume de água armazenado na superfície do solo
ΣL_i	comprimento total dos cursos d'água
Σ	somatório
α	compressibilidade do meio poroso
α, β	parâmetros corretivos
β	compressibilidade da água
γ	constante psicrométrica ou constante de Bowen
η	porosidade do solo
λ_d	densidade de drenagem
μ	viscosidade dinâmica do fluido
θ	grau de umidade volumétrica
ρ	massa específica do fluido
σ	constante de Stefan-Boltzman

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A vertente da industrialização e do desenvolvimento tecnológico vem se tornando cada vez mais pronunciada, motivada pela necessidade do bem estar social e econômico dos povos. Com o passar do tempo, a evolução deste conceito de bem estar vem ampliando de forma gradativa a consciência geral a respeito da preservação ambiental. Como os seres vivos, de modo geral, dependem diretamente dos recursos naturais disponíveis sobre a superfície terrestre, a questão do ambiente é um assunto que merecidamente vem ganhando destaque nos cenários mundial e nacional.

Inserida neste contexto, a preservação dos recursos hídricos torna-se extremamente necessária e traz à tona a discussão e a reflexão sobre o modo ideal de interação e intervenção do homem sobre a natureza, com a finalidade de se garantir a integridade destes recursos.

No passado, as atividades sócio-econômicas eram realizadas de maneira descontrolada. Nas últimas décadas, no entanto, principalmente depois da criação de leis que visam controlar a qualidade hídrica dos efluentes, as ações antrópicas vêm se aprimorando sensivelmente no que diz respeito aos impactos ambientais gerados por empreendimentos.

Dentro da ótica ambiental, as atividades de mineração, especificamente, podem provocar grandes impactos, que se traduzem por alterações nos meios físico, biótico e antrópico. Estas alterações são principalmente ativas nas etapas de exploração e beneficiamento mineral, pela disposição dos rejeitos e estéreis da mina e pelo lançamento dos efluentes líquidos nos corpos hídricos, além de outros impactos.

No tocante à poluição das águas oriundas de atividades mineiras, um dos problemas de grande preocupação científica se refere à drenagem ácida de mina

(DAM). Este fenômeno é causado basicamente pela oxidação natural dos sulfetos metálicos existentes em presença de água e oxigênio. Como resultado deste fenômeno tem-se a formação de ácido sulfúrico, responsável pela elevação da acidez no meio e, conseqüentemente, pela dissolução de metais pesados associados às matrizes rochosas. A degradação da qualidade ambiental de córregos e lagos e a mortandade de peixes e outras espécies aquáticas são alguns exemplos dos problemas gerados pela drenagem ácida.

Em vista disso, e aliado ao fato de que muitas empresas têm despendido elevados recursos financeiros para o cumprimento das obrigações legais, muitos pesquisadores têm se empenhado na busca do pleno conhecimento sobre o assunto e de soluções que visem minimizar os impactos causados pela DAM.

Diante desta questão se encontra a Mina de Urânio Osamu Utsumi, situada no Complexo Mínero-Industrial de Poços de Caldas (CIPC). A jazida que deu origem à mina foi descoberta em 1970 e em 1976 a Nuclebrás, empresa estatal titular da jazida na época, contratou a empresa francesa Uranium Pechiney Ugine Kuhlman (UPUK) para executar o projeto básico da mina e da usina. Com a estimativa de produção de 425 tU/ano durante 10 anos, as atividades da mina tiveram início em 1977, com o início das operações de decapagem. A operação comercial iniciou-se em 1982 e funcionou de forma descontínua até 1995, não atingindo as metas de produção anteriormente previstas.

Gerenciada atualmente pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB), a mina se encontra em processo de descomissionamento. Previsto na Constituição Brasileira, o descomissionamento refere-se ao *conjunto de ações tomadas no final da vida útil de uma instalação nuclear para sua retirada de serviço com o adequado cuidado para com a saúde e segurança dos trabalhadores e dos membros do público e a proteção do meio ambiente* (IAFA, 1994, citado por Cipriani, 2002). Dentre as atividades a serem desenvolvidas, assume grande importância o tratamento e monitoramento da DAM gerada.

No início da operação, as drenagens ácidas oriundas dos resíduos da mina (bota-foras) eram lançadas diretamente nos córregos Consulta e Cercado. Com a constatação do problema pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1983, a coleta e o tratamento destas águas passaram a ser obrigatórios. O tratamento, que é executado na

Estação de Tratamento de Águas Marginais da mina, utiliza como insumos a cal hidratada, para a elevação do nível de pH, e flocculantes, que auxiliam a etapa de separação sólido-líquido.

Adicionalmente, o parâmetro econômico assume importância, uma vez que, entre 1994 e 2001, foram gastos aproximadamente US\$ 1,2 milhão com tratamentos corretivos dos efluentes ácidos gerados no CIPC. Atualmente, este procedimento onera a empresa em mais de US\$ 100 mil anuais (Cipriani, 2002).

Como grande contribuinte para o volume total dos efluentes ácidos que são tratados pela INB, o bota-fora BF4 representa o foco de estudo deste trabalho. Trata-se de um depósito de estéreis com volume de 12,4 milhões m³, abrangendo uma área de 569 mil m² situada sobre a antiga vertente do córrego Consulta. A drenagem ácida gerada em sua base, com pH em torno de 3 a 3,5, é reservada em uma pequena barragem (BNF) e é continuamente bombeada para a cava da mina. Seus efluentes ácidos, com volumes médios anuais da ordem de 5×10^5 m³, representam cerca de 40% de todo volume tratado no CIPC (Prado, 1994). O regime de fluxo hídrico deste bota-fora ainda não foi bem definido e, desta forma, os contribuintes para geração de drenagem ácida em sua região de abrangência são ainda desconhecidos.

O curso d'água (córrego Consulta) que passava pelo vale onde atualmente se situa o BF4 foi desviado, lançando suas águas num ponto à jusante em relação a este depósito. Tal medida teve como objetivo reforçar a estabilidade física deste bota-fora. No entanto, dúvidas ainda persistem quanto às possíveis contribuições do antigo leito deste córrego desviado e de águas subterrâneas de outras fontes para a geração de DAM neste local.

Assim, trabalhos que objetivem determinar o entendimento do real regime de fluxo neste bota-fora constituem contribuições significativas para possíveis medidas que possam reduzir o volume de drenagem ácida gerado e, por consequência, tratado.

Inserida num projeto maior, resultante de um acordo entre a INB e a Universidade Federal de Ouro Preto para o estudo da drenagem ácida, a presente Dissertação tem como objetivo principal a obtenção do balanço hídrico na região do BF4. A utilização desta “ferramenta” hidrológica foi utilizada como uma medida preliminar na tentativa da determinação dos principais contribuintes hídricos para a geração de DAM no local.

Em linhas gerais, o balanço hídrico consiste numa representação matemática, em termos de volume, das quantidades hídricas atribuídas aos diferentes fenômenos físicos e meteorológicos que ocorrem na natureza e que compõem o chamado ciclo hidrológico: precipitação, evaporação e transpiração (evapotranspiração), escoamentos superficial e subterrâneo, infiltração e variação do volume de água presente no solo.

A Dissertação foi então desenvolvida tendo como meta a determinação destas variáveis hidrológicas indispensáveis para o balanço hídrico no BF4. Inicialmente, foram realizadas atividades de coleta de diversos dados na INB, que consistiram em pesquisas, compilações e organização de registros meteorológicos e medidas de vazão, além de outros trabalhos disponíveis. Esta etapa consistiu num verdadeiro processo de seleção de informações, uma vez que alguns destes registros se estendem desde o início das atividades da mina, em 1976.

O prosseguimento das atividades se deu a partir do estabelecimento de médias mensais das variáveis pertinentes ao ciclo hidrológico. Para algumas dessas variáveis, como no caso da evapotranspiração, foi necessário a adoção de um modelo matemático para a sua estimativa. O modelo escolhido, proposto por Penman, é um dos mais completos e prevê o conhecimento de fatores como insolação diária, velocidade dos ventos, posição geográfica, entre outros. Para determinação de todos estes parâmetros foram utilizados os dados de monitoração do Laboratório de Controle Ambiental da INB e outros gentilmente cedidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), através do seu 5º Distrito de Meteorologia (5º DISME).

Ao final, o balanço hídrico foi determinado e comparações e correlações com vazões e níveis de piezômetros foram estabelecidas, com o intuito de corroborar os resultados encontrados.

A expectativa com a conclusão deste trabalho é a de que ele possa indicar os principais contribuintes para a geração de DAM na área do BF4. Deste modo, ele poderá efetivamente fornecer subsídios técnicos para eventuais intervenções geotécnicas, tais como impermeabilização, contenção, filtros de areia, trincheiras etc, que visem a redução dos seus impactos ambientais e dos elevados custos operacionais para o seu tratamento.

Além do mais, uma grande quantidade de dados provenientes do monitoramento constante aplicado ao CIPC estava disponível, necessitando de compilação e

organização. Desta forma, o trabalho proposto não acarretaria em custos adicionais para a geração de dados e, ao mesmo tempo, promoveria o aproveitamento dos dados existentes. A geração destas preciosas informações envolveu grande esforço técnico e financeiro por parte do governo e não devem ser desprezadas.

Para relatar integralmente todo o estudo elaborado, a Dissertação foi estruturada em 7 capítulos.

O Capítulo 2 procura transcrever com maiores detalhes o problema da geração de drenagem ácida em mina (DAM). Nele são discutidos assuntos como a origem da DAM, as reações envolvidas no processo, a atuação microbiológica e outros fatores intervenientes. Ainda neste capítulo, aborda-se alguns dos problemas ambientais que normalmente estão relacionados à DAM e também técnicas de previsão, prevenção e tratamento conhecidas atualmente.

A Mina Osamu Utsumi é destacada no Capítulo 3, através dos aspectos de localização, de clima, de geologia, de hidrologia e do seu antigo processo de exploração mineral e produção industrial. Ênfase foi dada ao gerenciamento dos resíduos, sólidos (estéreis e rejeitos) e líquidos (efluentes ácidos), e aos custos envolvidos no tratamento da DAM na mina. Realizou-se também uma descrição maior das características do bota-fora BF4, destacando-se a sua mineralogia e o método utilizado para disposição dos seus resíduos.

O Capítulo 4 reúne uma explanação sobre os tópicos concernentes ao balanço hídrico. Faz-se uma descrição do ciclo hidrológico, sua representação sob a forma da equação do balanço hídrico, o detalhamento dos seus componentes, além de uma apresentação das características básicas de uma bacia hidrográfica.

O balanço hídrico na região do bota-fora BF4, especificamente, é o tema central do Capítulo 5. Nele são expostas as hipóteses e as formulações por ora adotadas no trabalho, a descrição do modelo matemático utilizado para a estimativa da evapotranspiração potencial e a delimitação da microbacia do BF4. A partir daí, é feito um relato completo dos procedimentos realizados para a obtenção das médias dos parâmetros e variáveis envolvidas no balanço hídrico.

Os resultados do balanço hídrico assim como as análises efetuadas em função das hipóteses adotadas são apresentadas no Capítulo 6, que também mostra as comparações realizadas destes resultados com os valores de vazão medidos *in loco*.

Adicionalmente, foram feitas correlações de precipitação com os valores de vazão e de piezometria, que auxiliaram as análises e conclusões do estudo.

Por fim, o Capítulo 7 procura reunir as conclusões que foram possíveis de se estabelecer através desta Dissertação, além de apresentar indícios técnicos para futuras incursões que visem minimizar os volumes de DAM gerados no BF4. O capítulo se encerra com as sugestões e recomendações para futuros trabalhos afins.

DRENAGEM ÁCIDA

2.1 – INTRODUÇÃO

O presente capítulo objetiva um reconhecimento dos principais fatores intervenientes na geração da drenagem ácida de mina. Justifica-se sua presença nesta Dissertação em função da não familiaridade que se supõe existir no meio geotécnico com relação a este assunto, de carácter bastante multidisciplinar, envolvendo conceitos geotécnicos, geológicos, químicos, biológicos e outros. Acrescenta-se que o conhecimento dos fatores anteriormente citados teve grande importância na definição da proposta desta Dissertação, bem como na formulação de sugestões integradas para o controle da drenagem ácida do bota-fora BF4, apresentadas no Capítulo 7.

Resultante do fenômeno da oxidação natural de minerais sulfetados, na presença de água e bactérias, o problema da drenagem ácida de mina (DAM) – do inglês *acid mine drainage (AMD)* – se caracteriza pela formação de ácido sulfúrico e elevadas concentrações de metais dissolvidos (Carvalho et al. 2000). Basicamente, o problema se inicia com a exposição ao oxigênio de grandes volumes de solo ou rocha que contenham esses minerais, onde se inicia sua oxidação. As reações, posteriormente catalisadas por bactérias, serão vistas com mais detalhes em itens posteriores.

Atividades de mineração podem constituir então um ambiente propício à formação de drenagem ácida, uma vez que requerem a remoção de grandes volumes de massa para a extração do mineral economicamente viável. Em locais onde nunca se realizou qualquer tipo de processo de mineração, ou seja, em ambientes naturais, a geração de drenagem ácida pode ser considerada desprezível, devido ao baixo contato dos minerais sulfetados com oxigênio (Sengupta, 1993).

O ácido sulfúrico produzido pelo fenômeno, responsável pelo rebaixamento do pH, solubiliza metais pesados como arsênio, cádmio, zinco, urânio e outros, eventualmente presentes nos depósitos de rocha e solo locais. Estes metais são então transportados pela drenagem e posteriormente podem atingir mananciais superficiais ou mesmo os lençóis subterrâneos (Carvalho et al. 2000). A Figura 2.1 retrata esquematicamente o processo de formação da drenagem ácida numa pilha de rejeitos de mineração.

Conseqüentemente, a geração de drenagem ácida representa hoje um sério problema ambiental em escala mundial, uma vez que o presente estado da tecnologia não prevê qualquer solução simples, barata e totalmente eficaz (EMCBC, 2001).

A degradação de córregos e lagos e a mortandade de peixes e outras espécies aquáticas são alguns dos principais impactos gerados pela drenagem ácida.

Com o endurecimento da legislação acerca da qualidade dos corpos hídricos, aliado à necessidade de manutenção da qualidade das águas e de prevenção ambiental para a sobrevivência do Homem, diversos países têm gastado grandes recursos no intuito de controlar e/ou minimizar a geração de ácidos nas áreas de mineração. O conhecimento dos potenciais de geração ácida passa a ser então de essencial importância quando do planejamento de novas minas e mesmo da operação e fechamento de minas em atividade. O efeito da não consideração da DAM nos projetos de gerenciamento de minas onde estejam presentes minerais sulfetados pode acarretar sérios danos de ordem ambiental e/ou enormes gastos com tratamento e remediação (EMCBC, 2001).

A redução de gastos e de danos ambientais devem constituir metas a serem incessantemente buscadas pela comunidade científica mundial. Para tanto, o profundo entendimento do processo de geração de drenagem ácida torna-se uma ferramenta vital para o controle e o gerenciamento da DAM. Com isso, questões como a geologia dos materiais minerados, a hidrologia local, a tecnologia empregada de disposição dos resíduos minerais e as reações químicas envolvidas devem constituir parâmetros a serem efetivamente estudados (Department of Environmental Protection – DEP, 1995).

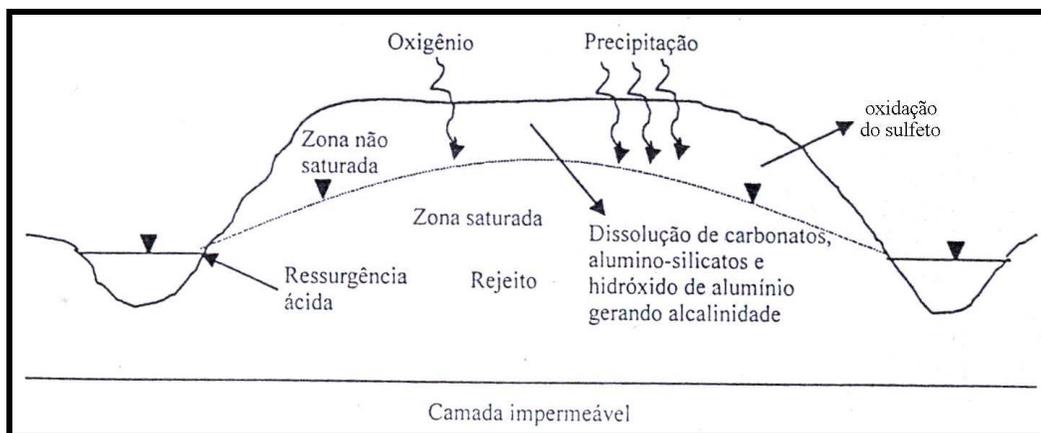


Figura 2. 1 – Processo de formação de drenagem ácida de mina em pilha de rejeito (Yanful e St-Arnaud, 1990, citado por Pastore e Miotto, 2000).

2.2 – TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

A mineração, como um conjunto de atividades dedicadas à exploração econômica de bens minerais, provoca grandes transformações no meio ambiente (Chamas, 1989). Os processos de extração e beneficiamento destes minerais acabam por gerar consideráveis volumes de resíduos que, além de serem economicamente inúteis, constituem um dos maiores problemas ambientais da atividade mineira, tanto quanto à sua disposição ou quanto à sua interação com o meio.

A tecnologia comumente empregada no processo de mineração considera como estéril o resíduo descartado ainda na fase de lavra e que é geralmente disposto em pilhas ou bota-foras. Os resíduos provenientes das atividades de beneficiamento mineral (rejeitos) podem ser classificados como rejeitos granulares ou finos, e têm como destino final as pilhas ou as barragens de rejeito (Chamas, 1989). O fluxograma básico de um processo de mineração típico é apresentado na Figura 2.2:

As pilhas de estéril podem ser executadas com ou sem controle. Quando controladas, são executadas de forma ascendente, segundo uma geometria estabelecida e levando-se em conta a estabilidade do maciço. Quando realizadas sem controle, são executadas em aterros de ponta tipo bota-fora, com o simples basculamento dos estéreis diretamente sobre a encosta a partir da cota mais elevada, sem preocupação com as condições de fundação.

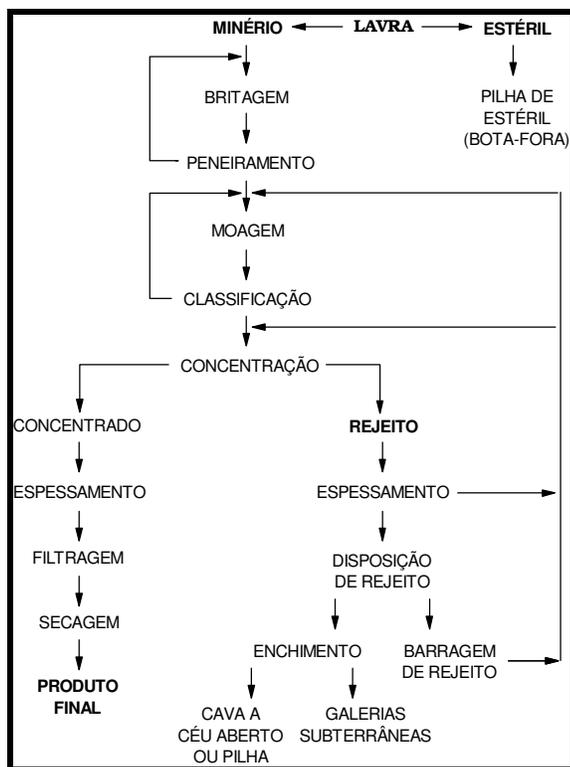


Figura 2. 2 – Fluxograma geral das atividades de uma indústria mineira (Luz, 1995).

Em qualquer destes modos, os materiais depositados apresentam grande variabilidade granulométrica e concentrações muito variáveis de minerais, constituindo assim um meio heterogêneo e muitas vezes anisotrópico. Devido à não uniformidade desses corpos de disposição e à possível presença de minerais sulfetados, condições propícias ao rápido surgimento da drenagem ácida podem ser verificadas, tais como grande difusão de oxigênio e alta permeabilidade. Conseqüentemente, previsões de geração de DAM e de qualidade da água drenada nesses locais constituem tarefas bastante laboriosas.

Os rejeitos oriundos do processo de beneficiamento mineral são comumente lançados em grandes reservatórios na forma de polpa e são contidos por diques ou barragens. Outra alternativa de disposição de rejeitos seriam as pilhas de contenção, que são menos utilizadas devido a limitações de ordem econômica, relacionadas à secagem do rejeito. Nestes dois modos de disposição, o material apresenta-se com granulometria e mineralogia mais uniformes devido aos processos industriais previamente utilizados. Outra característica marcante deste método de lançamento em grandes reservatórios é o

fato de o nível freático estar geralmente elevado durante o tempo de funcionamento da mina. Esta situação é alcançada por causa das condições úmidas em que o rejeito é lançado. Dessa forma, a geração de drenagem ácida é inibida, uma vez que a difusão de oxigênio em água é mais lenta que no ar. Entretanto, quando do encerramento das atividades da mina, o nível freático se rebaixa, periodicamente ou sazonalmente, aumentando-se assim as taxas de oxidação dos sulfetos metálicos.

2.3 – MINERAIS ENVOLVIDOS NA GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA

Embora qualquer depósito mineral que contenha enxofre (na forma de sulfetos) seja uma fonte potencial de DAM, certos tipos de minerais são mais propensos à geração que outros (Sullivan et al., 1995, citado por Gray, 1996).

Alguns dos mais importantes minerais sulfetados envolvidos no processo de formação da DAM estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1 – Principais minerais associados com a DAM.

Mineral	Composição Química
Arsenopirita	FeS ₂ .FeAs
Bornita	CuFeS ₄
Calcocita	Cu ₂ S
Calcopirita	CuFeS ₂
Covelita	CuS
Galena	PbS
Milerita	NiS
Molibidenita	MoS ₂
Pirita	FeS ₂
Marcasita	FeS ₂
Pirrotita	Fe ₁₁ S ₁₂
Esfalerita	ZnS

(Fonte: Ferguson and Erickson, 1988, citado por U.S. EPA, 1994)

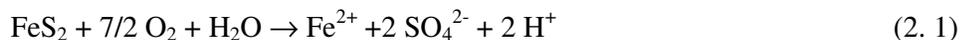
A pirita é o mais importante mineral associado com a geração de drenagem ácida e está relacionada com muitos metais de valor econômico, como o zinco, urânio, ouro, prata, etc. A quebra deste mineral é afetada por variações em sua morfologia, como grau

de cristalinidade, tamanho das partículas e reatividade (Riley 1960; Barnes e Romberger 1968, citado por Rodrigues, 2000). Neste sentido, minerais de granulometria maior são menos sujeitos ao intemperismo e oxidação porque possuem menores superfícies específicas. A marcasita e a pirita constituem as duas principais formas do dissulfeto de ferro (FeS_2), sendo polimorfos, isto é, embora tenham a mesma composição química, eles se diferenciam quanto à estrutura cristalina. Por causa disso, a pirita é mais estável que a marcasita (Evangelou, 1995). Tem-se então que a pirita framboidal, que apresenta granulometria mais fina, se oxidaria mais rapidamente que a pirita bem cristalizada (U.S. EPA, 1994).

2.4 – REAÇÕES DE GERAÇÃO DE DAM POR OXIDAÇÃO DA PIRITA

Segundo Fergusson e Erickson (1987), citado por Pastore e Miotto (2000), o fenômeno da geração de drenagem ácida pode ser descrito por quatro reações básicas que, por sua vez, estão agrupadas em três estágios (equações 2.1 a 2.4). Estas reações estão envolvidas na quebra da pirita que, na presença de água e oxigênio, produzem ácido sulfúrico. A Figura 2.3 mostra a relação geral entre as condições de pH e o tempo necessário para que se processem os estágios anteriormente referidos.

Estágios I e II:



Estágio III:



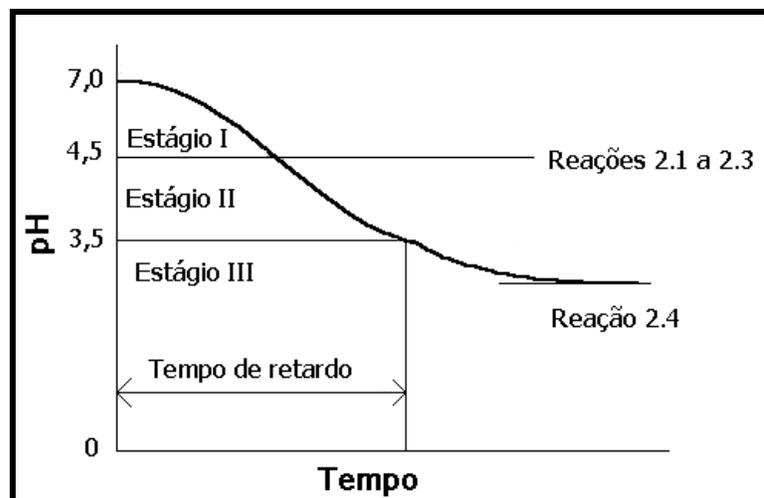


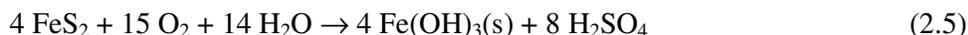
Figura 2.3 – Estágios de formação da drenagem ácida (Fergusson e Erickson, 1987, citado por Pastore e Miotto, 2000).

Conforme verificado na Figura 2.3, nos estágios I e II, as reações basicamente ocorrem em ambiente relativamente neutro (pH em torno de 4,5) e com velocidade bastante lenta. A primeira reação descreve a oxidação do sulfeto (pirita), gerando os produtos da dissociação do ácido sulfúrico e, conseqüentemente, elevando a acidez do meio. Esta redução dos valores de pH favorece as reações (2.2) e (2.3). A oxidação do íon Fe^{2+} a íon Fe^{3+} é apresentada na reação (2.2) e acontece em valores mais baixos de pH. Enquanto o pH permanecer próximo ou acima de 4,5, o íon férrico Fe^{3+} , produzido pela reação (2.2), se precipitará na forma de hidróxido de ferro, conforme a reação (2.3) (Pastore e Miotto, 2000). Outro fato característico do processo é que, para cada mol de pirita oxidada, cinco mols de prótons H^+ são liberados. Como um próton é consumido na oxidação da reação (2.2), somente quatro são efetivamente produzidos, contribuindo então com o rebaixamento do valor do pH (Evangelou, 1995).

O estágio III ocorre assim que o pH cai para valores menores que 3,5. Neste caso, o íon Fe^{3+} , ao invés de se precipitar, permanece em solução e oxida diretamente a pirita, como expresso na reação (2.4). Nela, mais íons sulfato e hidrogênio são gerados, contribuindo ainda mais para a redução do pH. Além disso, essas condições de baixo pH estimulam a reprodução de bactérias acidófilas que catalisam (aceleram) a transformação do Fe^{2+} a Fe^{3+} - reação (2.2). Com isso, fica estabelecido um ciclo bastante rápido entre as reações (2.2) e (2.4), que se processará até a degradação total da

pirita (Pastore e Mito, 2000). Ressalta-se o papel oxidante do Fe^{3+} , que sugere oxidação de pirita e geração de drenagem ácida mesmo na ausência de oxigênio.

A reação química global do processo de oxidação da pirita mais comumente aceita pode ser assim escrita:



Como indicado nas reações, a drenagem ácida ocorre na presença de água e oxigênio. Em camadas não perturbadas, ou seja, que não sofreram qualquer tipo de exposição ou manipulação pelo homem, a pirita pode permanecer em seu estado natural por grandes períodos (Gray 1996).

A formação de um composto sólido de hidróxido férrico que se precipita no fundo dos córregos e rios, próximos às zonas de DAM, e representada pela reação (2.3), pode servir como um indicativo da geração de acidez. O hidróxido férrico formado, de coloração amarela, alaranjada ou vermelha, é também conhecido como “yellow boy” (U.S. EPA 1994).

2.5 – REAÇÕES DE NEUTRALIZAÇÃO

A eventual existência de materiais neutralizadores no depósito de solo ou rocha pode inibir a geração de acidez pela liberação de alcalinidade. Isso ocorre quando o ácido reage com minerais carbonatados, como a calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (U.S. EPA 1994). Segundo Evangelou (1995), as reações de neutralização mais comuns são descritas pelas reações (2.6) e (2.7):



Conseqüentemente, com um valor de pH mais elevado, o íon férrico Fe^{3+} se precipitará na forma de hidróxido de ferro, conforme a reação (2.3) (Shackelford e Jefferis, 2000).

Em regiões onde o processo de laterização é predominante não é comum a presença de Ca^{+2} . Neste sentido, algumas configurações de disposição dos resíduos têm sido pensadas no intuito de se atingir a neutralidade dos valores de pH. Misturas de materiais, empilhamento com camadas alternadas, encapsulamento de materiais geradores são algumas das alternativas técnicas que podem ser utilizadas (U.S. EPA 1994).

2.6 – A ATUAÇÃO MICROBIOLÓGICA

A existência de bactérias no processo de oxidação da pirita foi descoberta em 1957. A presença delas pode aumentar ou diminuir a velocidade das reações de oxidação e, conseqüentemente, elevar ou reduzir a taxa de geração ácida (Sengupta 1993).

Algumas das principais bactérias envolvidas nas reações de oxidação, bem como as condições ambientais favoráveis à existência delas estão listadas na Tabela 2.2.

Segundo Sengupta (1993), nos casos em que a aceleração bacteriológica é significativa, existem alguns fatores adicionais que influenciam e determinam a atividade bacteriana e a taxa de geração ácida associada:

- Energia de ativação bacteriológica;
 - Densidade populacional bacteriana;
 - Taxa de crescimento populacional;
 - Concentração de nitrato;
 - Concentração de amônia;
 - Concentração de fósforo;
 - Teor de dióxido de carbono;
 - Concentrações de inibidores bacteriológicos.

Tabela 2.2 – Bactérias envolvidas na DAM e suas condições de proliferação.
(Fonte: Thompson 1988, citado por U.S. EPA 1994)

Microorganismo	pH	Temp, °C	Aeróbico	Nutrição
<i>Thiobacillus thioparus</i>	4,5-10	10-37	+	Autotrófica ¹
<i>T. ferrooxidans</i>	0,5-6,0	15-25	+	“
<i>T. thiooxidans</i>	0,5-6,0	10-37	+	“
<i>T. neapolitanus</i>	3,0-8,5	8-37	+	“
<i>T. denitrificans</i>	4,0-9,5	10-37	+/-	“
<i>T. novellus</i>	5,0-9,2	25-35	+	“
<i>T. intermedius</i>	1,9-7,0	25-35	+	“
<i>T. perometabolis</i>	2,8-6,8	25-35	+	“
<i>Sulfolobus acidocalderius</i>	2,0-5,0	55-85	+	“
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	5,0-9,0	10-45	-	Heterotrófica ²

A bactéria *Thiobacillus ferrooxidans* (TF) é o principal microorganismo de interesse no estudo do fenômeno da DAM. Estando em condições propícias, ela pode acelerar substancialmente a taxa de oxidação do S e do íon Fe^{2+} a íon Fe^{3+} , conforme a reação (2.2). Segundo Stumm e Morgan (1970), citado por Evangelou (1995), esta reação é considerada o principal passo da oxidação da pirita. Conseqüentemente, um aumento na geração da drenagem ácida pode se dar por um fator que varia de 5 até 20 quando da presença de bactérias (Sengupta 1993). Elas são inclusive capazes de se adaptarem, por mutação, à mudanças marcantes de habitat (Brierley, 1982, citado por Rodrigues, 2000). A Figura 2.4 apresenta as condições ambientais ideais para o aumento da atividade da TF. Segundo Evangelou (1995), geralmente apresentam as seguintes características:

- Sendo acidófilas, são mais ativas em pH na faixa de 3,0 (Figura 2.4 a);
- A faixa de temperatura de maior prosperidade é de 20 a 40 °C (Figura 2.4 b);
- Conseguem energia para se desenvolver da oxidação do Fe^{2+} e do S;
- Obtêm carbono autotroficamente do CO_2 da atmosfera (Figura 2.4 c).

¹ são os capazes de sintetizar os seus próprios alimentos (nutrição autotrófica). Essa síntese é feita através dos processos de fotossíntese e quimiossíntese.

² não sintetizam seu próprio alimento e dependem daqueles produzidos pelos seres autótrofos (n. heterotrófica)

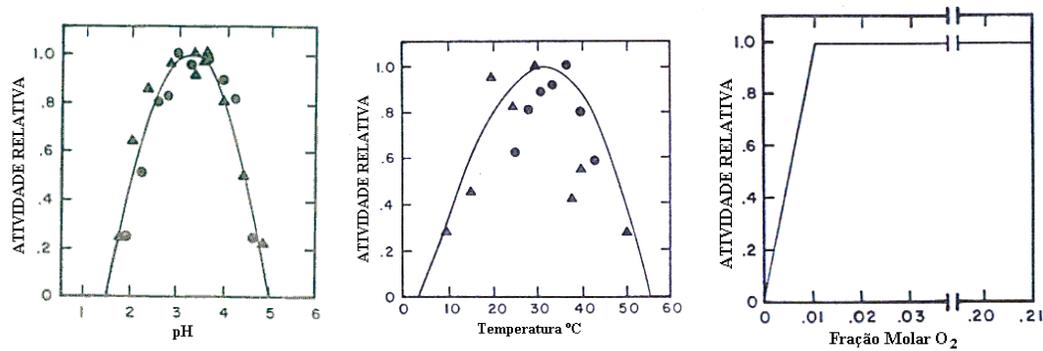


Figura 2.4 – Influência do pH, da temperatura e concentração de O₂, respectivamente, na atividade relativa da *T. ferrooxidans* (Jaynes et al., 1984, citado por Evangelou, 1995).

A TF pode atacar os minerais sulfetados de duas formas básicas: por ataque direto ou indireto. Na primeira forma, a bactéria utiliza enzimas para atacar os minerais oxidáveis através do contato físico entre ambos (Evangelou, 1995). Neste processo, a bactéria obtém energia da troca de elétrons entre o elemento oxidado (Fe²⁺ ou S) e o oxidante (O₂). Na verdade, os elétrons da oxidação são transportados através de proteínas na membrana das células. A transferência eletrônica fornece energia que é, então, associada à formação de trifosfato adenosina (ATP), responsável pela circulação de energia da célula. Na Segunda forma, o ataque ocorre não diretamente contra a estrutura atômica do mineral. A bactéria gera Fe⁺³ por solubilização oxidante do Fe²⁺ (reação 2.2). O Fe³⁺, como poderoso oxidante, reage com outros metais, tornando-se solúvel, e nesta reação o Fe²⁺ é novamente oxidado. Na solução ácida o Fe³⁺ é estável e sua lixiviação é lenta. Entretanto, a participação da TF pode acelerar o processo em mais de 1 milhão de vezes (Rodrigues 2001).

2.7 – LIXIVIAÇÃO DE METAIS PESADOS

O processo de oxidação dos minerais sulfetados ocasiona, por conseguinte, o rebaixamento dos valores de pH do meio. Nessas condições, metais pesados como o ferro, cobre, zinco, cádmio, manganês e outros, presentes nas rochas e/ou minerais, são solubilizados, conforme pode ser verificado na Figura 2.5. Valores de concentração destes metais bem acima dos normalmente aceitos pela legislação são comuns neste tipo de ambiente (Carvalho et al. 2000).

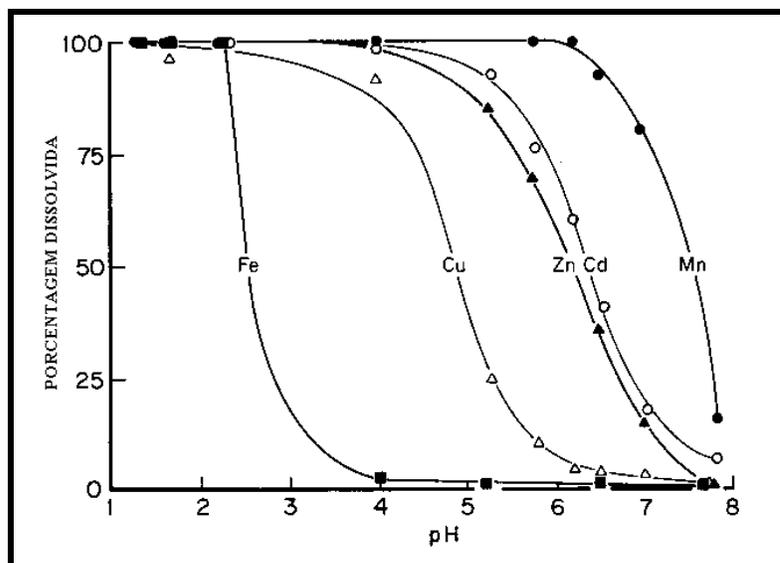


Figura 2.5 – Comportamento de alguns metais pesados em função do pH em Argo (American Water Resources Association, 1974, citado por Sengupta, 1993).

O fato se agrava à medida que ocorre a percolação de água pelo depósito mineral. Produtos da oxidação dos minerais sulfetados, os metais pesados são então lixiviados para outro local ou ambiente. Ao longo da trajetória deste fluxo, mais reações ocorrem até o ambiente receptor, influenciando ainda mais na qualidade da água drenada. Por sua vez, a qualidade desta água pode ser determinada por fatores como a natureza dos sulfetos, a disponibilidade e tipo dos constituintes solúveis, o regime hídrico, a natureza dos reagentes alcalinos e as propriedades físicas do resíduo (Sengupta 1993).

A solubilidade de metais e a mobilidade de contaminantes são afetadas por propriedades físicas, químicas e biológicas do depósito mineral. Fatores como pH do lixiviado, Eh, características de adsorção e a composição química do percolado influenciam na solubilização dos metais pesados.

A influência das propriedades físicas é notadamente marcante nos mecanismos de transporte de metais. Tamanho e forma das partículas dos minerais são características indispensáveis na determinação da superfície específica dos grãos e são essenciais na determinação da condutividade hidráulica. Algumas das mais importantes características destas propriedades incluem:

- Condições climáticas;
- Permeabilidade no depósito mineral;

- Disponibilidade hídrica;
- Poropressão;
- Mecanismos de movimento (advecção ou difusão).

As atividades biológicas podem tanto aumentar quanto atenuar a mobilidade dos metais. Onde bactérias oxidantes estão presentes com os sulfetos metálicos poderá ocorrer lixiviação. Porém, algumas espécies bacterianas possuem a capacidade de reduzir a mobilidade devido à absorção e precipitação dos metais (Sengupta, 1993).

2.8 – FATORES INTERVENIENTES

A taxa de geração ácida é geralmente aumentada quando processos de extração e beneficiamento são empregados em massas de solo ou rocha que contenham sulfetos metálicos. Este fato é verificado devido à elevação da área superficial mineral que fica exposta às reações químicas com o ar e a água (U.S. EPA, 1994).

Segundo Ferguson e Erickson (1988), citado por U.S. EPA (1994), existem três tipos de fatores que controlam a drenagem ácida: os fatores primários, que incluem o tipo do mineral sulfetado, a água, o oxigênio, o íon férrico, as bactérias e o calor gerado; os fatores secundários agem no sentido de neutralizar o ácido produzido ou de variar as características do efluente líquido, e os fatores terciários, que se referem ao método de disposição dos resíduos sulfetados de mineração.

Alguns minerais são mais susceptíveis à oxidação que outros. Conseqüentemente, a produção de ácido será tanto maior quanto maior for a afinidade à oxidação do mineral.

Fatores geológicos como estado de oxidação dos minerais, textura e desenvolvimento cristalográfico dos sulfetos, são primordiais para a determinação do potencial de geração (Sengupta 1993).

A água, como um fator primário, além de ser um dos reagentes das reações geradoras da drenagem ácida, constitui também um meio para reprodução bacteriológica. Além disso, representa o agente transportador dos produtos da oxidação no interior do depósito. Sua disponibilidade afeta diretamente a produção de ácido. Da

mesma forma, a disponibilidade de oxigênio é também significativa, pois ele é agente oxidante da pirita e atua na manutenção da rápida oxidação catalisada bacteriologicamente.

Pesquisadores têm confirmado que as reações de oxidação são exotérmicas e possuem potencial para gerar grandes quantidades de calor no depósito mineral. A dissipação deste calor ocorre basicamente por condução ou convecção. Estudos indicam que o fluxo de calor convectivo é motivado pela alta porosidade do material. Neste processo, o ar atmosférico retirado pelas células de convecção, formadas nos depósitos, continuariam a dirigir as reações de oxidação.

O conjunto dos fatores secundários inclui os minerais, geralmente carbonatados, que, se existentes no maço de rocha/solo, poderão liberar alcalinidade quando reagem com ácido produzido pelas reações de oxidação. Outra variante secundária seria a dissolução de outros minerais, ocasionada pela reação de produtos oriundos da oxidação dos sulfetos com outros constituintes não-neutralizadores, e que muito contribui para o aumento da carga de contaminantes na drenagem ácida (Ferguson e Erickson, 1988, citado por U.S. EPA, 1994).

O grupo dos fatores terciários é composto por aspectos como a ocorrência física dos minerais, o modo de disposição destes e o regime hidrológico. Características como tamanho das partículas, permeabilidade e intemperismo físico são importantes questões a serem levantadas numa avaliação de potencial de geração ácida. Um material de granulometria grosseira apresenta menor superfície específica, mas permite uma penetração mais profunda de ar e água para o interior do depósito. De modo geral, segundo Sengupta (1993), os componentes básicos que geralmente estão relacionados com a drenagem ácida são os seguintes:

Componentes que afetam a capacidade total de gerar ácido:

- Quantidade de minerais sulfetados presentes;
- Quantidade de minerais neutralizadores presentes;
- Quantidade e tipo de contaminantes potenciais presentes,

Componentes que afetam a taxa de geração de ácido:

- Tipo do mineral sulfetado presente;

- Tipo do mineral carbonatado presente;
- Área de superfície mineral disponível para reação;
- Ocorrência dos grãos minerais no depósito;
- Tamanho das partículas no depósito;
- Disponibilidade de água e oxigênio;
- Tipo e quantidade de bactérias.

2.9 – PREVISÃO DE DAM

A previsão da drenagem ácida é um assunto que tem despertado o interesse de diversos pesquisadores. Embora seja um problema que sofra influência de diversos fatores, a necessidade de seu pleno domínio é cada vez mais clara e justificável em virtude dos inúmeros danos que pode causar (Califórnia Mining Association, 1991, citado por US EPA, 1994).

O conceito da previsão de DAM vem se desenvolvendo por causa do espaço de tempo verificado entre o momento da disposição dos resíduos e o da constatação do problema da drenagem ácida. Outra variante seria a necessidade de obtenção de parâmetros concretos que possibilitem um planejamento adequado das atividades mineradoras.

Os ensaios para a previsão da drenagem ácida possuem basicamente dois objetivos: determinar se o resíduo mineral pode ser fonte geradora de ácido e também prever a qualidade do líquido drenado baseado na taxa de formação de ácido (Califórnia Mining Association, 1991, citado por US EPA, 1994).

Embora os fatores que controlam a oxidação da pirita no campo sejam bem entendidos, a quantificação de alguns deles pode ser difícil. Como visto anteriormente, a taxa de difusão de oxigênio, infiltração de água, temperatura, pH, presença de materiais alcalinos, heterogeneidade vertical e horizontal, e os modos de oxidação da pirita constituem fatores dignos de mensuração para a previsão e monitoramento da drenagem ácida (Evangelou, 1995).

Os testes analíticos são usados para avaliar o potencial de geração ácida do material. São geralmente classificados como estáticos ou cinéticos.

Os ensaios estáticos são mais rapidamente conduzidos e mais baratos, e determinam tanto o potencial de geração, quanto o de neutralização da amostra. A diferença entre estes dois valores resulta na capacidade de geração ácida da amostra. Este valor traduz somente o potencial de produção de ácido e não prevê a taxa real de geração. Por outro lado, os ensaios cinéticos tentam simular o que realmente acontece no campo. Geralmente necessitam maiores tempos de execução e por isso são mais caros. Idealmente, as informações obtidas de ambos ensaios devem ser coletadas e avaliadas para fornecer subsídios técnicos para as fases de viabilidade econômica, exploração e fechamento das minas.

2.10 – TÉCNICAS DE PREVENÇÃO E TRATAMENTO

Idealmente, a técnica de prevenção à drenagem ácida deve ser concebida e definida previamente ao início das operações de exploração de uma mina. Aliás, deve constituir um requisito integrante na definição do projeto desta mina, principalmente em minas que apresentem grandes massas de minerais sulfetados. Entretanto, devido ao desconhecimento geral em décadas passadas com relação à DAM, várias minas iniciaram suas atividades sem utilizar qualquer tecnologia de prevenção, como no caso da Mina Osamu Utsumi.

Segundo Shackelford e Jefferis (2000), as tecnologias atualmente empregadas na remediação de solos contaminados podem ser classificadas como de contenção passiva ou ativa, e como de tratamento passivo ou ativo. A utilização de determinada tecnologia dependerá da especificidade de cada caso e, sobretudo, dos custos envolvidos.

A técnica de contenção é utilizada para impedir o espalhamento do contaminante. Já o tratamento tem como principal função degradar a espécie contaminante à outra menos tóxica ou reduzir a concentração da mesma. A distinção entre os métodos passivo e ativo basicamente se restringe à utilização de energia contínua que é requerida pelo último para alcançar resultados satisfatórios. A Figura 2.6 ilustra a especificidade de cada um dos casos citados.

Tendo em vista que a geração de drenagem ácida é um fenômeno que pode se processar em dezenas, e até centenas de anos, o método que melhor se adequaria à

necessidade de remediação é o passivo, em virtude de sua economia de energia. No entanto, este último método nem sempre é eficaz, recorrendo-se a métodos ativos.

Com as tecnologias disponíveis atualmente, não é possível interromper definitivamente a geração da drenagem ácida, uma vez iniciado o processo. Dessa forma, a tecnologia a ser concebida deve tentar inibi-la na sua origem.

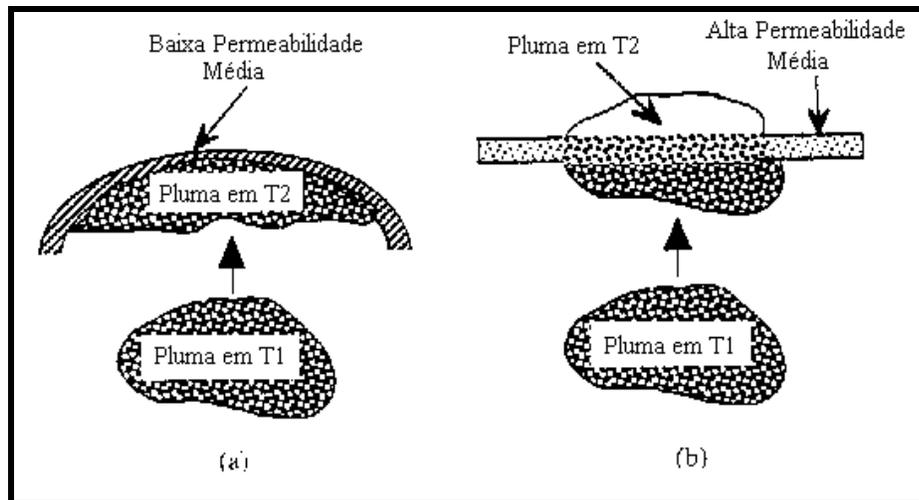


Figura 2. 6 – Exemplos esquemáticos de (a) contenção e (b) tratamento passivos (Shackelford e Jefferis, 2000).

A origem da drenagem ácida, como mencionado em itens anteriores, está na oxidação natural dos sulfetos metálicos presentes nos rejeitos de mineração, na presença de água e oxigênio. Com isso, espera-se que a tecnologia a ser empregada impeça o contato destes elementos com os minerais sulfetados.

Fatores baseados na química da água, na taxa de fluxo, na topografia local e nas características de campo também devem ser avaliados quando da seleção de métodos de tratamento e/ou remediação.

Diversos métodos vêm sendo utilizados com o intuito de resolver e/ou amenizar os problemas relacionados à geração ácida, dentre eles podem ser destacados:

- Segregação e mistura: a segregação envolve a remoção e a separação das várias unidades geológicas da mina. A execução desta operação pode prover benefícios com relação ao tratamento da DAM. O primeiro seria a redução do volume de resíduo a

merecer tratamento ou controle. O segundo, na existência de materiais neutralizadores, que poderiam ser misturados aos minerais geradores com o objetivo de controlar o pH.

Segundo Sengupta (1993), o sucesso na utilização desta técnica depende do conhecimento e do entendimento de alguns fatores como:

- fluxo hídrico através do sistema;
- a natureza do contato resíduo ácido/água com o resíduo consumidor/água;
- a proporção de excesso de minerais consumidores;
- tipo e reatividade dos minerais consumidores.

Os custos envolvidos para a utilização desta técnica são dependentes de fatores específicos da mina, do planejamento, do manuseio e transporte do material e da técnica de mistura (Sengupta, 1993). Alguns países têm adotado esta prática e vêm obtendo resultados satisfatórios, como em algumas minas de carvão nos Estados Unidos.

- **Bactericidas:** Como dito no item 2.5, a taxa de oxidação dos minerais sulfetados é aumentada quando estes estão em contato com certos tipos de bactérias, como a *Thiobacillus ferrooxidans*. O uso de bactericidas tem, portanto, o propósito de se criar um ambiente que não seja propício às necessidades e nem à reprodução das bactérias.

Embora seja verificada a redução das taxas de geração ácida com a utilização de bactericidas, a drenagem ácida não é eliminada. Por isso, bactericidas devem ser utilizados em conjunto com outras técnicas de proteção ambiental (Sengupta, 1993).

Entre os bactericidas mais usuais no tratamento da drenagem ácida, podem ser citados os compostos de benzoato, o sulfato lauril de sódio e os compostos fosfáticos. A aplicação deles é feita geralmente sobre a superfície, sendo necessário, freqüentemente, milhares de dólares por hectare. Devido à degradação natural do bactericida e à infiltração de água nos depósitos minerais, podem ser necessárias reaplicações periódicas, elevando assim o custo para o tratamento.

- **Aditivos básicos:** uma vez detectado o potencial gerador de ácido de um depósito mineral, uma possível técnica de controle deste potencial seria através da adição de material com capacidade de neutralização, como os carbonatos e compostos

hidróxidos. Calcário (CaCO_3), cal (Cal ou Ca(OH)_2) e hidróxido de sódio (NaOH) são alguns dos aditivos mais frequentemente utilizados. A utilização deles cumpre papel importante no controle do pH da água, e o sucesso desta aplicação depende basicamente dos mesmos fatores citados para a segregação e mistura.

- Coberturas e selagens: como mencionado no item 2.6, a água é uma das substâncias que, além de estar presente na formação de ácido, constitui um meio de transporte dos produtos da oxidação para o ambiente e de reprodução de bactérias. Por sua vez, o oxigênio, também envolvido nas reações de oxidação, é transportado através dos depósitos por processos de difusão molecular e/ou advecção. Com o objetivo de restringir o acesso desses elementos aos depósitos potencialmente geradores de ácido, as coberturas e selagens podem representar uma técnica bastante satisfatória no tratamento da DAM. Para tanto, devem apresentar baixa permeabilidade tanto à água quanto ao oxigênio.

Existem diversas alternativas de materiais para cobertura que podem ser utilizadas no controle da drenagem ácida, dentre os quais destacam-se as coberturas de solo (geralmente argilosa), as membranas sintéticas (PVC, polietileno), as mantas asfálticas e as coberturas de concreto. Cada uma dessas alternativas possui vantagens e desvantagens. A opção pela utilização de qualquer uma delas deve ser pautada por critérios técnicos e econômicos.

- Disposição subaquática: devido à baixa difusividade relativa do oxigênio em água, a oxidação de minerais reativos pode chegar a níveis negligenciáveis quando se utiliza a técnica de disposição subaquática. É considerado como um dos métodos mais seguros para o controle da drenagem ácida. Entretanto, existem limitações no emprego desta técnica como o alto custo de manutenção.

Dentre os modos mais comuns de disposição subaquática, cada qual possuindo suas especificidades e suas desvantagens, podem ser citados:

- Disposição em represas;
- Disposição em cavas de mina alagadas;
- Disposição em lagos;
- Disposição marinha.

- **Bombeamento e tratamento:** alternativa bastante comum em tratamento de drenagem ácida utilizado pelas mineradoras, o bombeamento e tratamento constitui uma metodologia classificada como de contenção ativa. Nela, um dique à jusante da pilha de estéril ou bota-fora é construído de modo a se formar uma bacia de contenção para o efluente líquido, geralmente com reduzidos valores de pH. Com o intuito de tratar e corrigir o pH, uma estação de bombeamento, instalada às margens da bacia, recalca o efluente ácido para uma estação de tratamento. Após o tratamento, o efluente líquido é então lançado para o ambiente. Este tipo de técnica é utilizada nos efluentes ácidos do bota-fora BF4.

Embora esta seja uma técnica relativamente simples de ser implantada, os custos de operação podem se tornar proibitivos. Isto se comprova numa análise de geração ácida de longo tempo, na qual os gastos com energia para o bombeamento e com compostos químicos para o tratamento são excessivamente altos.

- **Canais abertos de calcário:** são canais revestidos com calcário e construídos de acordo com a prática de engenharia padrão, empregando-se a equação de Manning. O escoamento através deste canal ocasiona a dissolução do calcário e, conseqüentemente, adiciona alcalinidade à água, elevando desse modo o pH. Trata-se da técnica mais simples de tratamento passivo. Entretanto, cuidados devem ser tomados quanto à quantidade de calcário para garantir o tratamento de longo tempo e quanto à manutenção de altas velocidades no canal para manter os precipitados em suspensão, reduzindo o encobrimento das partículas de calcário pelos mesmos.

- **Drenos de calcário anóxicos:** são drenos de calcário construídos subterraneamente para interceptar o fluxo subterrâneo e o contato com o oxigênio atmosférico (DEP, 1995). Como nos canais, a dissolução do calcário contribui para o aumento do pH pela adição de alcalinidade. Geralmente são projetados para um tempo de retenção de 14 a 15 horas e para produzir alcalinidade na faixa de 275 a 300 mg/l. Fatores como altas concentrações de íon férrico, oxigênio dissolvido e alumínio podem reduzir a eficácia e a longevidade destes drenos.

- Microencapsulamento: desenvolvida por Huang e Evangelou (1992, 1994), esta técnica consiste basicamente na lixiviação pelo depósito mineral de uma solução composta de H_2O_2 , KH_2PO_4 e um neutralizador de pH. Através deste procedimento, o H_2O_2 oxida a pirita, produzindo Fe^{+3} . Em seguida, o íon férrico reage com o íon fosfato (PO_4^{-3}) formando o fosfato férrico (FePO_4), que cobre a superfície mineral da pirita. Esta cobertura relativamente resistente, que envolve todo mineral, possui a capacidade de prevenir posteriores oxidações da pirita, estabilizando desse modo a geração de ácido.

Por ser uma técnica inovadora, mais estudos têm que ser desenvolvidos no tocante à sua eficácia a longo prazo. Além disso, o microencapsulamento pode se constituir numa solução altamente cara no controle da drenagem ácida.

A MINA OSAMU UTSUMI E O BOTA-FORA BF4

3.1 – LOCALIZAÇÃO

A mina de urânio do Planalto de Poços de Caldas, denominada “Osamu Utsumi”, teve as atividades de decapeamento iniciadas em 1977 no Complexo Mínero-Industrial do Planalto de Poços de Caldas – CIPC. Conforme pode ser visualizado nas Figuras 3.1 e 3.2, o CIPC está localizado no Campo do Cercado, no município de Caldas, região centro-sul do Planalto de Poços de Caldas, a sudoeste do estado de Minas Gerais. O planalto abrange parte dos municípios de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas da Prata, sendo a instalação da mina distante, no máximo, 30 km destes. Está ainda a 180 km ao norte da cidade de São Paulo, a 350 km de Belo Horizonte e a 360 km a noroeste do Rio de Janeiro (Wiikmann, 1998).

3.2 – FINALIDADE

Trinta anos após as primeiras pesquisas minerais, a mina Osamu Utsumi iniciou suas operações de lavra e beneficiamento do minério de urânio em 1982, sob a forma de diuranato de amônio (DUA – “yellow cake” – $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$), matéria prima para a produção do combustível das centrais nucleo-elétricas, constituindo a primeira etapa do ciclo do combustível nuclear (Prado, 1994).

Esta visão estratégica foi apontada pelos tecnocratas do regime militar como um passo importante dado rumo à independência do país na exploração comercial da energia nucleo-elétrica, pois garantia o suprimento de combustível ao reator de Angra I e a realização dos objetivos do Acordo Nuclear Brasil-Alemanha (Cipriani, 2002).

O complexo foi implantado e operado pela extinta Empresas Nucleares do Brasil S.A. – Nuclebras até 1988, quando passou a ser administrado pela Urânio do Brasil S.A. A partir de março de 1994, o CIPC passou a ser operado sob a administração da INB – Indústrias Nucleares do Brasil S. A., empresa responsável pelas atividades do ciclo do combustível nuclear no país (Wiikmann, 1998).

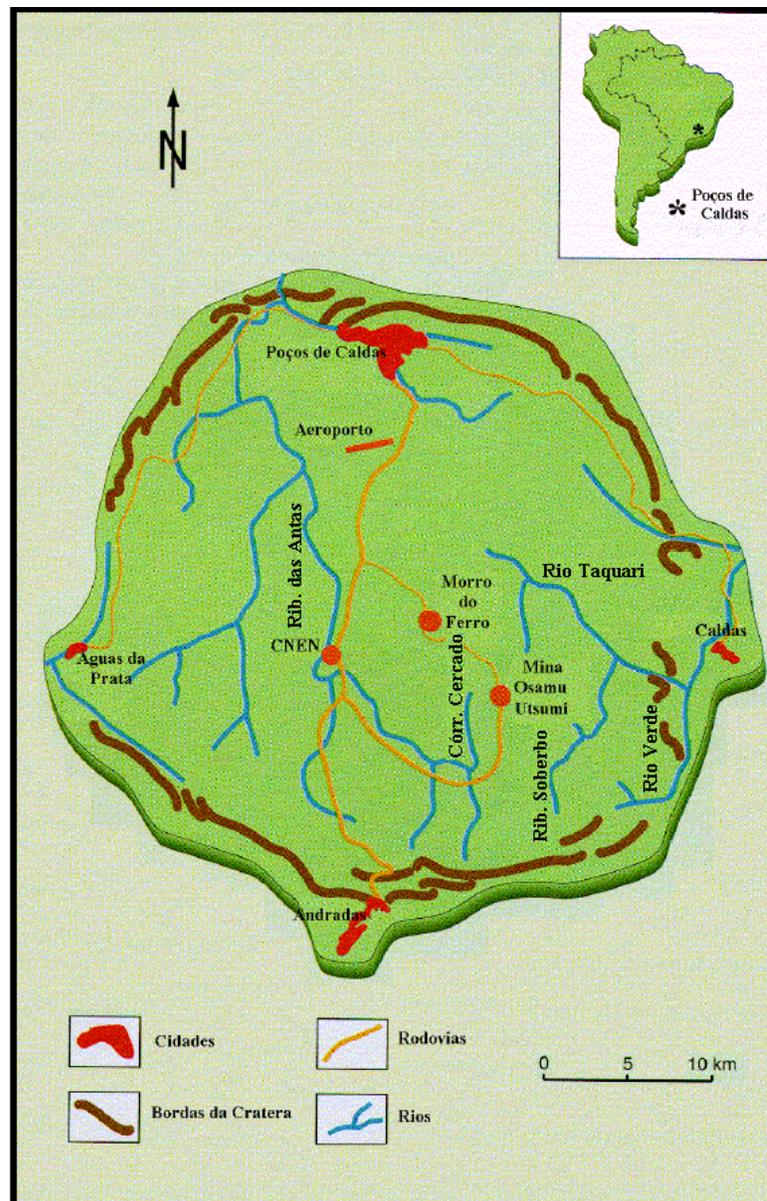


Figura 3. 1 – Localização regional da mina. Planalto de Poços de Caldas. (Fonte: Cipriani, 2002. Adaptado).

ejeção do magma em superfície (Teixeira, 2000). A caldeira ora referida possui aproximadamente 33 km de diâmetro, formando o chamado Planalto de Poços de Caldas.

A formação da caldeira está relacionada ao processo de fragmentação e deriva continental de idade Meozóica, onde a pressão vulcânica originou um processo de ascensão das rochas existentes à época, com posterior fragmentação da crosta, vulcanismo intenso e posterior intrusão dos diques anelares.

O referido planalto é constituído por um complexo de rochas alcalinas, destacando-se nefelina, sienitos, tinguaitos, fonólitos e foiaitos, estando estas rochas assentadas sobre embasamento Pré-Cambriano.

A mineralização dos corpos de minério na Mina Osamu Utsumi está associada a processos hidrotermais ocorridos em fase de reativação vulcânica. Na superfície da região da mina ocorrem materiais alterados, majoritariamente argilosos, cuja espessura varia de 15 a 100 m. Sotopostas ao manto de intemperismo são encontradas rochas efusivas (fonólitos) e intrusivas (tinguaítos e foiaitos). Essas rochas são afetadas por falhas e exibem intenso fraturamento, muitos sob a forma de brechas (FRASA, 1997).

A mineralização de urânio foi dividida em três corpos distintos, denominados operacionalmente como corpos A, B e E. A formação dos depósitos é relacionada à intrusão de um corpo sienítico (foiaito) intrusivo em rochas hospedeiras tinguaiticas. Esta intrusão foi seguida por processos de alteração hidrotermal sobre a litologia local, promovendo uma acentuada concentração de minérios metálicos (sulfetos), minerais de urânio e molibdênio, além de forte enriquecimento potássico. Estes processos resultaram em atividades explosivas que afetaram substancialmente as rochas hospedeiras, formando grandes pacotes de brechas de caráter essencialmente vulcânico (Cipriani, 2002).

O corpo A foi descrito como sendo estruturalmente constituído por uma brecha vulcânica, sendo seus elementos formados por fragmentos da rocha encaixante tinguaitica, com formatos normalmente angulosos. A matriz é constituída por massas tinguaiticas/fenolíticas, onde o feldspato potássico e a sericita são minerais dominantes. São comuns as impregnações de pirita, fluorita, minerais de urânio, molibdênio e zircônio. O teor médio no corpo era de 600 ppm de U (Cipriani, 2002).

Com a mineralização atingindo uma profundidade de 370 m, o corpo B corresponde a um depósito de piroclásticos limitado em sua parte inferior por uma intrusão foiaítica. Possui em sua litologia fonólitos, fonólitos porfíricos, pseudoleucita-fonólito, tufos, brechas tufissíticas, cinzas e rochas ultrabásicas, que aparecem sob a forma de diques cortando o corpo. A mineralização é composta de óxidos negros de urânio associados a fluorita, pirita e minerais de molibdênio. Na parte superior, ela está geneticamente relacionada à superposição de fenômenos hidrotermais, meteóricos e tectônicos, e se apresenta uma distribuição subhorizontalizada. Já na parte inferior, a mineralização é primária, oriunda de soluções hidrotermais que migraram a partir da intrusão foiaítica. Completando o quadro de mineralização do corpo, que apresentava teor médio de 680 ppm de U, aparecem pipes de brechas mineralizadas, cortando não só os piroclásticos como também a intrusão foiaítica da base (Fraenkel et al., 2000).

Possuindo teor médio de 1.000 ppm de U, o corpo E também apresentava mineralização relacionada à superposição de fenômenos hidrotermais, meteóricos e tectônicos, sendo sua distribuição ocorrendo de forma subhorizontal. Na sua parte superior, a mineralização ocorre sob a forma de pequenas concentrações de baixo teor, sendo formado em ambiente oxidante no qual o urânio foi fixado por absorção nas argilas e nos óxidos de ferro. Na parte inferior a mineralização ocorre em toda a extensão sob a forma de manchas negras de óxidos de urânio. Em zonas mais fortemente tectonizadas, aparecem concentrações mais expressivas que se prolongam no sentido do mergulho das fraturas e falhas. Por fim, ocorre a mineralização secundária ligada diretamente ao tectonismo, onde o urânio se apresenta sob a forma de uraninita maciça, associada às argilas que preenchem os fraturamentos. Ocorrem, ainda, pirita e zirconita associadas (Fraenkel et al., 2000).

Finalizando-se, é interessante ressaltar a complexidade geológica regional, demonstrada pela grande variação litológica, pelas inúmeras estruturas existentes (falhas, fraturamento, brechas etc) e pelos incontáveis processos vulcânicos e geoquímicos que se sucederam antes, durante e posteriormente à formação da caldeira. Esta complexidade foi objeto de grande quantidade de estudos em âmbito internacional e foi a principal responsável pela diminuição do tempo de vida esperado para a referida mina.

3.4 – ASPECTOS FÍSICOS, CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS

Ocupando uma área de aproximadamente 15 km², o CIPC encontra-se numa região cuja altitude varia entre 1300 e 1600 m acima do nível do mar. O clima predominante é o tropical de altitude, possuindo duas estações bem definidas e distintas. A primeira, entre os meses de outubro e março, é caracterizada por intensa pluviometria e temperaturas amenas. A outra, entre os meses de abril a setembro, é marcada por forte estiagem e baixas temperaturas relativas. A precipitação anual média é de 1700 mm sendo que, aproximadamente, 82% deste total ocorre durante a primeira estação. A umidade relativa média é de 78,2% e a média anual das temperaturas mínima e máxima é de 7,5 °C e 25,9 °C, respectivamente. A direção preferencial dos ventos é NESW, com uma velocidade média anual de 1,8 m/s.

A vegetação natural da região é basicamente formada por cerrado e gramíneas rústicas nas colinas e áreas planas e por matas disseminadas em pequenas manchas ao longo das vertentes dos rios e encostas das montanhas (Nuclebras, 1977, citado por Prado, 1994).

Como pode ser visualizado na Figura 3.1, o CIPC situa-se no divisor de águas de duas bacias hidrográficas: a bacia do ribeirão das Antas e a bacia do rio Verde, responsáveis por cerca de 70 e 20% da drenagem da região, respectivamente.

Especificamente na área de instalação do CIPC, a drenagem se processa através do córrego do Cercado e do ribeirão Soberbo e seu afluente, o córrego da Consulta. O córrego do Cercado, afluente da margem direita do ribeirão das Antas, deságua no reservatório formado pela barragem que foi construída para suprimento de água do CIPC. Este reservatório recebe também a contribuição de outros córregos: Pitangueiras, Cachoeirinha e Aterrado. O ribeirão das Antas flui, então, das águas do reservatório, sendo sua água intensamente utilizada em atividades agrícolas nos 10 km iniciais. Já o ribeirão Soberbo deságua no rio Taquari, que é afluente do rio Verde. Suas águas são usadas principalmente para irrigação agrícola e dessedentação bovina, não sendo observado, porém, qualquer uso doméstico delas num raio de 20 km.

3.5 – HISTÓRICO DA MINA OSAMU UTSUMI

Inicialmente, na década de 40, o interesse por minerais radioativos estava relacionado ao desenvolvimento bélico. Com este enfoque, a ocorrência de urânio no Planalto de Poços de Caldas foi descoberta em 1948 por técnicos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), que evidenciaram a presença de elementos radioativos nos minerais de zircônio.

Na década de 50, devido aos grandes esforços realizados nos EUA para adaptar a energia nuclear para fins pacíficos e a percepção do papel motor do setor energético no processo de desenvolvimento econômico, a geração nucleoe elétrica se apresentou como uma alternativa tecnológica de geração de energia elétrica de baixo custo e grande capacidade de atendimento à demanda (Prado, 1994).

No início da década de 60, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), juntamente com a Eletrobrás, começou a analisar as vantagens da geração nucleoe elétrica, com vistas à necessidade do aumento da geração elétrica frente à crescente demanda ocasionada pelo desenvolvimento econômico. Neste contexto, os primeiros trabalhos de prospecção e investigação geológica no Brasil tiveram início no ano de 1964.

Na década de 70, diante de um grave cenário econômico mundial gerado pela crise do petróleo, o governo brasileiro se viu obrigado a reavaliar o cenário energético nacional. Nesta avaliação, chegou-se à conclusão que os recursos hídricos da região sudeste, consumidora de aproximadamente 80% da energia elétrica nacional, seriam insuficientes para atender ao aumento da demanda de energia. Devido a este fato, e com a decisão de expandir a geração nucleoe elétrica, foi desenvolvido o Programa Nuclear Brasileiro, que contou com a construção de duas centrais (Angra I e II) e com a criação da Nuclebras (Prado, 1994). Durante este período, os trabalhos de prospecção e pesquisa foram intensificados e, em 1970, foi descoberta a jazida de urânio do Campo do Cercado. A partir de 1971, estes trabalhos foram concentrados na área da atual mina e envolveram a realização de 14000 m de sondagens e 2500 m de galerias de pesquisa, que conduziram à opção por mineração a céu aberto (Souza, 1995).

Em 1977 tiveram início as operações de lavra, com a decapagem da mina e a remoção de 5 milhões m³ de material. Em setembro de 1979 tiveram início as obras civis e a montagem da instalação, que começou a operar comercialmente em fevereiro de 1982.

A partir de 1983, foram reduzidos os investimentos da Nuclebrás e, conseqüentemente, o ritmo de produção do CIPC. Em 1988, a Nuclebrás foi extinta, sendo criadas as Indústrias Nucleares Brasileiras S. A. (INB), responsável pelas atividades do Ciclo do Combustível Nuclear (com controle acionário da CNEN), e a Urânio do Brasil S. A., subsidiária da INB, responsável pela produção de concentrado de urânio (Pereira, 1990, citado por Prado, 1994).

As restrições financeiras sofridas pelo CIPC, a crise econômica brasileira configurada na década de 80 e as incertezas do programa nuclear brasileiro resultaram na paralisação das operações do CIPC no final do ano de 1988. O investimento feito foi de U\$ 300 milhões, sendo que até 1988 a produção de concentrado de urânio foi de 957 toneladas (119,6 tU/ano), inferior à capacidade nominal da usina (500 tU/ano) (Prado, 1994).

Inicialmente prevista para produzir 425 tU/ano durante 10 anos, a instalação funcionou de modo descontínuo devido a uma série de dificuldades atribuídas ao pouco conhecimento do minério e, em outubro de 1995, houve a paralisação definitiva das atividades de lavra. Em dezembro do mesmo ano foram paralisadas as atividades de tratamento químico de minério de urânio, tendo-se obtido uma produção total de 1030 tU (Cipriani, 2002).

A partir de então, visando o aproveitamento das instalações do CIPC, a INB vem buscando obter o licenciamento para produção de terras raras a partir da monazita, usando ácido sulfúrico. Contudo, o IBAMA condicionou o licenciamento destas novas atividades industriais ao início da remediação das áreas da mina, bota-foras e usina do CIPC e a CNEN exigiu a construção de novo sistema de gerenciamento de rejeitos como condicionante para a licença de novas atividades no local e cujo processo de licenciamento foi iniciado em 2002 (Cipriani, 2002).

3.6 – GERENCIAMENTO DO PROCESSO MINERÁRIO

Segundo Prado (1994), a área do CIPC é de aproximadamente 1000 ha (10 km²), compreendendo as unidades descritas abaixo, mostradas na Figura 3.3.

- mina;
- beneficiamento físico do minério;
- pátio de estocagem do minério;
- usina de beneficiamento químico;
- tratamento de águas da cava da mina;
- tratamento de rejeitos sólidos e líquidos do processo de beneficiamento;
- barragem de rejeitos;
- estocagem de insumos;
- tratamento de água potável e água de processo;
- fábrica de ácido sulfúrico;
- barragem de captação de águas;
- bota-foras.

A produção do concentrado de urânio (DUA) consistia, basicamente, em duas etapas principais: a lavra e o beneficiamento do minério.

A lavra foi realizada sobre a jazida do Cercado, que apresentava os três corpos mineralizados A, B e E. A exploração desta jazida culminou numa cava de forma aproximadamente circular, de diâmetro e profundidade com cerca de 1200 e 176 m respectivamente. O material oriundo da decapagem da mina (1ª fase de lavra), caracterizado como estéril, era encaminhado aos locais definidos como bota-foras. O minério lavrado (2ª fase) era dirigido ao pátio de alimentação do britador primário, onde o processo de beneficiamento se iniciava. Posteriormente o minério era submetido a tratamentos físicos e químicos para a concentração de urânio.

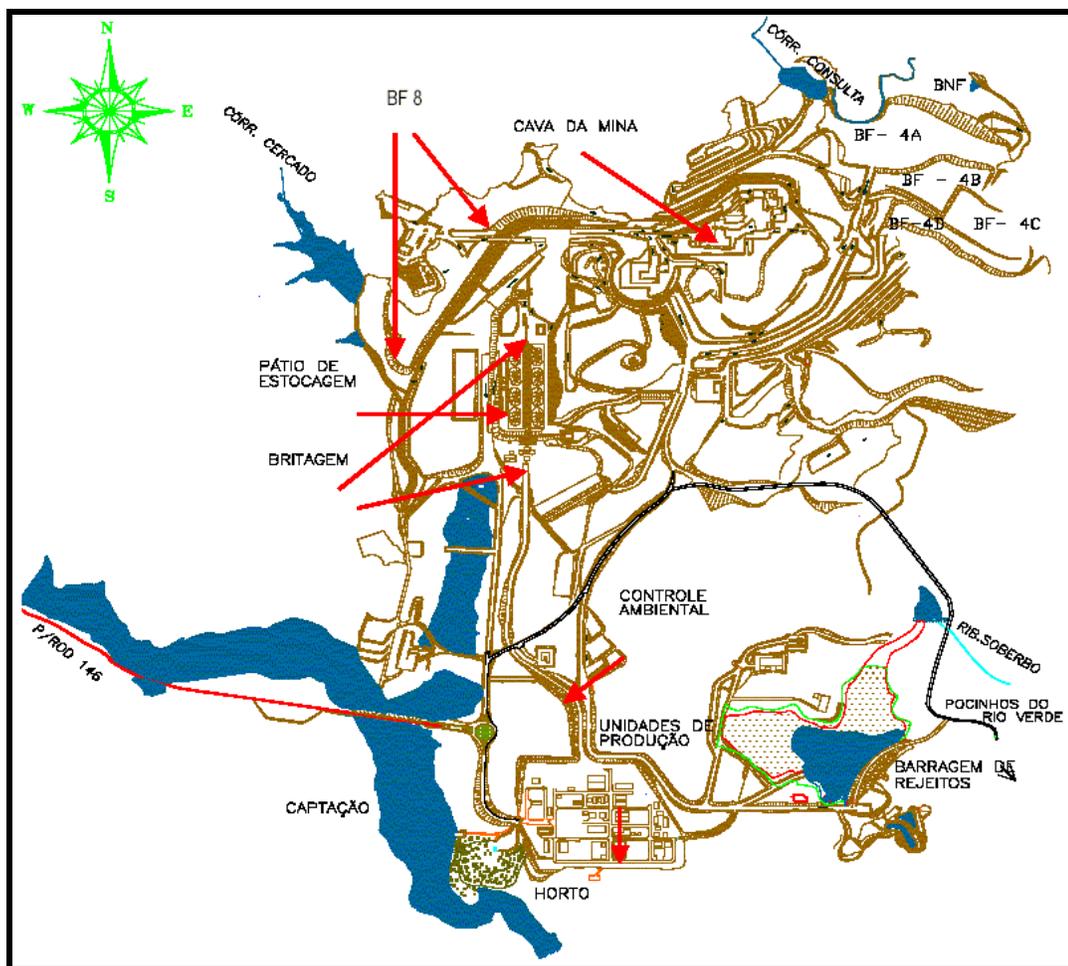


Figura 3. 3 – Arranjo Físico do CIPC no Planalto de Poços de Caldas (Fonte: INB, citado por Cipriani, 2002).

3.7 – PRODUÇÃO DE MINÉRIOS E RESÍDUOS

Como mencionado no item 3.5, a usina do CIPC foi projetada para tratar 2500 t/dia de minério, o que totalizaria cerca de 700 mil t/ano, admitindo-se o ano com 280 dias. O minério, inicialmente previsto com teor de urânio solúvel equivalente a 680 ppm de U, produziria 650 t/ano de diuranato de amônio (DUA), equivalente a aproximadamente 425 tU/ano (Cipriani, 2002).

A lavra, projetada para atender a demanda diária da usina, foi iniciada a céu aberto em 1977, com a decapagem da mina. Esta operação gerou, entre 1977 e 1980, um montante de 33,7 milhões m³ de estéril. Na mina, previu-se, inicialmente, escavações da

ordem de 85 milhões m³ para produzir 5100 tU. Numa reavaliação da jazida, em 1983, o projeto de lavra foi redefinido, prevendo-se uma redução da escavação para aproximadamente 58 milhões m³. O teor de corte da mina foi definido em 170 ppm de urânio solúvel na usina e todo material lavrado com teor inferior a isso era considerado como estéril, vindo a se constituir no rejeito sólido da mina (Cipriani, 2002).

A Tabela 3.1 apresenta as quantidades de minério, bota-fora e rejeitos produzidos em quase 20 anos de operação do CIPC.

Tabela 3. 1 – Produção Mineira do CIPC até 1997.

Ano	Massa de Minério (t)	Volume de Bota-fora (m ³)	Massa de Bota-fora (t)	Massa de Minério Tratado na Usina (t)	Massa de Rejeitos Sólidos da Usina (t)
1977 a 1980	0	33.736.400	80.966.400	0	0
1981	148.697	398.984	957.562	0	0
1982	409.952	3.669.332	8.806.397	401.126	486.500
1983	388.840	2.726.104	6.542.650	358.541	405.151
1984	274.329	1.164.593	2.795.023	287.558	324.940
1985	287.536	1.152.196	2.765.270	237.429	268.295
1986	56.933	277.914	666.994	97.420	110.084
1987	286.147	694.572	1.666.973	270.769	305.968
1988	111.632	460.196	1.104.470	46.309	52.329
1989 a 1992	0	0	0	67.019	75.730
1993	93.128	168.843	405.223	53.479	60.432
1994	169.906	386.377	927.305	138.552	156.564
1995	89.427	242.416	559.981	131.495	148.588
1996	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	1.100	1240
Total	2.316.527	45.077.300	108.000.000	2.090.798	2.395.820

(Fonte: INB, citado por Cipriani, 2002)

Através dos dados apresentados, pode-se perceber que a usina operou durante 11 anos, descontando-se o período inativo compreendido entre 1989 e 1992. Durante o período de operação, foram tratados aproximadamente 2,09 milhões t de minério (• 190 t/ano), gerando um total de 1030 tU.

Considerando-se o volume total de minério tratado e que a usina foi projetada para processar 700 mil t/ano, pode-se dizer que o tempo efetivo de operação da usina foi de, aproximadamente, 3 anos. Este valor revela que a usina ficou parada em torno de 73% do tempo de operação da mina, caracterizando a operação como bastante irregular. Consequentemente, a produção anual real foi estimada em 343 tU/ano (Cipriani, 2002).

A baixa produção do empreendimento se deveu, entre outros fatores, ao pouco conhecimento do minério na época do empreendimento. De acordo com o conceito de urânio solúvel, somente seria alimentado na usina minério que apresentasse uma solubilidade de urânio superior a 170 ppm de U, teor mínimo calculado com base numa avaliação econômica do processo. Este conceito foi desenvolvido após o início da operação porque grande parte do urânio dos corpos A e B estava no retículo cristalino do mineral de zircônio e não era acessível ao ácido usado para sua solubilização. Isto levou a descartar para os bota-foras e a bacia rejeitos quantidades maiores que as previstas no projeto. Na prática, significou processar um minério com teor menor que o previsto (Cipriani, 2002).

O gerenciamento dos resíduos do CIPC é mostrado no fluxograma da Figura 3.4. Este gerenciamento tem como um dos objetivos monitorar o comportamento dos bota-foras através das águas de surgências nas suas bases, mantendo os níveis dos potenciais poluentes hídricos, constituídos de elementos estáveis e radioativos, dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores (Souza, 1995). Os itens seguintes relatam com maiores detalhes os aspectos referentes ao gerenciamento do bota-fora BF4 especificamente, além de descrever outras características deste depósito de estéreis.

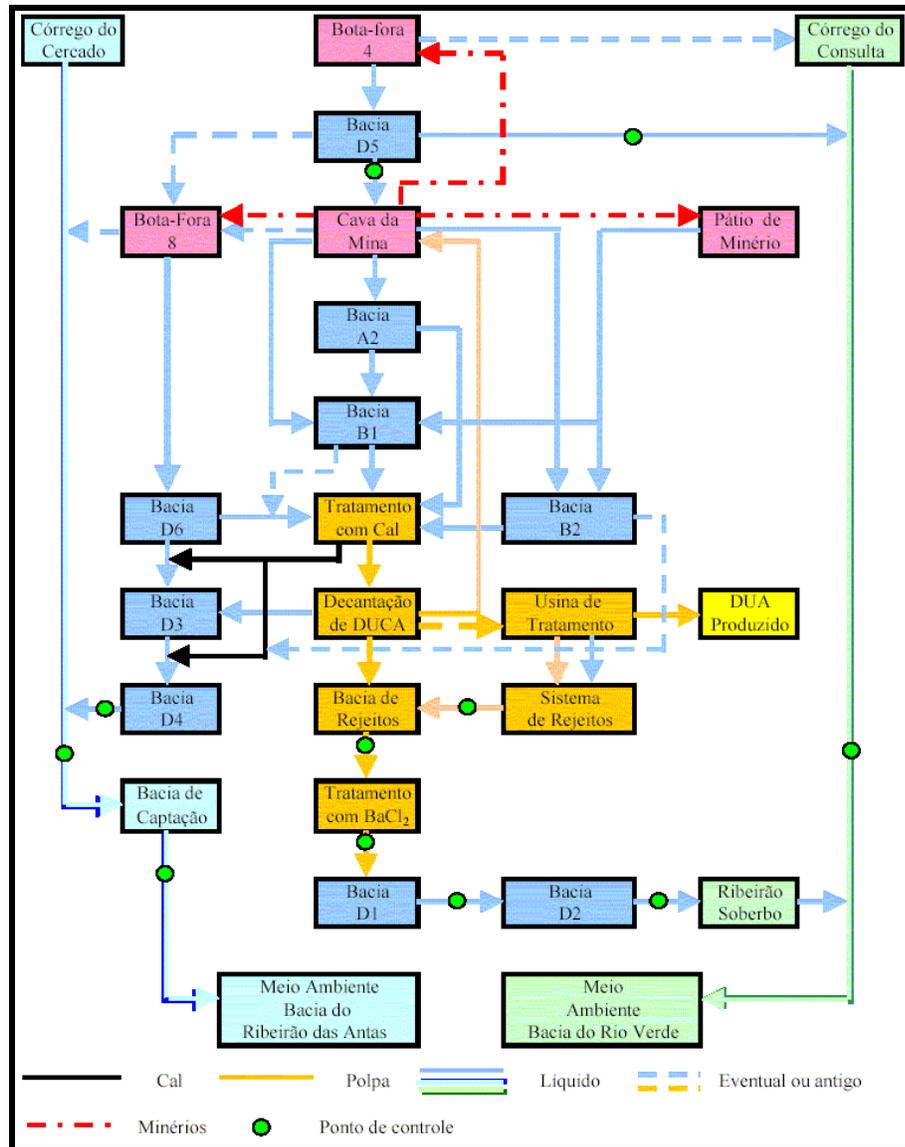


Figura 3.4 – Fluxograma do gerenciamento dos rejeitos líquidos e sólidos no CIPC (Fonte: Cipriani, 2002).

3.8 – O BOTA-FORA BF4

Com área superficial de 569 mil m^2 , volume de 12,4 milhões m^3 , altura de talude de 90 m e inclinação de 70° , o bota-fora BF4 (Figura 3.5) foi executado sobre uma vertente do córrego da Consulta, pertencente à bacia do rio Verde. Esta configuração do depósito favorece a drenagem ácida por um único ponto bem definido, localizado em

sua base, reduzindo consideravelmente os parâmetros de controle e monitoração para o seu estudo (Wiikmann, 1998).



Figura 3. 5 – Vista parcial do talude principal do bota-fora BF4. Na base deste talude encontra-se o dreno principal e a lagoa de contenção de drenagem ácida (BNF).

Quanto ao terreno original, sobre o qual o BF4 foi depositado, nos levantamentos de campo executados não foram observados quaisquer indícios de feições geológico-geotécnicas insatisfatórias que viessem a promover instabilidades e rupturas do aterro; o vale é constituído exclusivamente por uma superfície contínua de solo de alteração (saprólito) de rochas alcalinas, de elevada rigidez, chegando a exibir resistência de rocha branda. Geralmente, capeando essa superfície, existe uma camada quase contínua, com espessura aproximada de 30 cm, de cascalho limonítico com argila e areia, com diâmetro variando de 3 a 10 cm. O vale apresentou cascalheiras e mesmo afloramentos de rocha sã. O levantamento hidrológico do local constatou as vazões máximas do córrego da Consulta e seus tributários em 31,5 e 11,1 l/s, respectivamente (Wiikmann, 1998).

Antes da construção do BF4, houve uma preparação do fundo dos vales para receber a pilha de estéril. Esta preparação se deu pela construção de drenos profundos, usando matacões de rochas estéreis, recobertas com material de granulometria mais fina (IPT, 1978, citado por Rodrigues, 2001).

Também como preparação do terreno, foi executado um desvio no córrego da Consulta, lançando suas águas num ponto à jusante em relação ao bota-fora. Este desvio, de cerca de 500 m, teve como objetivo reforçar a estabilidade física do depósito e reduzir as alterações das águas do córrego. A fim de evitar a percolação de águas pluviais através da massa de rejeitos e o conseqüente aumento das águas de drenagem contaminadas, foi realizada sobre a superfície do canal uma cobertura com uma camada, de 20 a 30 cm de espessura, de argila compactada (Wiikmann, 1998).

Depositados pelo método de avanço por ponta de aterro, os estéreis encaminhados ao BF4 eram, em quase sua totalidade, oriundos da triagem da lavra do corpo B. A mineralogia do material mostra que a matriz é constituída por massas tinguáiticas/fenolíticas, onde o feldspato potássico e a sericita são minerais dominantes. Por sua vez, estes são constantemente impregnados por produtos hidrotermais, tais como pirita, fluorita, minerais de urânio, molibdênio e zircônio (Cipriani, 2002). Nos níveis superficiais expostos às intempéries é visível o processo de laterização, gerando materiais ricos em alumínio (argilas caulínicas, gibsita, óxidos de ferro e outros).

Análises de relatórios técnicos da INB não especificam a quantidade de pirita, porém mostram a existência de minerais opacos em quantidades de 2 a 15% nas rochas do corpo B, conforme mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 – Composição mineralógica (média de porcentagem) de algumas rochas encontradas no corpo B.

		nome da rocha		
		fonolito	nefelina sienito	brecha tectônica
mineralogia	feldspato alcalino	55-60	55-60	55-60
	sericita	25-30	25-30	15-20
	minerais opacos	5-10	2-5	10-15
	minerais argilosos	2-5	2-5	5-10

3.9 – DRENAGEM ÁCIDA E CUSTOS ENVOLVIDOS

No início da operação o rejeito líquido da mina era transferido por bombeamento até um canal construído no BF8 e através desse era lançado no córrego do Cercado, sem nenhum tratamento. As drenagens ácidas do bota-fora eram misturadas com água da mina. A drenagem ácida do BF4 era lançada no córrego do Consulta (Cipriani, 2002).

No decorrer da monitoração, foi percebido um aumento significativo no teor de urânio e de elementos estáveis devido à água de drenagem nas bases dos depósitos que se juntavam aos córregos. Este fato era observado tanto nos bota-foras, quanto no interior da cava da mina.

Quando o problema da drenagem ácida foi constatado, a CNEN exigiu a construção de bacias de captação das águas da mina e dos bota-foras, além do tratamento de todo volume lançado no ambiente. Este procedimento visava a neutralização da acidez, a precipitação dos radionuclídeos e metais pesados e a decantação dos sólidos em suspensão (Cipriani, 2002).

A Tabela 3.3 apresenta alguns parâmetros sobre o estudo da qualidade das águas de drenagem do bota-fora BF4, obtidos nos trabalhos de Fernandes e Franklin (2000) e Souza et al. (1995). Esta tabela apresenta também os valores de referência destes parâmetros segundo a Portaria n.º 518/04 do Ministério da Saúde (padrão de potabilidade) e a Resolução n.º 357/05 do CONAMA (critérios de classificação de uso). A comparação destes valores revelam concentrações na água de drenagem do BF4 bem superiores aos valores máximos permitidos pela legislação vigente.

Tabela 3.3 – Concentrações observadas nas águas do BF4 e as concentrações máximas permitidas segundo a Portaria n.º 518/04 e a Resolução n.º 357/05.

Espécie química	Conc. observada no BF4 (mg/l)	Portaria n.º 518/04 (mg/l)	Resolução n.º 357/05 (mg/l) ¹
Al	118	0,2	0,2
SO ₄	1010	250	250
Mn	100	0,1	0,5
F	100	1,5	1,4
pH	3,3	6 a 9,5	6 a 9

¹ - valores estabelecidos para águas de classe 3.

No caso do BF4, a construção da bacia D5, também denominada BNF (Figura 3.6), foi realizada somente em 1989. Desde então as águas retidas por este barramento passaram a ser bombeadas para a cava da mina (Figura 3.7). Neste local, outro conjunto moto-bomba transfere as águas de drenagem ácidas para a Estação de Tratamento de Águas Marginais (área 440 da mina), onde são feitas as correções necessárias de pH (elevação para pH = 10) com a adição de cal hidratada. Ainda na estação de tratamento, é adicionada ao efluente líquido um floculante, que visa auxiliar a etapa de separação sólido-líquido. Após esta etapa, o efluente é lançado nas bacias D3 e D4 para a decantação dos metais pesados e do sulfato de cálcio e, posteriormente, eflui para o córrego do Cercado (Cipriani, 2002).

O tratamento das águas de drenagem do bota-fora BF4 resultou em um aumento de 60 a 80% no volume de águas tratadas, nos anos de 1990 e 1991, em relação ao ano de 1989 (Prado, 1994).

Estudos realizados por Prado (1994) indicaram a necessidade da manutenção de um tratamento constante, uma vez que qualquer interrupção provocaria imediato aumento da concentração de poluentes lançados nos córregos. Com isto, a energia requerida pelo processo é alta e, somando-se aos custos relativos ao consumo de reagentes empregados, o gasto final com o tratamento torna-se muito elevado. Os volumes de água ácida tratadas no CIPC, o consumo e custo dos reagentes usados no tratamento durante o período de 1994 a 2001 estão apresentados na Tabela 3.4.



Figura 3. 6 – Bacia BNF de contenção dos efluentes ácidos do BF4.



Figura 3. 7 – Vista parcial da cava da mina inundada.

Tabela 3. 4 – Volume de águas ácidas tratadas no CIPC, consumo e custo dos insumos usados no tratamento no período de 1994 a 2001.

Estação de Tratamento de Águas Marginais - Área 440							
Ano	Volume Tratado (m³)	Consumo Anual e Custo dos Insumos					
		Cal Hidratada			Floculante		
		(t)	(kg/m³)	(US\$)	(kg)	(g/m³)	(US\$)
1994	1.155.510	2.358	2,04	109.175	5.939	5,14	22.568
1995	2.164.110	4.700	2,17	217.610	na	na	na
1996	1.659.000	4.050	2,44	187.515	2.060	1,2	7.828
1997	1.094.050	3.520	3,22	162.976	1.513	1,38	5.749
1998	1.163.670	2.573	2,21	119.130	1.770	1,52	6.726
1999	1.232.616	2.249	1,82	104.129	2.940	2,38	11.172
2000	1.604.546	2.907	1,81	134.594	1.220	0,76	4.636
2001	1.414.851	1.966	1,39	91.025	1.787	1,26	6.791
Estação de Tratamento de Rejeitos da Usina - Áreas 540/570/580							
Ano	Volume Tratado (m³)	Consumo Anual e Custo dos Insumos					
		Cal Hidratada			Cloreto de Bário		
		(t)	(kg/m³)	(US\$)	(kg)	(g/m³)	(US\$)
1994	1.104.300	3.297	2,99	152.651	10.130	9,2	8.306
1995	1.782.400	3.004	1,68	139.085	7.550	4,2	6.191
1996	1.668.800	316	0,19	14.631	12.050	7,2	9.881
1997	1.022.500	516	0,5	23.891	8.180	8	6.707
1998	746.370	427	0,57	19.770	7.550	10,1	6.191
1999	541.039	247	0,46	11.436	3.180	5,9	2.607
2000	743.400	434	0,58	20.094	4.129	5,5	3.385
2001	254.000	96	0,21	4.445	1.619	3,5	1.327

(Fonte: INB, citado por Cipriani, 2002)

BALANÇO HÍDRICO E SEUS COMPONENTES

4.1 – INTRODUÇÃO

No passado, devido ao pouco conhecimento existente sobre o assunto, a exploração dos recursos hídricos era praticada de forma pouco planejada, atendendo muitas vezes objetivos preponderantemente econômicos. Em consequência disto, estes recursos naturais vêm sendo deteriorados a cada dia.

Entretanto, a crescente percepção deste fato vem reforçando gradativamente a consciência sobre a necessidade de preservação destes recursos. Neste intuito, o real entendimento dos fenômenos e processos que ocorrem no meio físico natural constitui o princípio básico de partida para a elaboração de projetos e/ou adoção de medidas de recuperação ambiental.

Segundo Ramos et al. (1989) a Hidrologia *é a ciência que estuda a ocorrência, a distribuição, o movimento e as propriedades da água na atmosfera, na superfície e no subsolo terrestre*. Considerando-se o alcance desta definição, é possível perceber a variedade de problemas nos quais a hidrologia encontra aplicação, dentre os quais a preservação ambiental.

4.2 – CICLO HIDROLÓGICO

Na natureza, a água se encontra num permanente ciclo, denominado ciclo hidrológico, estabelecido entre a atmosfera, a superfície terrestre e os oceanos. Neste ciclo, a água evaporada dos oceanos, lagos, rios e superfícies úmidas expostas à atmosfera, juntamente à decorrente do fenômeno de transpiração das plantas, se

concentra na forma de nuvens nas camadas mais altas da atmosfera. Dependendo das condições climáticas nestas camadas, o vapor d'água se condensa, transformando-se em gotículas de água que, sob a ação da gravidade, se precipitam sob a forma de chuva, neve, granizo, nevoeiro e geada. A Figura 4.1 ilustra de forma esquemática o ciclo hidrológico.

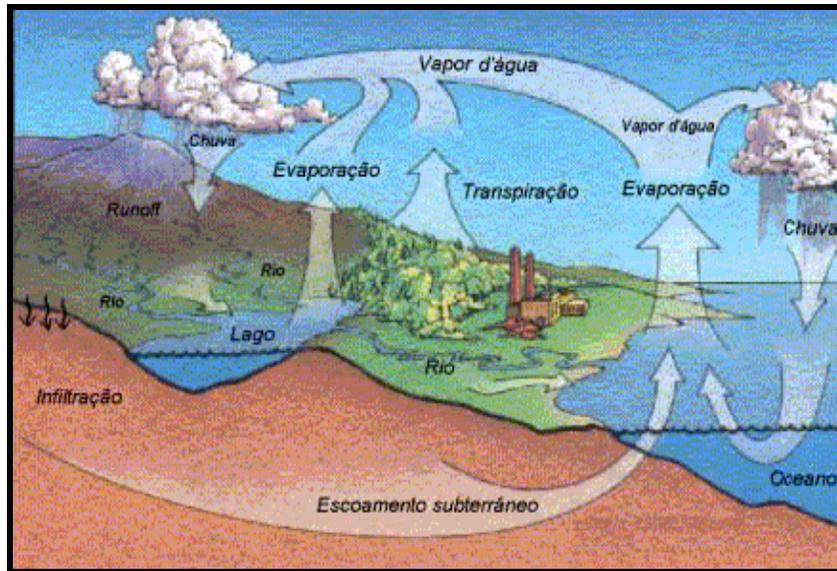


Figura 4. 1 – Esquema geral do ciclo hidrológico (Barbosa Jr., 2002).

Num evento chuvoso, forma mais comum de precipitação, parte das águas de chuva que caem sobre a superfície terrestre podem sofrer interceptação pelas folhas dos vegetais e pelas construções, de onde evaporam. Da parte que atinge o solo, seja por precipitação direta ou por superação da capacidade de interceptação, uma parcela retorna à atmosfera na forma de evaporação, parte se infiltra no solo e outra parte pode escoar na superfície. Da parcela de infiltração, uma porção é utilizada pelas plantas para suas funções vitais e retorna à atmosfera pelo processo conhecido como transpiração. A outra porção, que percola pelo solo a camadas mais profundas, atinge o lençol freático, onde ocorre o escoamento subterrâneo que contribui para a alimentação de base dos rios. O solo, no entanto, constitui um meio poroso onde a infiltração e percolação são comandadas pelas tensões capilares e pela gravidade. Assim, à medida em que o solo se satura, a capacidade de infiltração decai à taxa residual e o excedente não infiltrado irá compor o escoamento superficial. Este, por sua vez, impulsionado pela gravidade para

cotas mais baixas, cria uma rede de drenagem que faz convergir a água para os cursos de arroios e rios. O destino final destes cursos mais estáveis são lagos, mares e oceanos, que também estão sujeitos à evaporação. O vapor d'água oriundo da evaporação juntamente com o da transpiração (evapotranspiração) retorna à atmosfera e, dessa forma, dependendo das condições climatológicas, o ciclo novamente se estabelece (Tucci, 2002).

4.3 – EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico é o tópico da hidrologia que visa quantificar todas as variáveis envolvidas no ciclo hidrológico, utilizando para isto o princípio da conservação de massa.

Conhecida na Hidráulica como equação da continuidade, a equação do balanço hídrico é normalmente aplicada para bacias hidrográficas de grandes áreas de drenagem, para corpos d'água como lagos e reservatórios e para o escoamento superficial direto. Segundo Tucci (2002), a quantificação das variáveis hidrológicas para uma bacia hidrográfica auxilia no melhor entendimento do comportamento do sistema e na utilização racional dos recursos hídricos.

Expresso na forma de equação, o balanço hídrico se caracteriza basicamente pela diferença entre a quantidade de água que entra e a que sai de um elemento ou volume de controle pré-determinado:

$$[Quantidade\ que\ entra\ no\ vol.\ de\ controle] - [Quantidade\ que\ sai\ do\ volume\ de\ controle] = [variação\ da\ quantidade\ acumulada\ no\ interior\ do\ elemento\ de\ controle]$$

Nestes termos, dois tipos de análises podem ser realizados quando da aplicação do balanço hídrico: (a) desconsiderando-se o escoamento subterrâneo e (b) considerando-se o escoamento subterrâneo.

No caso (a), ilustrado na Figura 4.2, o balanço hídrico pode ser escrito da seguinte forma:

$$[P + R_{in}] - [R_{out} + E + T + I] = \Delta V_{ECS} \quad (4.1)$$

Sendo que:

P – precipitação;

R_{in} – escoamento superficial de entrada;

R_{out} – escoamento superficial de saída;

E – evaporação;

T – transpiração vegetal;

I – infiltração;

ΔV_{ECS} – variação do volume de água na superfície do solo.

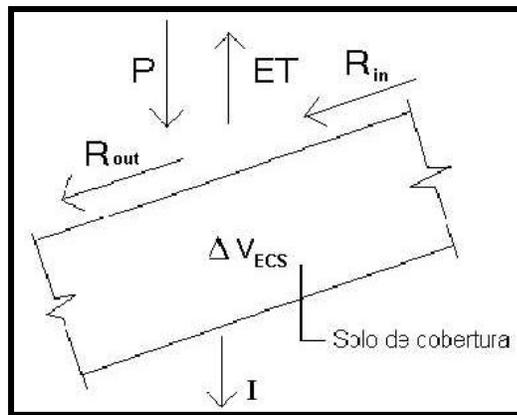


Figura 4. 2 – Aplicação do balanço hídrico em superfície.

Como mencionado no item 4.2, a soma dos fenômenos da transpiração e evaporação é comumente conhecida como evapotranspiração (ET). Desse modo, a equação 4.1 pode ser assim reescrita:

$$[P + R_{in}] - [R_{out} + ET + I] = \Delta V_{ECS} \quad (4.2)$$

Na análise que inclui a consideração do escoamento subterrâneo, a equação do balanço hídrico toma a seguinte forma:

$$[P + R_{in} + G_{in}] - [ET + R_{out} + G_{out}] = \Delta V_{EC} \quad (4.3)$$

em que:

G_{in} – escoamento subterrâneo de entrada;

G_{out} – escoamento subterrâneo de saída;

ET – evapotranspiração;

ΔV_{EC} – variação do volume de água no solo (subsuperfície).

Numa análise de longo período (como um ciclo anual, por exemplo) e considerando-se termos médios, a soma das variações positivas e negativas do volume de água acumulado no elemento de controle tende a se anular. Logo, a ΔV_{EC} pode ser igualada a zero, resultando na equação (4.4).

$$[P + R_{in} - ET] + [G_{in} - G_{out}] = R_{out} \quad (4.4)$$

4.4 – COMPONENTES DA EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

4.4.1 – Precipitação (P)

Principal componente de entrada hídrica num sistema hidrológico (bacia hidrográfica, por exemplo), a precipitação pode ocorrer sob diversas formas: chuva, granizo, neve, neblina, orvalho ou geada. No Brasil, a forma mais comum de precipitação é através da ocorrência de chuvas, que será a forma a ser tratada durante todo o texto.

Segundo Lencastre e Franco (1984), a atmosfera constitui um grande reservatório de vapor d'água, além de um sistema de transporte e distribuição de água. Sob determinadas condições meteorológicas propícias o vapor d'água vai se aglomerando sob a forma de nuvens, até formar gotículas. Quando estas gotículas passam a ter tamanho e peso suficientes para vencerem a resistência do ar, elas caem em direção à superfície terrestre.

Existem basicamente três tipos principais de precipitação, que se diferenciam de acordo com as condições meteorológicas que provocam a ascensão do ar úmido. Segundo Tucci (2002), estas três classificações de precipitação são:

- **Convectivas:** são causadas basicamente pelo surgimento de estratificação térmica da atmosfera. Esse tipo de situação é mais comum em regiões tropicais e é provocada pelo aquecimento da massa de ar próxima ao solo pela radiação solar. Em virtude da diferença de densidade, o ar quente (menos denso) pode sofrer brusca ascensão até

encontrar as camadas superiores mais frias. O choque térmico favorece a condensação e a precipitação geralmente ocorre de maneira intensa e de curta duração em pequenas áreas;

- Orográficas: são aquelas ocasionadas quando as massas de ar úmidas são elevadas mecanicamente em função de uma barreira montanhosa. Nessa elevação o ar é resfriado adiabaticamente, originando a formação de nuvens e, posteriormente, a precipitação. Este tipo de chuva ocorre com pequena intensidade e grande duração, cobrindo pequenas áreas. Outra característica deste tipo de chuva é que ela geralmente ocorre sobre a face montanhosa voltada para o vento, podendo até mesmo originar zonas secas ou semi-áridas do lado oposto;
- Ciclônicas ou frontais: resultam do contato frontal entre as massas de ar, chamadas frentes, de temperaturas e umidades diferentes. Na região do contato, o ar quente é impulsionado para cima, onde se resfria. Consequentemente, o vapor d'água se condensa e a precipitação acontece, geralmente de longa duração, intensidade baixa a moderada e sobre grandes extensões.

Segundo Garcez (1976), as grandezas normalmente utilizadas na caracterização das precipitações são:

- Altura pluviométrica (P): corresponde à quantidade de água precipitada por unidade de área horizontal, ou seja, seria a espessura média de água que recobriria a região de precipitação caso essa água não se infiltrasse, evaporasse ou escoasse. É geralmente expressa em mm e sua medição é usualmente determinada através de aparelhos denominados pluviômetros (Figura 4.3);



Figura 4.3 – Exemplo de um pluviômetro.

- Duração (t_d): é o intervalo de tempo decorrido entre o início e o fim da precipitação. É habitualmente dado em minutos ou horas;
- Intensidade (i): representa a velocidade de precipitação, ou seja, a relação entre a altura pluviométrica registrada e o tempo gasto para a medida desta altura ($i = \Delta P/t_d$). Encontrada em mm/h , mm/min ou mm/dia , a intensidade é normalmente obtida através de aparelhos denominados pluviógrafos (Figura 4.4). Este equipamento registra automaticamente as variações de precipitação ao longo do tempo, sendo possível obter informações com intervalos superiores a 5 minutos;



Figura 4.4 - Pluviógrafo do Laboratório de Controle Ambiental da INB.

- Frequência: considerando a chuva um processo aleatório, onde a quantidade, distribuição e formas de ocorrência podem variar amplamente, torna-se importante e necessário o estudo de um período mínimo de dados pluviométricos que venham

refletir o comportamento de uma região (Castro, 1994). Francisco (1991) sugere períodos maiores que 30 anos para expressar representativamente o processo que ocorre em uma dada região. A frequência é, portanto, definida como o número de ocorrências de um evento num determinado período. É geralmente associada ao tempo de recorrência (T_r) ou tempo de retorno, que representa o tempo médio em que um evento de uma dada magnitude é igualado ou superado pelo menos uma vez (Barbosa Jr., 2002).

Ao longo dos anos ou décadas de registros pluviométricos podem ocorrer falhas de informações ou mesmo períodos sem observações, sejam por erro humano ou por problemas mecânicos dos aparelhos de medição. Neste sentido, a utilização de dados de precipitação falhos em estudos hidrológicos poderia comprometer os propósitos a que se destinam. Visando contornar esse tipo de problema, algumas análises podem ser empregadas afim de preparar os dados pluviométricos para o tratamento estatístico. Segundo Tucci (2002), o primeiro passo consiste na identificação e no preenchimento das falhas que porventura possam existir. Este procedimento pode ser realizado através de um dos três métodos básicos existentes: método de ponderação regional, método de regressão linear e método de ponderação regional com base em regressões lineares.

Após o preenchimento das falhas, é necessário que se faça uma análise destes dados dentro de uma visão regional. Também chamada de análise de consistência, esta tarefa visa a comprovação do grau de homogeneidade dos dados referentes a um posto pluviométrico em relação aos postos vizinhos. Dois métodos costumam ser usuais para a conclusão deste passo: o método da dupla-massa¹ e o método do vetor regional.

Com a conclusão da etapa de análise é possível se obter as precipitações pontuais. Contudo, numa aplicação do balanço hídrico sobre uma bacia hidrográfica, por exemplo, faz-se necessário o conhecimento da precipitação que cobre toda a área. Para o estabelecimento do valor desta precipitação média, considerada como uma altura uniforme de água que cobre toda a bacia, utiliza-se um dos diversos métodos existentes na literatura. Dentre os mais usuais, podem ser destacados: o método da média aritmética, o método de Thiessen e o método das isoietas.

¹ Este método foi empregado na análise de consistência dos dados de chuva no BF4 (ver Capítulo 5).

4.4.2 – Evapotranspiração (ET)

Como mencionado no item 4.2, a ET representa o conjunto dos fenômenos da evaporação e da transpiração vegetal. A evaporação consiste no processo físico de transformação da água em estado líquido para vapor. A transpiração, por sua vez, corresponde à perda de água para a atmosfera em forma de vapor devido às necessidades fisiológicas das plantas (Barbosa Jr., 2002).

A distinção destes dois processos numa determinada área ou região constitui uma tarefa praticamente impossível. Portanto, a utilização da componente única evapotranspiração (ET) é o modo mais adequado de se tratar a perda de água na forma de vapor em aplicações hidrológicas.

O sol, principal fonte de energia para o processo de vaporização da água, é o responsável direto pelo fenômeno da evapotranspiração. Porém, fatores como as temperaturas do ar e da água, a pressão de vapor, o vento e as características gerais do solo também exercem influência na magnitude do processo.

A ET é uma das variáveis do balanço hídrico de maior dificuldade de determinação, devido aos seus diversos fatores intervenientes. Sua determinação envolve a utilização de medidas diretas, através de aparelhos denominados lisímetros, ou ainda através da utilização de modelos empírico-matemáticos.

Em relação aos modelos, que visam estimar o valor da ET , uma outra consideração deve ser feita. A ET de uma região com disponibilidade hídrica, ou cuja umidade do solo não seja um fator limitante, será maior que a ET de uma outra sem disponibilidade, mesmo com condições meteorológicas semelhantes (Tucci, 2002). Desta constatação dois importantes conceitos devem ser considerados: evapotranspiração potencial (ET_p) e evapotranspiração real (ET_r). A ET_p refere-se ao valor da evapotranspiração hipotética de uma superfície extensa, completamente coberta por vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Tucci, 2002). Já a ET_r representa o valor efetivamente evapotranspirado diante dos fatores naturais e ambientais reais. Sendo assim, a ET_p será quase sempre maior ou igual a ET_r .

Valores de ET_r são relativamente difíceis de serem determinados, pois demandam um longo tempo de observação e alto custo. Medidas diretas, como a utilização de lisímetros, considerado um dos métodos mais corretos, ou a avaliação da

umidade do solo servem a este propósito. Os lisímetros são estruturas implantadas no local de investigação, de volume maior que 1 m^3 e que são preenchidas com o próprio solo (Figura 4.5). Possuem também um sistema de drenagem no fundo que, a partir dos dispositivos de operação, permitem obter medidas em volume ou em massa. Já as medidas de umidade do solo visam estabelecer o valor da ET através da variação do volume de água acumulado no solo. Porém, os resultados deste último método podem estar sujeitos à grande variabilidade espacial dos solos e, conseqüentemente, não serem muito confiáveis (Tucci, 2002).

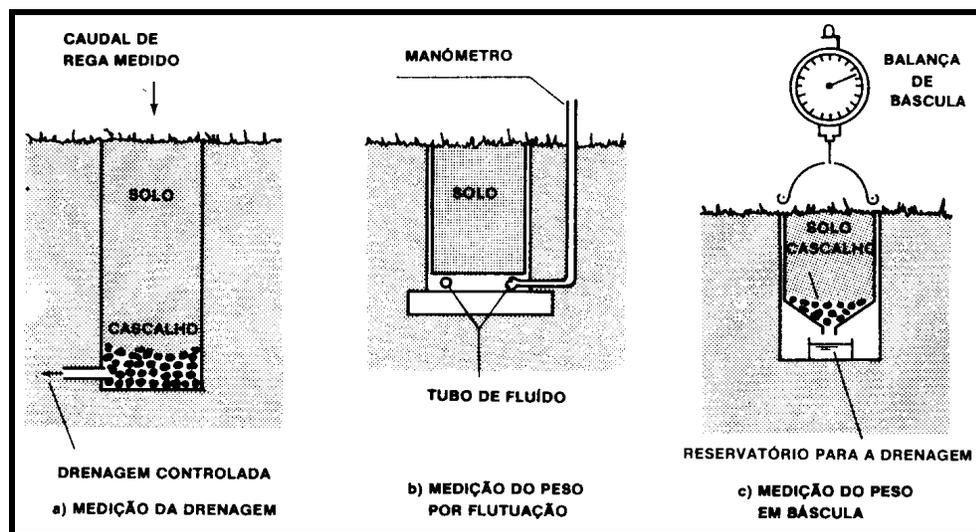


Figura 4. 5 – Exemplos de lisímetros (Lencastre e Franco, 1984).

Tendo em vista a dificuldade em se determinar a ET_r , diversos pesquisadores desenvolveram métodos para estimar o valor da ET_p . Estes métodos, de fundamentação conceitual, empírica ou semi-empírica, são obtidos da aplicação das leis da transferência de massa e do balanço de energia. Como exemplos, podem ser citados os modelos matemáticos baseados na temperatura como os de Thornthwaite e de Blaney-Criddle, os baseados no balanço de energia (radiação) como o de Jensen e Haise, e o resultante da combinação do balanço de energia com os fatores aerodinâmicos, como o de Penman. Este último foi o modelo escolhido para a realização do balanço hídrico do bota-fora BF4 e será descrito com maiores detalhes no Capítulo 5.

4.4.3 – Infiltração (I)

Segundo Lencastre e Franco (1984), infiltração é a passagem da água para dentro do solo, influenciada pela ação da gravidade e pelas forças capilares presentes no solo. Em outras palavras, é a passagem da água da superfície para a subsuperfície do terreno. Conseqüentemente, depende fundamentalmente da disponibilidade de água na superfície, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar presentes no seu interior (Tucci, 2002).

Considerando-se um perfil qualquer de solo, a infiltração ocorre basicamente na zona não saturada ou região vadosa (Figura 4.6). Nesta região, os vazios presentes na estrutura do solo estão submetidos à sucção capilar e encontram-se parcialmente preenchidos com água, caracterizando um grau de saturação² menor que a unidade.

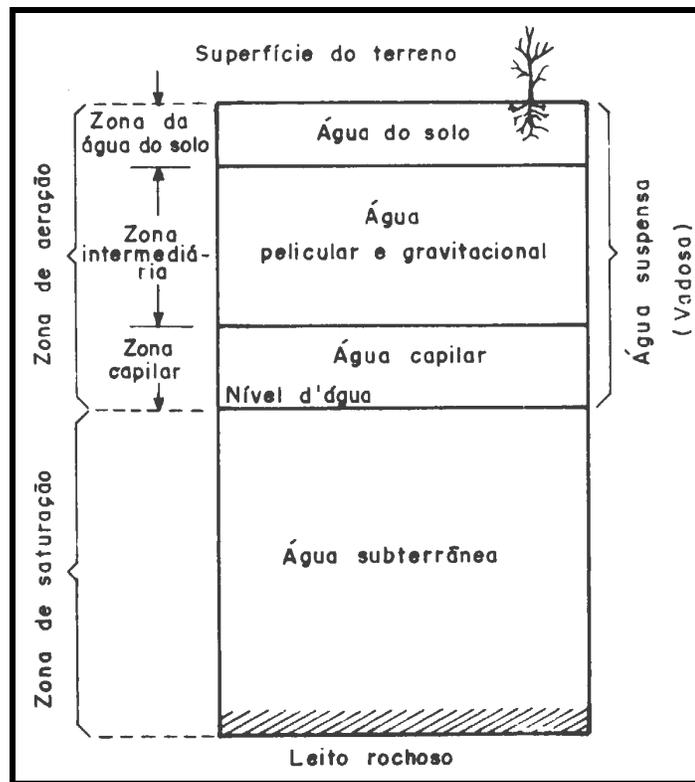


Figura 4. 6 – Perfil típico de um solo, contemplando as zonas de aeração (vadosa) e saturação (Tucci, 2002).

² O grau de saturação é dado pela relação entre o volume de água presente no solo e o volume de vazios, ou seja, $S_r = (V_w/V_v)$. Quando o valor de S_r é igual a unidade, diz-se que o solo está saturado.

Quando ocorre precipitação a água se infiltra pela superfície, o solo vai se umedecendo (ou se saturando) de cima para baixo e o perfil de umidade³ (volumétrica - θ) vai se alterando e tomando o aspecto típico da curva à direita do gráfico da Figura 4.7, com θ decrescendo em relação à profundidade. Com o fim da precipitação, a infiltração pára de acontecer e o perfil de umidade vai se conformando de maneira semelhante à curva da esquerda da mesma figura, dando-se o inverso, isto é, θ cresce com a profundidade. Esta variação acontece após a precipitação cessar e é decorrente do escape de água para a atmosfera via evapotranspiração e também da drenagem de água para as camadas mais profundas do solo, que vão contribuir para a elevação do lençol freático.

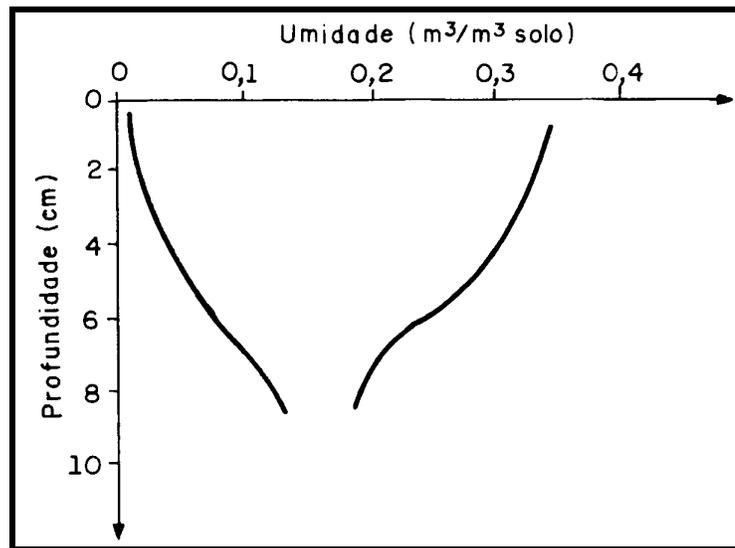


Figura 4. 7 – Variação do perfil de umidades (Tucci, 2002).

O conceito da capacidade de infiltração (f), que representa o potencial que o solo tem de absorver água pela sua superfície, surge para diferenciar da taxa real de infiltração, que ocorre somente quando há aporte real de água. Dessa forma, a taxa real de infiltração só se igualará à capacidade de infiltração caso o aporte superficial de água seja igual ou superior a esta última (Tucci, 2002).

³ Umidade volumétrica θ corresponde à relação do volume de água pelo volume total da amostra, isto é: $\theta = (V_w/V_T)$.

Segundo Barbosa Jr. (2002), diversos fatores influenciam a capacidade de infiltração do solo. São eles: tipo de solo, grau de umidade natural, estado de compactação pela ação de homens e animais, ação da precipitação, cobertura vegetal, temperatura e presença de ar. A Figura 4.8, por exemplo, mostra a variação da capacidade de infiltração de um solo num evento chuvoso.

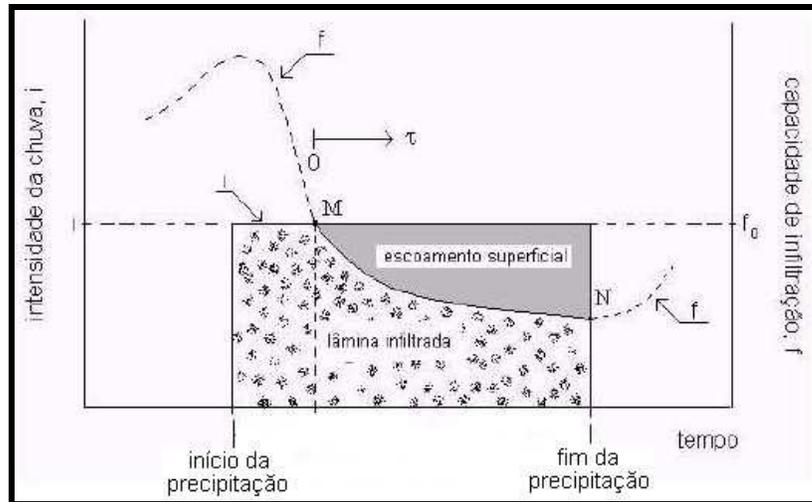


Figura 4. 8 – Variação de capacidade de infiltração durante uma precipitação (Barbosa Jr., 2002).

No início, como a capacidade de infiltração (f) é superior à intensidade da precipitação (i), todo volume precipitado é infiltrado pelo solo. No entanto, com o decorrer da precipitação, f vai se reduzindo até se igualar a i (ponto M). A partir deste ponto, f continua a se reduzir, tornando-se inferior a i , ou seja, o volume precipitado passa a ser superior ao infiltrado. Neste momento, o volume excedente de água torna-se livre para escoar superficialmente (área em cinza da figura). Com fim da precipitação (ponto N), f volta a se elevar devido às drenagens porventura existentes.

4.4.4 – Escoamento superficial (R)

Como mencionado no item anterior, quando a precipitação ou o aporte de água na superfície do solo supera a sua capacidade de infiltração, o volume excedente torna-se livre para escoar superficialmente. Obedecendo às leis da gravidade, a água transcorre o terreno até uma linha de água mais próxima, como córregos, rios, lagos, etc, originando assim o escoamento superficial (Lencastre e Franco, 1984).

Portanto, o escoamento superficial é o segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento da água na superfície da terra (Barbosa Jr., 2002). Dessa forma, esta variável abrange os escoamentos oriundos do excesso de precipitação (escoamento direto) e os escoamentos de origem subterrânea de um rio (escoamento de base).

Diversos fatores exercem influência no escoamento superficial. Dentre os principais, podem ser destacados os aspectos climáticos relacionados à precipitação, a fisiografia ou relevo, as ações do homem através de obras hidráulicas, a presença e as características da vegetação, as características do solo e outros.

A quantificação do escoamento superficial é normalmente feita em termos de vazão em canais (Q), sendo que as unidades mais usuais são m^3/s ou l/s . Diversos métodos podem ser empregados para a obtenção desta grandeza, como através da medição da seção e da velocidade média de um rio ou através de métodos estruturais que utilizam dispositivos hidráulicos como vertedouros.

Porém, outras grandezas também são empregadas na caracterização do escoamento superficial (Barbosa Jr., 2002). São elas:

- coeficiente de escoamento superficial (C): também conhecido como coeficiente de *run off*, é definido pela razão do volume escoado superficialmente por ocasião de chuva (Vol_S) pelo volume de água precipitada (Vol_T), isto é:

$$C = \frac{Vol_S}{Vol_T} \quad (4.5)$$

- Precipitação efetiva ou excedente (P_{ef}): é a medida em altura da parcela de chuva que provoca escoamento superficial. É geralmente obtida através da razão de Vol_S pela área de drenagem da bacia considerada (A), como expresso pela equação 4.6:

$$P_{ef} = \frac{Vol_S}{A} \quad (4.6)$$

- Frequência e tempo de recorrência: a frequência refere-se ao número de ocorrências de uma determinada vazão Q em um determinado intervalo de observação. Já o tempo de recorrência (T_r), consiste num intervalo de tempo médio em que uma vazão Q é igualada ou superada;

- Nível de água, cheia, e inundação: nível de água (NA) corresponde à altura da água numa seção em relação a um determinado referencial; cheia refere-se à uma elevação do NA dentro do próprio leito e a inundação ocorre quando a elevação ultrapassa os níveis comuns, provocando transbordamento do leito.

O estudo do escoamento superficial é realizado com maior frequência em aplicações de previsões de enchentes e em drenagem urbana. Nestes estudos é comum a utilização de hidrogramas, que correspondem a gráficos que relacionam a vazão com o tempo.

A Figura 4.9 apresenta um hidrograma típico relacionado a valores de precipitação. A linha pontilhada que passa pelos pontos ABDC corresponde ao volume escoado relacionado ao escoamento de base, ou seja, de origem subterrânea. A diferença entre os valores da linha do hidrograma e da pontilhada refere-se à vazão escoada por efeito direto da precipitação (escoamento direto). Portanto, nos trechos anterior ao ponto A e posterior ao ponto C, os volumes de água que escoam superficialmente pelo solo possuem somente origem subterrânea, enquanto que, entre estes pontos, o efeito da precipitação no escoamento pode ser verificado.

Segundo Tucci (2002), alguns termos devem ser destacados do hidrograma da Figura 4.9, os quais são descritos a seguir:

- tempo de retardo (t_r): definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma;
- tempo de pico (t_p): corresponde ao intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o tempo da vazão máxima;
- tempo de concentração (t_c): tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia se desloque até a seção principal. É definido pelo intervalo compreendido entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma;
- tempo de ascensão (t_m): refere-se ao tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma;

- tempo de base (t_b): tempo decorrido entre o início da precipitação e aquele quando o rio volta às condições anteriores à chuva;
- tempo de recessão (t_e): tempo necessário para a vazão baixar até o ponto C da Figura 4.9, quando cessa o escoamento superficial direto.

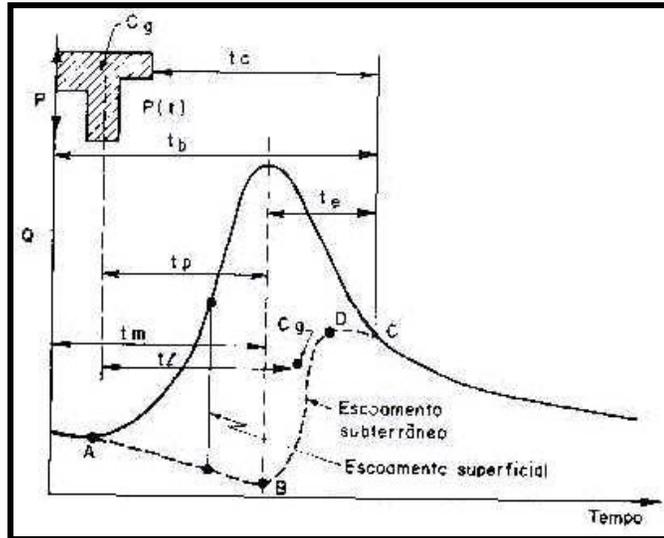


Figura 4.9 – Variação típica de um hidrograma e da capacidade de infiltração com a chuva (Tucci, 2002. Adaptado).

4.4.5 – Escoamento subterrâneo (G)

De modo geral, a água subterrânea tem origem na infiltração e percolação das águas pluviais e superficiais através das camadas permeáveis e de sistemas de fraturamento presentes nos solos e nas rochas. Seu estudo é, pois, de grande importância em diversas aplicações, como na hidráulica de poços e nas investigações de contaminação do solo e lençol freático.

O escoamento subterrâneo acontece majoritariamente na zona saturada e se processa pelos vazios ou poros interconectados devido às diferenças de potencial hidráulico. Nestas condições, o fluxo de água no interior do solo obedece a lei de Darcy.

A equação formulada por Darcy, obtida para escoamento laminar, como normalmente acontece nos solos, diz que:

$$V = -K \cdot i \quad (4.7)$$

Sendo,

V – velocidade darcyniana [LT^{-1}];

K – condutividade hidráulica [LT^{-1}];

i – gradiente hidráulico.

A velocidade darcyniana, muitas vezes chamada de velocidade aparente ou vazão específica, representa uma velocidade macroscópica, pois considera o fluxo volumétrico atravessando uma área total (grãos e vazios). Na realidade, o fluxo ocorre somente através dos vazios interconectados. Logo, levando-se em conta a equação hidráulica da continuidade⁴, a velocidade de percolação (V_p) através dos poros do solo, também chamada de velocidade real ou velocidade linear média ou ainda velocidade de percolação, é dada pela seguinte expressão:

$$V_p = \frac{V}{\eta} \quad (4.8)$$

Sendo η o valor da porosidade⁵ do meio, dada pela relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra do solo.

Esta velocidade é de extrema importância, sobretudo em estudos de contaminação do solo e lençol freático, onde se necessitam conhecer com relativa segurança o deslocamento dos contaminantes no solo com o tempo.

A condutividade hidráulica (K) é um parâmetro que traduz a capacidade de um meio poroso transmitir água. Pode ser obtido por meio de ensaios de permeabilidade *in situ*, através de ensaios em poços ou furos de sondagens, ou por meio de ensaios de laboratório, utilizando-se permeômetros de carga fixa ou variável (Figura 4.10). Estes, embora mais baratos, podem apresentar a desvantagem de serem menos representativos das condições reais de campo.

⁴ A equação da continuidade é definida pela equação $Q = V.A$, sendo Q a vazão, V a velocidade darcyniana e A a área da seção ortogonal ao fluxo.

⁵ $\eta = V_v/V_T$.

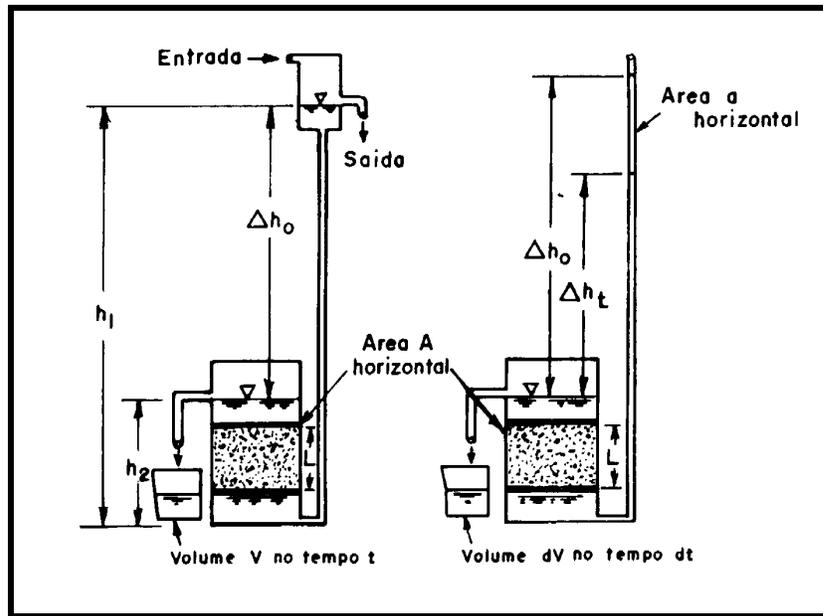


Figura 4. 10 – Permeômetros de carga fixa e variável (Tucci, 2002).

A condutividade no entanto, é influenciada pelas condições ambientais, pelas características do fluido e do meio poroso. Dessa forma, a condutividade é definida através da seguinte relação (Freeze e Cherry, 1979):

$$K = k_0 \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot g \quad (4.9)$$

Sendo,

k_0 – permeabilidade intrínseca do meio poroso, determinada basicamente pela dimensão média dos grãos do solo [L^2];

ρ – massa específica do fluido;

μ – viscosidade dinâmica do fluido;

g – aceleração da gravidade.

O gradiente hidráulico (i) corresponde à relação da diferença de potencial hidráulico (Δh) pelo comprimento do meio poroso na direção do fluxo (ΔL), ou seja:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (4.10)$$

Sendo h referente a carga hidráulica total, dada pela soma das cargas de elevação (h_e) e de pressão (h_p).

4.4.6 – Variação do volume de água acumulada no elemento de controle (ΔV_{EC})

Os materiais porosos de subsuperfície (solos ou rochas) quando totalmente preenchidos por água, diz-se que estão saturados; quando parcialmente preenchidos por água e ar, diz-se que estão não-saturados; quando totalmente preenchidos por ar, diz-se que estão secos. Esta última condição dificilmente é alcançada na natureza, de forma que a subdivisão dos materiais de subsuperfície em zona saturada e zona não saturada faz sentido.

Na zona não saturada, considerando um perfil de umidade em um solo qualquer, o volume de água acumulado (V_{EC}) representa o somatório do volume de água presente nos seus interstícios até uma profundidade analisada. A Figura 4.11 mostra a representação gráfica de V_{EC} como sendo a área hachurada sob o perfil de umidade volumétrica, θ (volume da água/volume da amostra) em função da profundidade (z).

Como mencionado no item 4.4.3, depois de cessado o aporte superficial da água proveniente das chuvas, o perfil de umidade na zona não saturada vai se alterando com o tempo (Figura 4.7), reduzindo-se os valores devido à infiltração em direção ao lençol freático. Segundo Freeze e Cherry (1979), as variações de θ são acompanhadas por variações na carga de pressão h_p , configurando a relação $\theta(h_p)$ que pode ser observada na Figura 4.12 (a). Dá-se o nome de curva característica do solo ao gráfico desta relação, a qual é histerética em função da drenagem ou do umidecimento. Nesta zona, h_p é mais influenciado pelas forças de capilaridade, sendo comumente tratada como sucção. A sucção, por sua vez, é caracterizada por poro-pressões menores que a pressão atmosférica, que é nula convencionalmente, sendo então negativa. Pela Figura 4.12(a) é possível observar que quanto menor h_p (ou mais negativa), menor a umidade do solo expressa através de θ .

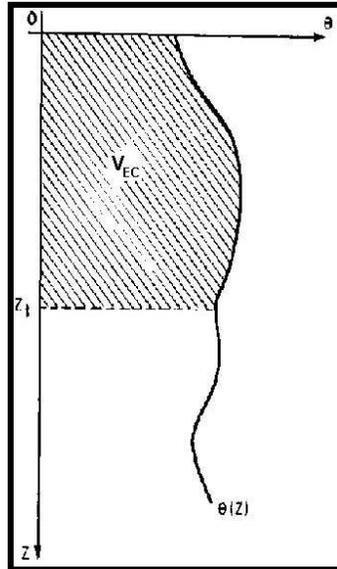


Figura 4. 11 – Perfil de umidade e representação do volume de água acumulado (V_{EC}) na zona não saturada do solo (Tucci, 2002).

A inclinação da curva característica representa a propriedade do armazenamento não saturado de um solo, que é chamada de capacidade de umidade específica C (tradução livre do termo inglês *specific moisture capacity*), é definida pela equação (4.11) (Freeze e Cherry, 1979). C também depende de h_p e, como a curva característica, é uma propriedade histerética de drenagem e umidecimento.

$$C = \frac{d\theta}{dh_p} \quad (4.11)$$

As propriedades de transmissão e armazenamento de um solo não saturado são completamente especificadas pela condutividade hidráulica K , que também é função de h_p (Figura 4.12 (b)), e uma das duas curvas $\theta(h_p)$ ou $C(h_p)$ (Freeze e Cherry, 1979). Nesta figura é possível observar que quanto menor h_p ou quanto mais negativa ela for, menor o valor de K .

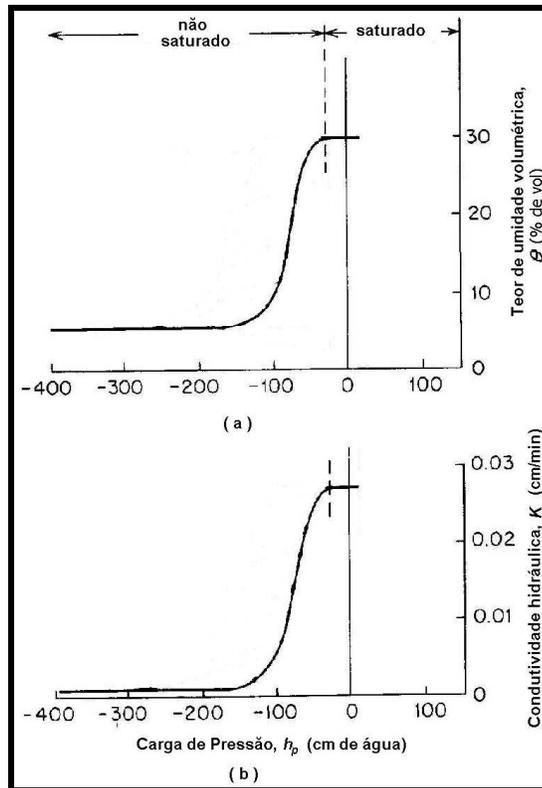


Figura 4.12 – Curvas características de θ e K em função de h_p para solos arenosos (Freeze e Cherry, 1979. Adaptado).

Em resumo, a variação do volume de água acumulada (ΔV_{EC}) na zona não saturada é influenciada pela infiltração da água da chuva conduzida pela força gravitacional, pelas propriedades de transmissão e armazenamento do solo, que por sua vez estão relacionadas a sucção, e pela evapotranspiração devido às condições atmosféricas. Obviamente, existem outros fatores intervenientes relacionados às propriedades dos meios porosos (porosidade, tamanho e conexão entre poros, permeabilidade intrínseca etc) e da água (densidade e viscosidade, principalmente).

A zona saturada é composta por unidades geológicas porosas (solos e rochas), que recebem diferentes denominações, segundo sua capacidade de transmitir água em condições de baixos gradientes hidráulicos (aquéferos, aquíardos e aquífugos) ou segundo suas relações estratigráficas (aquéferos livres, confinados e suspensos). Mais detalhes sobre estas classificações podem ser obtidos em textos básicos de hidrogeologia, como Freeze e Cherry (1979) e Feitosa e Manoel Filho (1997).

As propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e do meio poroso (porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade) influenciam diretamente a capacidade de uma formação geológica saturada armazenar ou transmitir água. Em virtude disto, os conceitos mais adiante abordados do armazenamento específico (S_s) e do coeficiente de armazenamento (S), que são bastante utilizados em aplicações de hidráulica de poços, consideram estes fatores em suas definições.

O armazenamento específico (S_s) é definido como o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica total (Freeze e Cherry, 1979). Em outras palavras, S_s traduz a capacidade de armazenamento útil de um aquífero, que pode ser expressa pela equação (4.12). Dessa forma, solos arenosos e/ou aquíferos, solos argilosos e/ou aquíferos e rochas não porosas e/ou aquíferos tendem a apresentar, nesta ordem, valores decrescentes de S_s .

$$S_s = \rho \cdot g \cdot (\alpha + \eta\beta) \quad (4.12)$$

sendo ρ a massa específica do meio poroso, g a aceleração da gravidade, α a compressibilidade do meio poroso, η a porosidade total e β a compressibilidade da água.

A equação (4.12) considera a expansão da água proporcionada pela redução da pressão hidrostática (efeito geralmente encontrado quando da perfuração de aquíferos confinados submetidos à alta pressão – alívio de pressão) e a redução dos vazios do aquífero devido ao efeito do adensamento das camadas (Feitosa e Manoel Filho, 1997).

Segundo (Feitosa e Manoel Filho, 1997), o coeficiente de armazenamento em aquíferos (S) é um parâmetro adimensional definido pela seguinte expressão:

$$S = S_s \cdot b \quad (4.13)$$

sendo b a espessura do aquífero.

A transmissividade (T) é um parâmetro que está intimamente relacionado com a condutividade hidráulica do meio e é praticamente constante na zona saturada para aquíferos homogêneos e independente de h_p . Definida pela expressão (4.14), T é

geralmente utilizada em aplicações de fluxo bidimensional ou fluxo horizontal através de poços em aquíferos confinados de espessura b (Freeze e Cherry, 1979).

$$T = K \cdot b \quad (4.14)$$

Em resumo, as propriedades de armazenamento e transmissão de água na zona saturada estão relacionadas às propriedades do fluido (densidade, viscosidade e compressibilidade) e do meio poroso (porosidade, compressibilidade e geometria do meio). A porosidade, incluindo a porosidade efetiva, e a condutividade hidráulica talvez sejam os parâmetros mais importantes em termos de armazenamento e transmissão, respectivamente.

4.5 – BACIA HIDROGRÁFICA

A quantificação de cada um dos processos de circulação de água mencionados anteriormente constitui um desafio a ser solucionado em projetos cujo objetivo é o de conhecer a demanda-disponibilidade de água. Em nível global, o ciclo hidrológico é considerado fechado, ou seja, a quantidade de água precipitada equivale à evapotranspirada. Entretanto, em nível local esta consideração pode não ser válida, uma vez que há movimentos contínuos, com dinâmicas diferentes na atmosfera e na superfície terrestre (Tucci, 2002).

Como um meio de se contornar este problema em sistemas abertos ou locais, surge o conceito da bacia hidrográfica (Figura 4.13), que consiste numa unidade hidrológica de captação natural da água da precipitação. Nela, os escoamentos superficiais convergem para um único ponto, o exutório (Tucci, 2002). A área de uma bacia hidrográfica é definida topograficamente, de modo que seu contorno (divisor de águas) coincida com os pontos de cota máxima entre bacias vizinhas e que seja cortado somente por um curso d'água, na seção de saída. Dessa forma, ela pode constituir um instrumento de grande valia, devido à simplicidade que oferece para a aplicação da equação do balanço hídrico (Barbosa Jr., 2002).

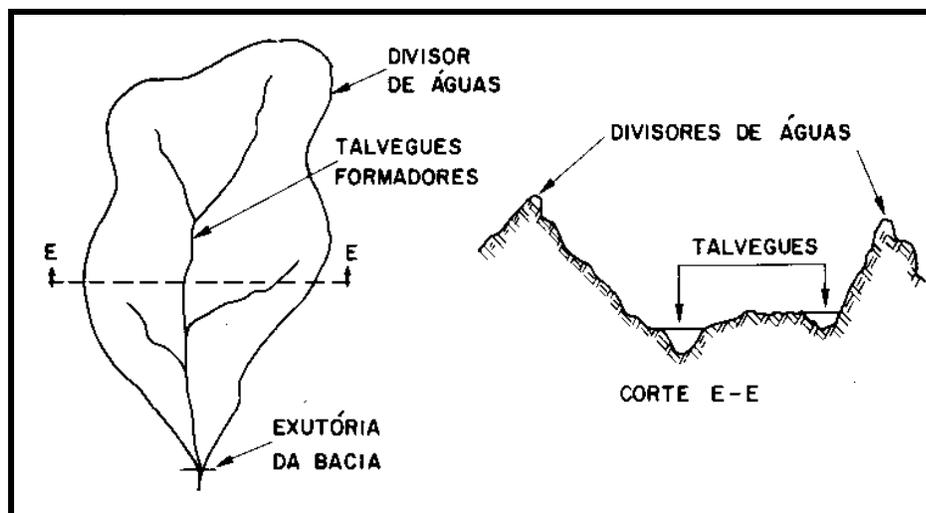


Figura 4. 13 – Representação esquemática de uma bacia hidrográfica (Ramos et al., 1989).

Como mostra a Figura 4.14, existem dois tipos de linha de separação de águas (divisores) que fazem a delimitação dos terrenos de uma bacia hidrográfica: a topográfica ou superficial e a freática ou subterrânea. A primeira, definida anteriormente, faz a divisão das precipitações segundo os pontos de cota topográfica máxima entre bacias. A outra (freática) é determinada pela estrutura geológica, que estabelece os limites dos reservatórios de água subterrânea (Lencastre e Franco, 1984).

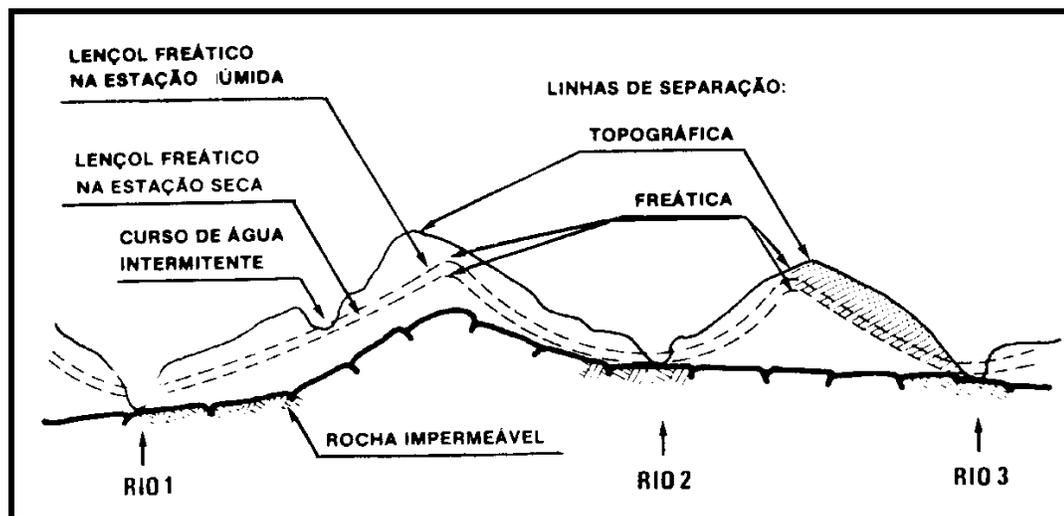


Figura 4. 14 – Divisores de água superficial ou topográfico e freático ou subterrâneo (Lencastre e Franco, 1984).

As áreas demarcadas por estas linhas de separação dificilmente coincidem com exatidão. Neste caso, parte da precipitação que cai sobre uma bacia topográfica e que se infiltra pelo solo irá contribuir para uma bacia adjacente. Contudo, devido à dificuldade prática em se determinar precisamente a separação freática (divisor de água subterrânea), uma vez que ocorrem flutuações do lençol ao longo do ano, costuma-se considerar a área de uma bacia hidrográfica como aquela determinada topograficamente (Lencastre e Franco, 1984). Desse modo, em aplicações da equação do balanço hídrico, as fugas que ocorrerão de uma bacia para outra quando as linhas não forem coincidentes serão desprezadas, uma vez que sempre ocorrerão compensações (Barbosa Jr., 2002).

Neste sentido, quanto maior a área de uma bacia menor a porcentagem das fugas em relação à precipitação. Em pequenas bacias, entretanto, este percentual pode alcançar um certo grau de significância, principalmente em áreas com depósitos geológicos muito permeáveis (Lencastre e Franco, 1984).

Diante do exposto, como só ocorre escoamento superficial através da linha de contorno da bacia hidrográfica no seu exutório, pode-se afirmar que a componente R_{in} da equação (4.4) é igual a zero. Desta forma, a equação do balanço hídrico reduz-se a:

$$[P - ET] + [G_{in} - G_{out}] = R_{out} \quad (4.15)$$

A segunda parcela do primeiro membro da equação 4.15 refere-se ao escoamento subterrâneo. Em grandes bacias, como abordado anteriormente, esta parcela que representa as fugas de água para as bacias vizinhas pode ser desprezada quando comparada à primeira parcela. No entanto, para pequenas e médias bacias esta parcela pode ser fonte de contribuições significativas, sendo, portanto, passível de investigação nestes casos.

Noutras aplicações, como o estabelecimento de equações de regionalização, busca-se relacionar e comparar as características físicas de uma bacia e os dados hidrológicos conhecidos. O hidrograma, por exemplo, é a relação que se estabelece entre a vazão na seção exutória de uma bacia em função do tempo, e seus resultados são diretamente influenciados por fatores como os aspectos fisiográficos, hidrometeorológicos e os processos hidrológicos da bacia (Ramos et al., 1989).

Dentre as características fisiográficas de grande importância no estudo do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas podem ser citadas: geometria, sistema de drenagem, relevo, geologia, solos e vegetação.

4.5.1 – Características geométricas

A área de drenagem (A) de uma bacia consiste na área plana (projeção em plano horizontal) limitada pelos divisores topográficos da bacia. Seu conhecimento é de suma importância na avaliação da potencialidade hídrica de uma bacia, uma vez que a multiplicação desta área pela altura da lâmina d'água precipitada define o volume recebido pela bacia (Barbosa Jr., 2002).

A determinação da forma de uma bacia encontra maiores aplicações em estudos de inundações. Considerando-se bacias de áreas iguais, as de forma arredondadas serão mais susceptíveis a inundações que as alongadas.

O coeficiente de compactidade (K_c) constitui-se num índice representativo da bacia quanto à susceptibilidade a inundações. É definido pela relação entre o perímetro da bacia e o perímetro do círculo de área igual. Desenvolvendo-se esta relação, o K_c pode ser calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{Per}{\sqrt{A}} \quad (4.16)$$

sendo Per o perímetro da bacia hidrográfica. Logo, bacias alongadas tendem a possuir maiores valores de K_c , enquanto as arredondadas apresentam valores próximos à unidade.

Outro parâmetro utilizado é o fator de forma (K_f), definido como a relação entre a largura média da bacia e o seu comprimento axial. Ele também representa um índice quanto à susceptibilidade a inundações. Como a largura média da bacia (l) pode ser obtida pela divisão da área (A) pelo seu comprimento axial (L), o fator de forma é expresso da seguinte maneira:

$$K_f = \frac{l}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (4.17)$$

Logo, bacias alongadas apresentam pequenos valores de K_f e são menos susceptíveis as inundações.

A combinação de K_c e K_f fornece subsídios para se avaliar se uma bacia é ou não propensa a inundações.

4.5.2 – Características do sistema de drenagem

As características do sistema de drenagem fornecem indicativos sobre a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia. Alguns dos fatores mais importantes para este tipo de análise são apresentados a seguir:

- Constância de escoamento: segundo esta característica, os cursos d'água podem ser classificados em perenes, quando contém água durante todo tempo, sendo alimentados continuamente pelo lençol subterrâneo; intermitentes, que escoam durante as estações úmidas e secam nas estiagens; e os efêmeros, que existem apenas durante ou imediatamente após os períodos de precipitação, transportando só o escoamento superficial que chega à sua calha (Lencastre e Franco, 1984).
- Ordem dos cursos d'água: definida por um número inteiro estabelecido de acordo com critérios diferentes, a ordem de um curso representa um indicativo do grau de ramificação do sistema de drenagem da bacia. O critério proposto por Horton e modificado por Strahler, um dos mais comuns em estudos de sistemas de drenagem em bacias, diz que (Barbosa Jr., 2002):
 - as primeiras linhas d'água que não possuem afluentes têm ordem 1;
 - a junção de dois canais de mesma ordem resulta num outro de ordem imediatamente superior;
 - quando dois canais de ordem diferente se unem, o canal formado possuirá a maior ordem dentre os formadores.

A Figura 4.15 apresenta o ordenamento de uma bacia hipotética segundo o critério de Horton-Strahler.

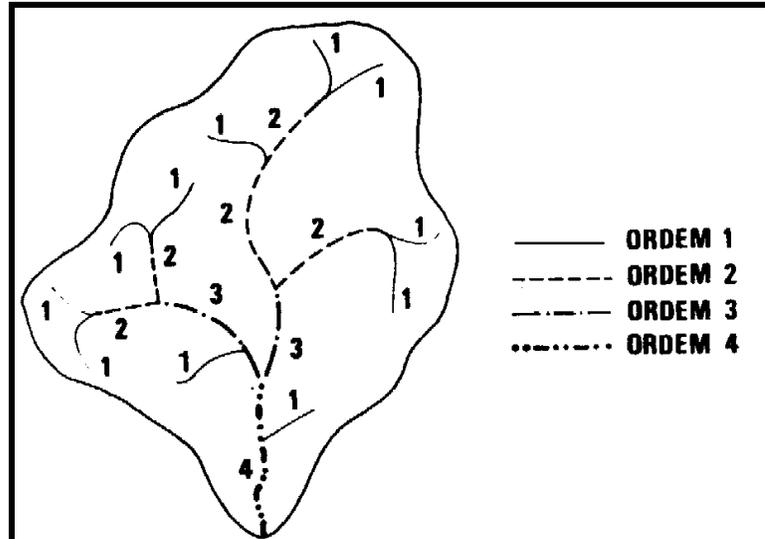


Figura 4. 15 – Critério de Horton-Strahler para ordenamento de cursos d'água (Lencastre e Franco, 1984).

- Densidade de drenagem (λ_d): obtida através da relação do comprimento total dos cursos d'água ($\sum L_i$) da bacia pela área de drenagem (A), equação (4.18). Este parâmetro fornece boa indicação sobre a eficiência da drenagem natural da bacia. A faixa comum de variação deste índice é de $0,5 \text{ km}^{-1}$ para bacias mal drenadas até $3,5 \text{ km}^{-1}$ para bacias excepcionalmente bem drenadas.

$$\lambda_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (4.18)$$

- Percurso médio do escoamento superficial (l_{es}): medida média da distância que a água de chuva teria que escoar na hipótese de escoamento em linha reta, desde o ponto de queda na bacia até o curso d'água mais próximo (Barbosa Jr., 2002). A obtenção de l_{es} deriva da transformação da bacia em uma bacia retangular hipotética, cujo lado maior corresponde à soma dos comprimentos do rio da bacia e o lado menor a $4x l_{es}$, conforme ilustrado na Figura 4.16. Logo, o l_{es} pode ser representado da seguinte maneira:

$$A = \sum L_i \cdot 4 \cdot l_{es} \Rightarrow l_{es} = \frac{A}{4 \cdot \sum L_i} \quad (4.19)$$

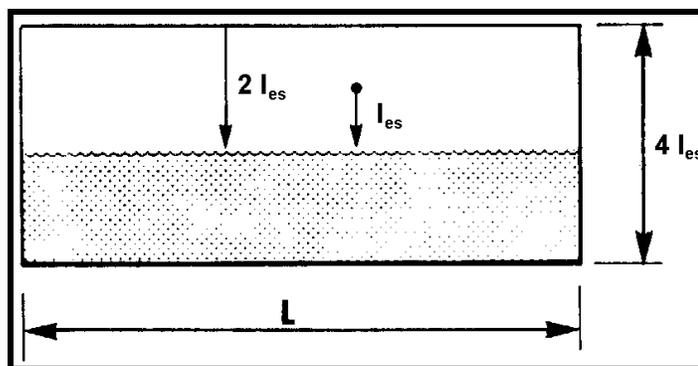


Figura 4. 16 – Conceito de bacia retangular para a obtenção do l_{es} (Lencastre e Franco, 1984).

4.5.3 – Características de relevo

O tipo de relevo influencia principalmente a infiltração e o escoamento superficial. Dentre os parâmetros mais importantes que demonstram a influência estão a curva hipsométrica e a declividade.

A curva hipsométrica é uma construção gráfica que, em porcentagem, representa a área de drenagem da bacia (A) que fica situada acima (ou abaixo) de diversas elevações em relação ao nível do mar. Constitui assim uma forma de se fazer a representação gráfica do relevo médio da bacia hidrográfica (Barbosa Jr., 2002).

A Figura 4.17 mostra um exemplo de uma curva hipsométrica apresentada por Barbosa Jr. (2002) para o Rio Capivari, afluente do Rio Jequitinhonha, no estado de Minas Gerais.

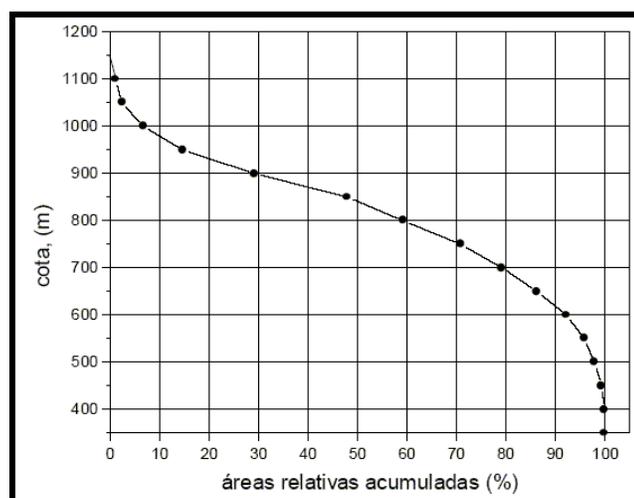


Figura 4. 17 – Curva hipsométrica da bacia do rio Capivari (Barbosa Jr., 2002).

A declividade da bacia está diretamente ligada à velocidade dos escoamentos. Dessa forma, é uma característica que influi no tempo de concentração da bacia e no hidrograma do seu exutório. É geralmente representada em gráficos que indiquem os comprimentos dos rios, obtidos em planta, nas abcissas e as elevações correspondentes nas ordenadas, gerando assim um perfil longitudinal (Figura 4.18). Pode também ser encontrada em gráficos cujos dados são previamente submetidos a tratamento estatístico (Figura 4.19).

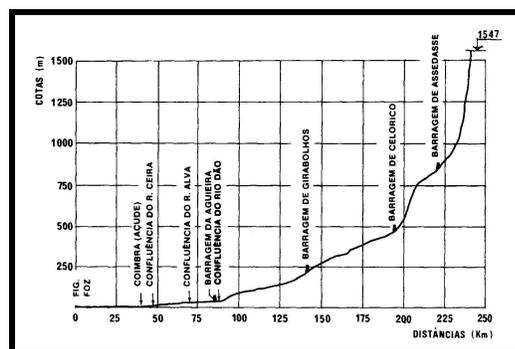


Figura 4.18 – Representação do perfil longitudinal do rio Mondego (Lencastre e Franco, 1984).

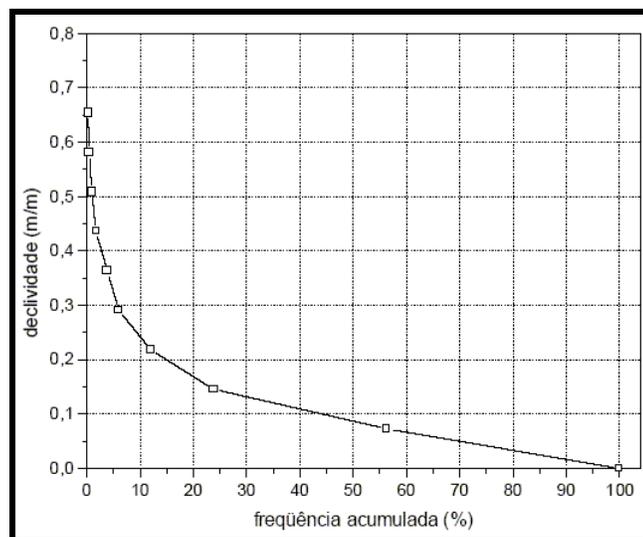


Figura 4.19 – Distribuição de frequência das declividades da bacia do rio Capivari (Barbosa Jr, 2002).

4.5.4 – Influência das rochas, solos e cobertura vegetal

A constituição das rochas possui uma estreita relação com a formação dos solos da região e com a formação do relevo. Tanto o relevo quanto as características das rochas e solos (porosidade, fraturamento etc) interferem na infiltração (drenagem) de água até o lençol freático.

Dependendo dos processos geológicos e/ou pedológicos envolvidos, as rochas e os solos resultantes podem apresentar características variadas, principalmente quanto à permeabilidade (capacidade de drenagem). Em geral, por apresentarem maior permeabilidade, os solos arenosos propiciam maior infiltração e percolação que os solos argilosos. Por outro lado, os maiores escoamentos superficiais são esperados em solos mais argilosos ou siltosos (menos permeáveis). Além disso, o estado de compactação também possui grande importância, pois tem efeito direto na porosidade do solo que, em conjunto com a permeabilidade, estão intimamente relacionados com a percolação e com os volumes acumulados de água em subsuperfície. Da mesma forma, grande parte das rochas (e.g granitos, folhelhos e outros) somente são permeáveis quando fraturadas.

Em hidrologia, a maior ou menor permeabilidade apresentada por determinados tipos de solo refletirão na rapidez das enchentes e na parcela levada às vazões de estiagens pelos lençóis subterrâneos (Garcez, 1976).

A cobertura vegetal é um fator de grande importância em quase todos os fenômenos do ciclo hidrológico. Quanto maior a área vegetada maior será a parcela de água disponível para evaporação. Além disso, menor será o choque direto das gotas de chuva com a superfície de solo, evitando sua compactação e o conseqüente aumento do volume de infiltração. De outro modo, as raízes dos vegetais modificam a estrutura do solo, introduzindo pequenas fissuras que auxiliam o processo de infiltração e diminuem o escoamento superficial. O sistema de raízes também contribui para o fenômeno da transpiração, já que retiram água da matriz do solo para as necessidades da planta. Somado a tudo isto, a vegetação possui ainda notável papel na redução dos problemas de erosão, pois além de aumentarem a infiltração e reduzirem o escoamento superficial, seu conjunto de raízes auxilia na retenção das partículas sólidas (solo).

BALANÇO HÍDRICO DO BOTA-FORA BF4

5.1 – INTRODUÇÃO

O balanço hídrico do bota-fora BF4 foi desenvolvido com base na equação (4.15), que considera o volume de controle como sendo constituído pela camada superficial de solo mais o subsolo.

No caso do BF4, acredita-se que o escoamento superficial seja mínimo, pois trata-se de material bastante permeável e também não foram visualizados nem drenagens superficiais nem registros erosivos. Sendo assim, optou-se por subtrair o termo R_{out} da equação (4.15), que passa a ter a seguinte forma:

$$[P - ET] + G_{in} = G_{out} \quad (5.1)$$

As águas ácidas drenadas no pé do BF4 e retidas na bacia BNF são decorrentes do escoamento subterrâneo que volta à superfície, caracterizando o fenômeno chamado de ressurgência. Além disso, a BNF foi definida como o ponto exutório da microbacia do BF4, como será visto no item 5.2. Desta forma, a vazão que a BNF recebe foi considerada como sendo a parcela G_{out} da equação (5.1), que se refere ao escoamento subterrâneo de saída.

Logo, a realização do balanço hídrico na região do BF4 consistiu na comparação mensal das parcelas $[P - ET]$ e G_{out} , sendo a diferença dessas duas atribuída ao escoamento subterrâneo de entrada (G_{in}).

O Laboratório de Controle Ambiental da INB (LCA/INB) disponibilizou um grande conjunto de dados de monitoramento que foram utilizados neste balanço, dentre

os quais os de precipitação (P) e de G_{out} . Porém, havia ainda a necessidade de se estimar mensalmente o valor de ET . Para tanto, foi necessário adotar um modelo matemático de estimativa de ET que pudesse contemplar o maior número possível dos dados de monitoramento disponíveis e, com isso, retratar mais fielmente as condições reinantes no BF4.

O modelo então escolhido para a estimativa da evapotranspiração potencial (ET_p), utilizada na equação (5.1), foi o proposto por Penman, que é considerado na comunidade científica como um dos mais completos. Também conhecido como modelo combinado, este método baseia-se no balanço de energia aliado às características aerodinâmicas do processo. Desta forma, sua aplicação requer o conhecimento de inúmeros parâmetros, tais como temperatura, umidade, velocidade dos ventos, insolação, posição geográfica etc.

A equação de Penman é expressa da seguinte forma (Barbosa Jr., 2002):

$$ET_p = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot R_{liq} + E_i}{\left(\frac{\Delta}{\gamma} + 1\right)} \quad (5.2)$$

sendo,

ET_p – intensidade da evapotranspiração potencial, em cm/dia;

ρ – massa específica da água, em g/cm³;

L – calor latente de vaporização da água, em cal/g;

R_{liq} – radiação efetivamente absorvida pela superfície, em cal/(cm².dia);

E_i – poder evaporante à sombra, em cm/dia;

Δ – variável auxiliar que representa a medida da variação da pressão de saturação do vapor com a variação da temperatura, num ponto em que a temperatura é igual à temperatura do ar, em mm-Hg/°C;

γ – constante psicrométrica ou constante de Bowen, igual a aproximadamente 0,49 mm-Hg/°C (Barbosa Jr., 2002).

A avaliação da quantidade Δ/γ (adimensional) pode ser feita de acordo com a expressão (5.3):

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38640 \times 10^{7,5T/(237,3+T)}}{(237,3+T)^2} \quad (5.3)$$

sendo T a temperatura do ar em °C.

Por sua vez, a radiação efetivamente absorvida resultante do balanço de energia superficial (R_{liq}) é expressa nos seguintes termos:

$$R_{liq} = R_t \left(\alpha + \beta \frac{n}{N} \right) \cdot (1 - a) - \sigma T^4 \left(0,56 - 0,09\sqrt{e} \right) \cdot \left(b + c \frac{n}{N} \right) \quad (5.4)$$

sendo:

R_t – radiação de ondas curtas no topo da atmosfera. Valor tabelado em função da latitude e da época do ano, e expresso em cal/(cm².dia);

α e β – parâmetros corretivos. Variáveis de local para local;

n – insolação efetiva, em horas. Medida por meio de heliógrafos;

N – duração máxima da insolação diária, em horas. Valor tabelado em função da latitude e da época do ano;

a – albedo (fator de reflectância) , isto é, razão entre as parcelas da radiação de onda curta refletida e incidente (adimensional). Variável em função da superfície de estudo;

σ – constante de Stefan-Boltzman, em cal/(cm².dia.K⁴);

T – temperatura absoluta, em Kelvin;

b e c – coeficientes introduzidos para considerar o efeito das nuvens para a radiação de onda longa. Segundo Penman, $b \approx 0,1$ e $c \approx 0,9$ (Barbosa Jr., 2002);

e – pressão de vapor, em mm-Hg, expressa da seguinte forma:

$$e = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (5.5)$$

sendo:

UR – umidade relativa do ar (%);

e_s – pressão parcial de vapor saturado à temperatura da superfície evaporante em mm-Hg. Os valores deste parâmetro são tabelados em função da temperatura.

O poder evaporante à sombra (E_i) é o termo que considera os aspectos aerodinâmicos. O vento atua no sentido da renovação do ar, retirando o ar úmido imediatamente acima da camada superficial evaporante. O termo E_i pode ser expresso de acordo com a seguinte expressão:

$$E_i = 0,035 \cdot \left(1 + \frac{U_2}{160} \right) \cdot (e_s - e) \quad (5.6)$$

sendo U_2 a velocidade do vento a 2 metros da superfície evaporante, em km/dia.

5.2 – A MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO BF4

Através do mapa topográfico atualizado da mina fornecido pela INB, executou-se a delimitação da microbacia do BF4, ficando a bacia BNF como o seu ponto exutório (Figura 5.1). Esta delimitação foi feita por meio do reconhecimento de divisores de águas superficiais, tendo como base somente as características topográficas. Possíveis divisores de água subterrânea não foram contemplados nesta análise devido à inexistência de dados necessários para sua obtenção. Salienta-se a dificuldade em se determinar divisores de águas superficiais em terrenos com profundas modificações de origem antrópica na paisagem, como no caso da região da Mina Osamu Utsumi.

A área de contribuição (A) desta microbacia foi calculada em aproximadamente $8,35 \times 10^5 \text{ m}^2$. Esta área é maior que a área do BF4 propriamente dito, avaliada em torno de $5,69 \times 10^5 \text{ m}^2$.

As características das bacias hidrográficas descritas no item 4.5 encontram aplicações em estudos de vazões superficiais em calhas de rios. Como a vazão que é retida na bacia BNF tem origem subterrânea e, uma vez que a microbacia do BF4 não possui nenhum curso de água de importância, julgam-se desnecessárias as caracterizações geométricas, do sistema de drenagem e do relevo desta microbacia.

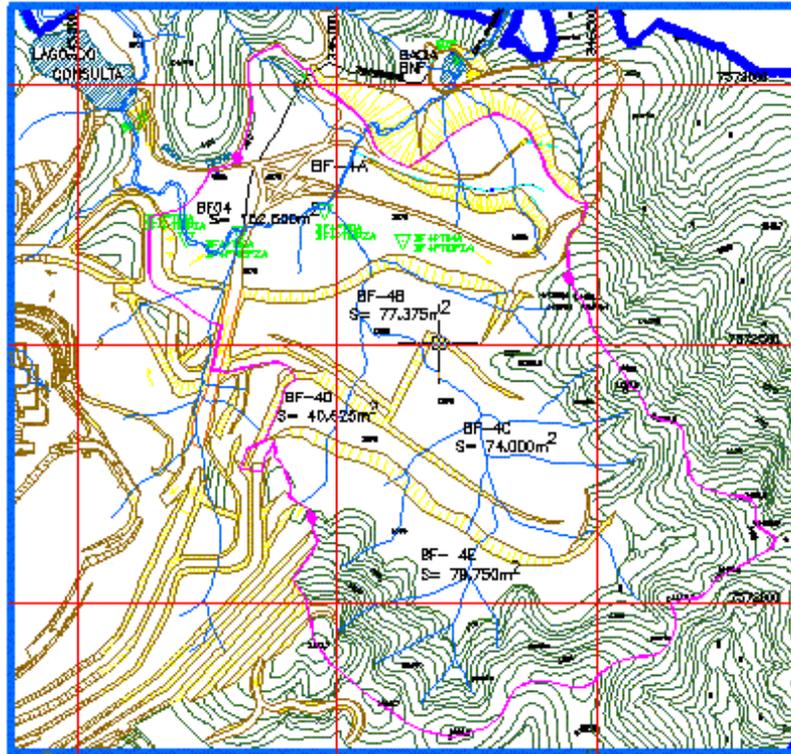


Figura 5. 1 – Delimitação da bacia de contribuição do BF4 (em cor magenta).

5.3 – COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO NO BF4

Os dados necessários à avaliação da precipitação e da evapotranspiração potencial no BF4 tiveram origem em duas fontes: (1^a) Laboratório de Controle Ambiental (LCA) da INB e (2^a) INMET (5^o DISME).

Os trabalhos de coleta de dados na INB consistiram em pesquisas, compilações e organização de registros meteorológicos e medidas de vazão, num verdadeiro processo de “garimpagem” dos dados, já que alguns destes registros se estendem desde o início das atividades da mina, em 1976.

5.3.1 – Precipitação (*P*)

O LCA/INB possui registros mensais de precipitação desde julho de 1976 até os dias atuais. A estação pluviométrica estava primeiramente localizada no Mirante, ao lado da cava da mina (Estação M/1), até dezembro de 1988. Logo após, em janeiro de 1989, foi transferida para junto ao LCA/INB (Estação M/2), onde se encontra atualmente, distante aproximadamente 2,5 km do BF4 (Figura 5.2). Os índices

pluviométricos mensais destas duas estações estão relacionados no Anexo I e os totais anuais acumulados, apresentados na Figura 5.3.

Analisando-se a Figura 5.3, foram observadas precipitações anuais superiores a 2500 mm nos anos de 1980 e 1983. Este fato causou dúvidas quanto à validade das observações registradas para estes dois anos, cujos totais acumulados eram muito maiores em relação aos registros dos outros anos.

Com o intuito de verificar a confiabilidade dos dados destes dois anos especificamente, buscou-se compará-los com os dados da estação meteorológica mais próxima possível. A estação encontrada, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), era localizada no município de Poços de Caldas/MG, nesta época. Os dados de precipitação de 1980 e 1983 desta estação, gentilmente cedidos pelo 5º Distrito de Meteorologia (5º D5ME) do INMET, estão relacionados na Tabela 5.1, juntamente com as observações da Estação M/1.

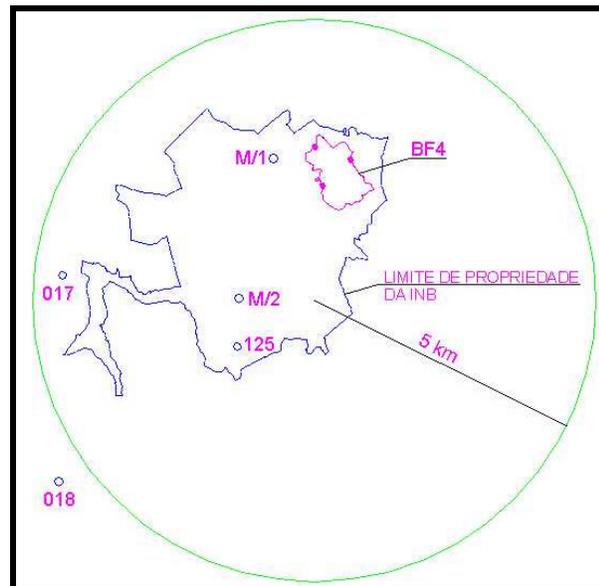


Figura 5. 2 – Localização das estações M/1, M/2, 017, 018 e 125 em relação ao BF4.

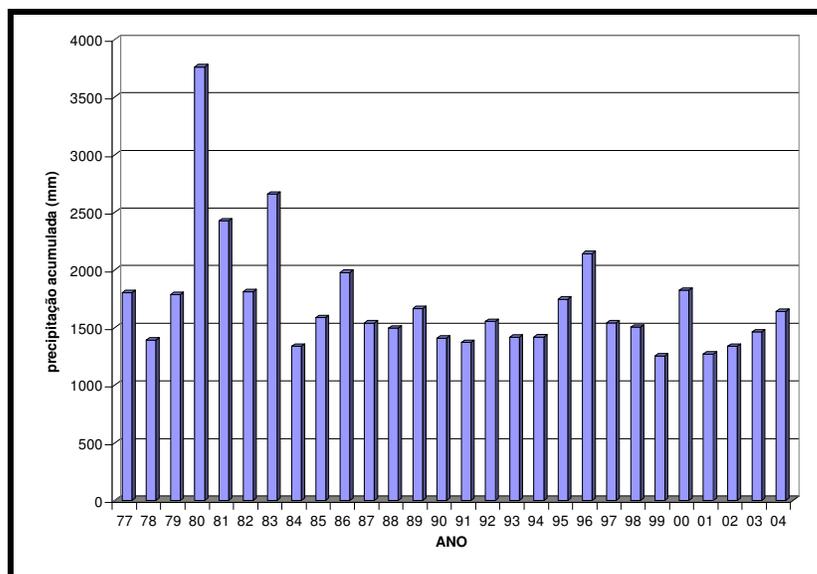


Figura 5.3 – Registro das precipitações anuais acumuladas de 1977 a 2004 (Fonte: LCA/INB).

Tabela 5.1 – Comparação entre as precipitações mensais (mm) da Estação M/1 e do INMET – anos 1980 e 1983.

MÊS	ESTAÇÃO M/1		ESTAÇÃO INMET	
	1980	1983	1980	1983
janeiro	793,4	500	350,3	459,5
fevereiro	365,5	306,4	199,1	304,2
março	167,6	210,2	ND	ND
abril	566,8	145,5	189,3	138,3
maio	75,4	178,9	ND	184,9
junho	188,4	90,9	ND	55,3
julho	0,1	51	ND	49,9
agosto	64,0	8,4	28,2	10,2
setembro	142,8	267,8	61,7	236,8
outubro	490,8	301,2	129,2	268,2
novembro	342,2	176,6	187,8	101,4
dezembro	564,6	422,3	376,9	400,8

ND – não disponível

No ano de 1980, verificam-se grandes diferenças entre as observações de chuva das duas estações. A constatação deste fato faz sugerir que as leituras de chuva na Estação M/1, relativas a este ano, possam ter sido comprometidas. Entretanto, no ano de 1983, os valores de precipitação mensal apresentam-se razoavelmente parecidos. Portanto, em virtude destas verificações, optou-se por descartar da análise somente os dados pluviométricos de 1980 da Estação M/1, mantendo-se os de 1983.

Há também registros mensais de mais três estações pluviométricas da INB, denominadas 017, 018 e 125, que distam aproximadamente 5 , 7 e 3,5 km do BF4, respectivamente (Figura 5.2). Porém, os dados disponíveis destas três últimas vão de janeiro de 1990 até os dias atuais.

Por essa razão, o grau de homogeneidade dos dados de pluviometria foi avaliado utilizando-se os registros da Estação M/2, a partir de janeiro de 1990, e das estações 017, 018 e 125. O método de análise empregado, denominado dupla massa, foi desenvolvido pelo Serviço Geológico Norte-Americano (*U. S. Geological Survey*) e é válido para séries mensais e anuais (Barbosa Jr., 2002). Ele consiste na construção de uma curva duplo acumulativa num gráfico cartesiano, que relaciona os totais anuais acumulados de uma das estações pluviométricas nas ordenadas, e a média acumulada dos totais anuais de todas as outras estações da região nas abcissas. A figura 5.4 apresenta o gráfico para a análise da consistência dos dados de precipitação da Estação M/2, em relação às estações 017, 018 e 125, no período de 1990 a 2004.

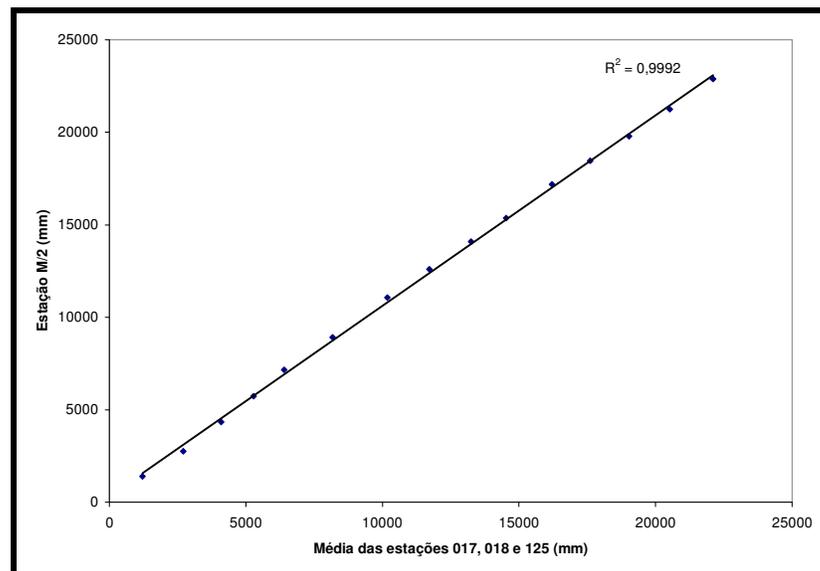


Figura 5. 4 – Análise de dupla massa (precipitações anuais acumuladas) – 1990 a 2004.

Como pode ser observado na Figura 5.4, os pontos do gráfico se ajustaram muito bem a uma única reta de tendência, o que foi evidenciado pelo fato do coeficiente de determinação ser muito próximo da unidade ($R^2 = 0,9992$). Isto indica que os dados de chuva obtidos na Estação M/2 são consistentes, ou seja, que não houve anormalidades

nesta estação pluviométrica e nem erros sistemáticos de operação dos aparelhos durante o período de observação.

Devido a não disponibilidade de dados de chuva de outras estações para o período anterior a 1990, não houve possibilidade de se empregar o método da dupla massa para a Estação M/1. Porém, com o intuito de se utilizar um maior número de dados pluviométricos na análise para torná-la mais representativa, foi feito um estudo semi-estatístico das precipitações anuais acumuladas das estações M/1 e M/2, separadamente. Acreditava-se, com este estudo, que seus resultados não fossem muito destoantes entre si e, assim, pudessem justificar a utilização conjunta dos dados das duas estações na análise. Apresentado na Figura 5.5, com exceção do ano de 1980, os valores das médias de cada estação são destacados (traço central de cada retângulo), bem como os intervalos compreendidos entre a média mais ou menos o desvio padrão (traços superior e inferior de cada retângulo, respectivamente).

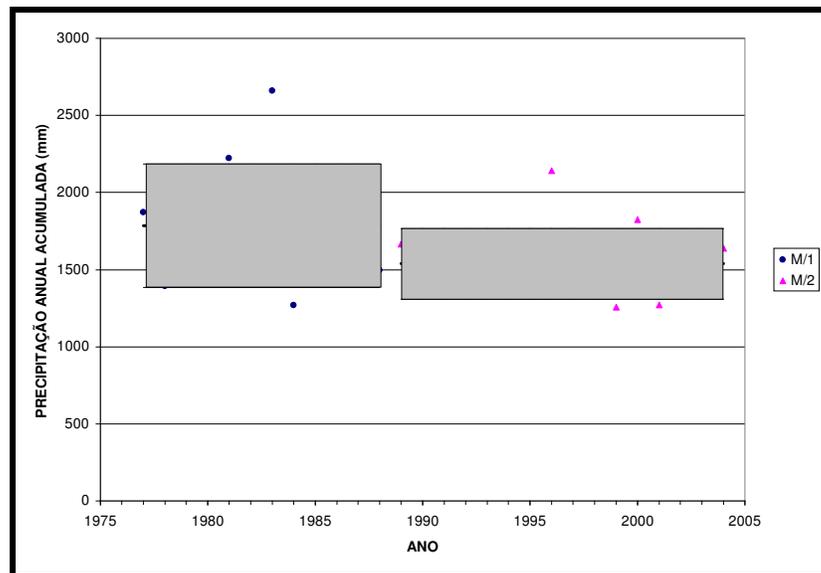


Figura 5.5 – Estudo semi-estatístico das precipitações anuais acumuladas das Estações M/1 e M/2.

Embora a dispersão seja maior entre os dados da Estação M/1 (maior desvio padrão), os valores médios, que são os objetos desta análise, não se mostraram muito diferentes, de modo que seus valores não resultariam em erros significativos quando utilizados sob o mesmo conjunto universo.

Dessa forma, considerando que os dados das estações M/1 e M/2 eram coerentes entre si e que a distância entre elas é relativamente pequena (Figura 5.2), optou-se por assumir que os seus dados corresponderiam à precipitação que efetivamente caiu sobre o BF4 durante o período de análise. Dessa forma, para efeito do presente trabalho, considerou-se os registros mensais a partir de janeiro de 1977 (Anexo I) provenientes destas estações, com exceção dos registros do ano de 1980. A Tabela 5.2 apresenta as médias mensais das precipitações referentes ao período mencionado, e a Figura 5.6 procura ilustrar a variação da magnitude dessas médias pluviométricas ao longo do ano. A análise destes valores indica a presença de duas estações marcantes: a de estiagem, compreendida entre os meses de abril e setembro, quando as precipitações mensais são menores que 100 mm/mês, e outra chuvosa, de outubro a março. O mês de janeiro se caracteriza como sendo o de maior intensidade pluviométrica, com média acima de 300 mm/mês, enquanto que o mês julho, o de menor intensidade, registrando média inferior a 25/mm/mês.

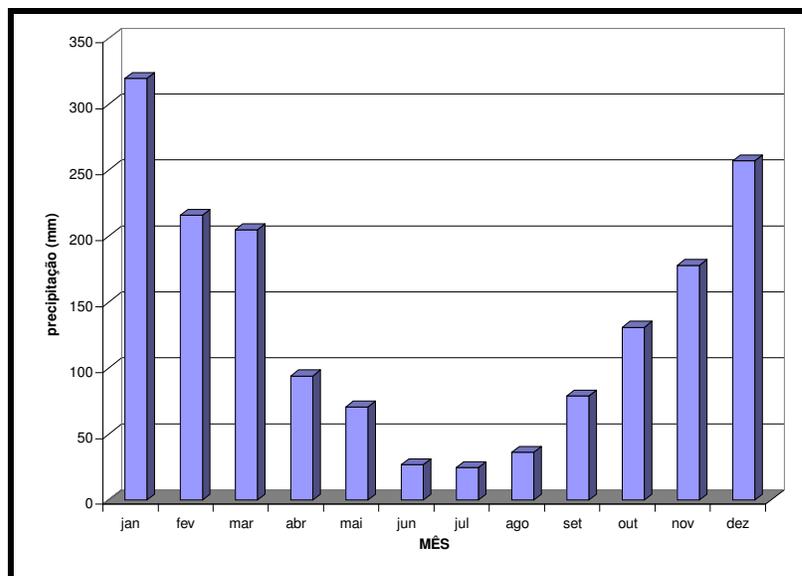


Figura 5. 6 – Variação do índice pluviométrico médio ao longo do ano (1977 a 2004).

Tabela 5. 2 – Índices pluviométricos mensais médios e média geral anual (1977 a 2004).

MÊS	MÉDIA (mm)
janeiro	319,44
fevereiro	215,75
março	204,82
abril	94,12
maio	70,50
junho	26,74
julho	24,49
agosto	36,32
setembro	79,11
outubro	131,01
novembro	177,93
dezembro	257,24
ANUAL	1637,48

5.3.2 – Evapotranspiração Potencial (ET_p)

Utilizando-se os dados históricos do monitoramento meteorológico do LCA/INB, mapas topográficos e geográficos da mina e dados de insolação fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi possível estimar o valor da ET_p segundo a equação de Penman. A determinação de todos os parâmetros pertinentes à ET_p está descrita nos sub-itens seguintes.

5.3.2.1 – Temperatura (T)

O manejo dos dados de temperatura fornecidos pelo LCA/ INB permitiu a obtenção de uma série histórica da Estação M/2 para o período de janeiro de 1997 a novembro de 2004. Esses dados, obtidos em média digital, estavam organizados em arquivos mensais, que registravam as temperaturas mínimas e máximas diárias. Dessa forma, foram realizadas as médias aritméticas diárias destas temperaturas e, por final, a média do mês. O conjunto das médias mensais, apresentado no Anexo II, originou a série das temperaturas na Estação M/2 ilustrada na Figura 5.7. A figura indica temperaturas mensais máximas oscilando entre 19 e 28 °C, mínimas entre 7 e 18 °C e as médias entre 13 e 22 °C. Os valores das médias mensais considerados no cálculo da evapotranspiração estão apresentados na Tabela 5.3. Como pode ser constatado, os meses de maio a agosto registraram médias inferiores a 17°C, caracterizando-se como o período frio para o local. Julho apresenta-se como o mês mais frio, com média

aproximada de 15 °C. Entre os meses de setembro a abril, as médias de temperatura se revelam mais brandas, alcançando a seu máximo no mês de janeiro, com 20,88 °C.

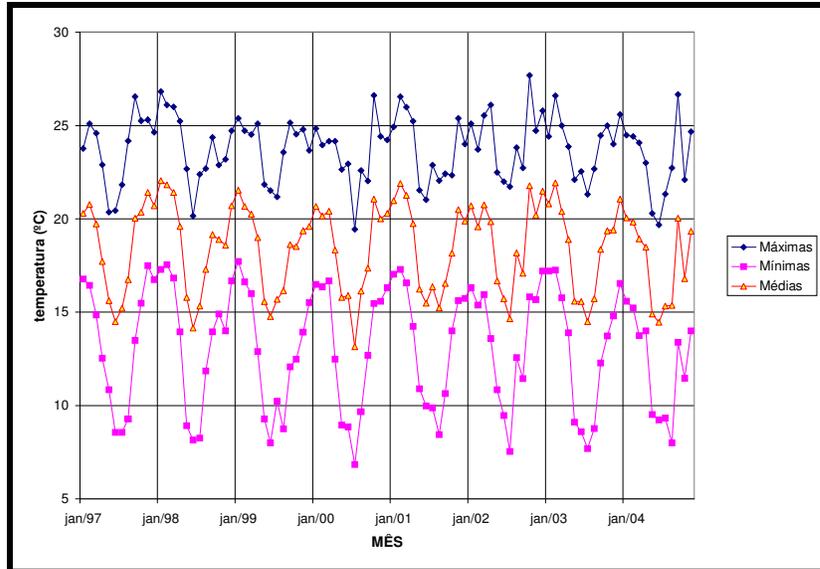


Figura 5.7 – Série histórica de temperaturas na Estação M/2 (01/1997 a 11/2004).

Tabela 5.3 – Médias mensais de temperatura (T) na Estação M/2 (01/1997 a 11/2004).

MÊS	T_{med} (°C)
janeiro	20,88
fevereiro	20,83
março	20,39
abril	18,95
maio	15,77
junho	15,07
julho	15,03
agosto	16,35
setembro	18,39
outubro	19,36
novembro	19,85
dezembro	20,53

5.3.2.2 – Umidade relativa do ar (UR)

Os dados referentes à umidade relativa do ar (UR) na Estação M/2, também fornecidos pelo LCA/ INB, são relativos ao período de janeiro de 1989 a fevereiro de 1998. Armazenadas em arquivos mensais, as leituras de UR eram realizadas diariamente

e obtidas em quatro diferentes horários do dia. Os valores mensais médios foram calculados através da média aritmética de todas as leituras efetuadas durante aquele mês. O Anexo III apresenta esses valores médios para o período citado.

Embora ocorra falta de dados para alguns meses, foi possível a obtenção das médias mensais de *UR*, conforme pode ser visualizado na Figura 5.8 e apresentado na Tabela 5.4. Conforme esta figura, os meses de julho a setembro configuram o período de seca no local do Complexo Mínero-Industrial de Poços de Caldas (CIPC), com médias mensais de *UR* inferiores a 85,5 %. Nos demais, estes valores superam 87 %. Os maiores índices de umidade são relativos ao mês de março, cuja média aritmética de *UR* atinge 91,51%.

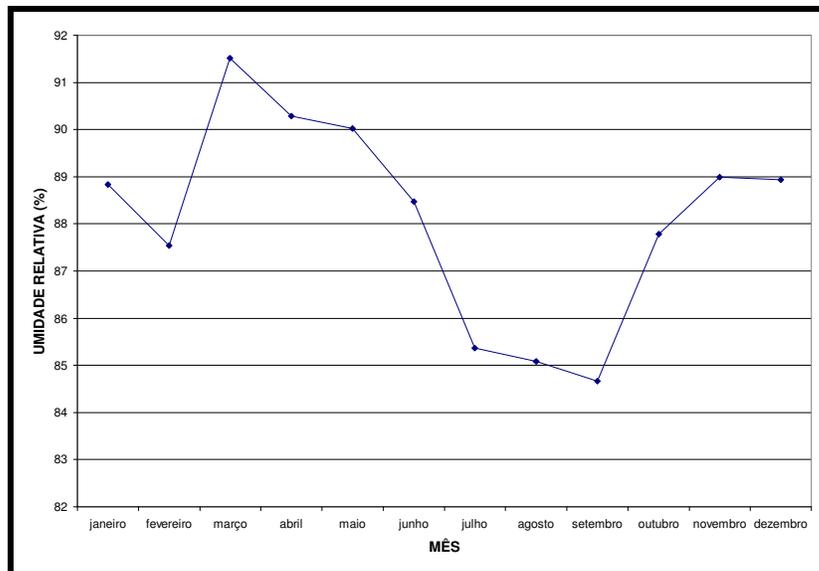


Figura 5. 8 – Evolução da umidade relativa do ar – médias mensais (01/1989 a 02/1998).

Tabela 5. 4 – Médias mensais de umidade relativa do ar (*UR*) na Estação M/2 (01/1989 a 02/1998).

MÊS	UR (%)
janeiro	88,84
fevereiro	87,53
março	91,51
abril	90,28
maio	90,03
junho	88,47
julho	85,37
agosto	85,08
setembro	84,67
outubro	87,78
novembro	88,98
dezembro	88,94

5.3.2.3 – Velocidade dos ventos (U_2)

Os dados de velocidade dos ventos utilizados neste trabalho são oriundos das interpretações das cartas de velocidade dos ventos que se encontram registradas no LCA/INB. Os períodos de dados já interpretados compreendem de janeiro de 1989 a abril de 1991, quando a estação estava instalada no Mirante ao lado da cava da mina (Estação M/1), de junho a dezembro de 1992 e de janeiro a dezembro de 1996, quando a estação já estava localizada no LCA/INB (Estação M/2). Nos registros mensais referentes à Estação M/1 constam dados diários de velocidade, expressos em km/h. A média aritmética destes valores diários resultou, portanto, na média relativa ao mês de observação. Os registros relativos à Estação M/2, obtidos nos relatórios da INB para os anos de 1992 e 1996, estão relacionados em forma de número de horas para cada classe de vento, que é definida de acordo com a intensidade. As médias de velocidade para cada mês do referido período foram então determinadas através de médias ponderadas, considerando-se a quantidade de horas de vento para cada classe. Dessa forma, os valores das médias para todos os meses do período citado foram reunidos e dispostos em tabelas, que estão apresentadas no Anexo IV.

Em termos gerais, as velocidades do vento na Estação M/2 são menores. Este fato pode ser constatado na Figura 5.9, que mostra a diferença entre as médias de U_2 quando se consideram os dados das Estações M/1 e M/2 em separado. Acredita-se que as condições de vento na Estação M/1 (Mirante) sejam mais parecidas com as condições reinantes no BF4, devido à maior proximidade entre ambos e à maior semelhança de topografia. Logo, os dados de velocidade dos ventos relativos à Estação M/2 foram descartados das análises.

Sendo assim, os valores de U_2 utilizados como parâmetros de entrada para a equação de Penman resultam da média dos valores mensais de velocidade para o período de registro da Estação M/1. A Tabela 5.5 apresenta os valores das médias mensais de U_2 na Estação M/1, em m/s.

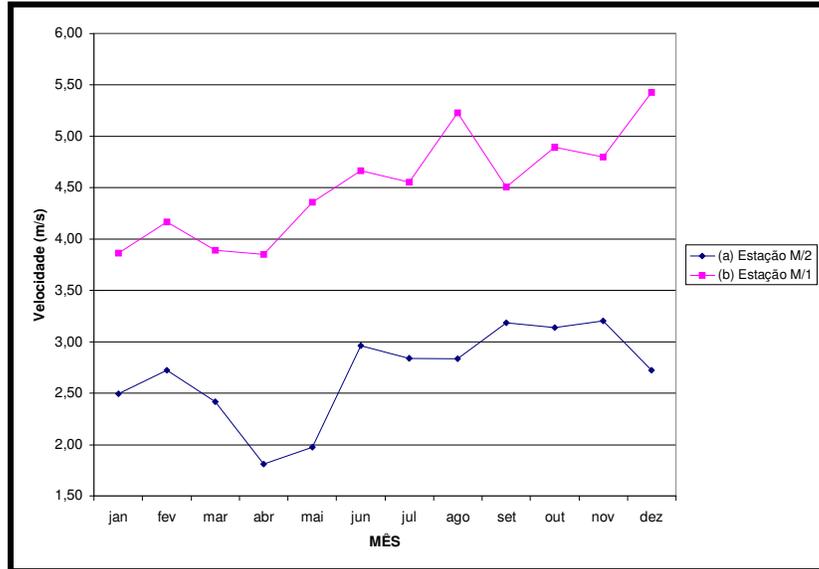


Figura 5.9 – Diferença entre as médias de U_2 : (a) Estação M/2; (b) Estação M/1.

Tabela 5.5 – Médias mensais de velocidade dos ventos (U_2) (Estação M/1 – Mirante – 01/89 a 04/1991).

MÊS	U_2 (m/s)
janeiro	3,87
fevereiro	4,16
março	3,89
abril	3,85
maio	4,36
junho	4,67
julho	4,55
agosto	5,23
setembro	4,51
outubro	4,89
novembro	4,80
dezembro	5,43

5.3.2.4 – Insolação (n)

Os dados de insolação foram gentilmente fornecidos pelo 5º Distrito de Meteorologia (5º DISME) do INMET. São dados obtidos de aparelhos denominados heliógrafos e relativos à estação meteorológica do INMET localizada no município de Caldas – MG, a cerca de 10 km da Mina Osamu Utsumi. O período destes dados está compreendido entre janeiro de 1989 e dezembro de 2004, e contempla as quantidades mensais de horas de insolação (Anexo V).

Para a obtenção do número efetivo de horas diárias de brilho solar, parâmetro n necessário na equação de Penman (equação 5.2), foram considerados os dados mensais divididos pelo número de dias correspondente ao mês de cada dado. Dessa forma, os valores mensais médios de n , utilizados para o balanço hídrico, derivam das médias aritméticas dos valores obtidos para os meses correspondentes do período mencionado. A Figura 5.10 destaca, em termos médios, a evolução do parâmetro n ao longo de um ano. De acordo com a figura, pode-se perceber que entre os meses de abril a setembro há uma maior incidência de radiação solar sobre a superfície na região. Acredita-se que este fato esteja relacionado à menor nebulosidade deste período, pois se trata de uma época de estiagem. Os valores de n podem ser observados na Tabela 5.6.

Tabela 5. 6 – Valores mensais médios de insolação diária – 01/89 a 12/04 (Fonte: INMET).

MES	n (horas)
janeiro	4,0
fevereiro	4,7
março	4,6
abril	6,2
maio	6,0
junho	6,0
julho	6,0
agosto	6,8
setembro	6,8
outubro	5,3
novembro	5,3
dezembro	4,5

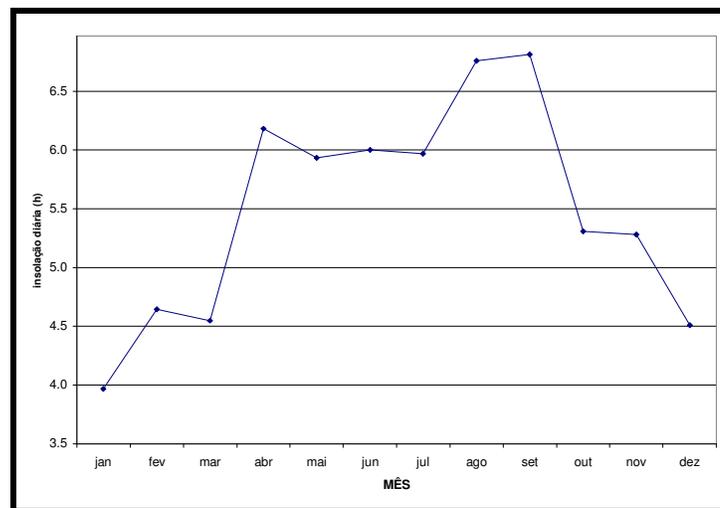


Figura 5. 10 – Variação do parâmetro n (insolação diária) ao longo do ano – valores médios (01/89 a 12/04).

5.3.2.5 – Outros parâmetros

Alguns dos valores utilizados na Equação de Penman (5.2) foram: a massa específica da água (ρ) e o seu calor latente de vaporização (L) valendo, respectivamente, $1,0 \text{ g/cm}^3$ e 590 cal/g ; a constante de Stefan-Boltzman (σ) equívale a $1,19 \times 10^{-7} \text{ cal/(cm}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{K}^4)$. Segundo Penman, os coeficientes b e c equívalem, respectivamente, a 0,1 e 0,9 (Barbosa Jr., 2002).

A pressão parcial de vapor saturado (e_s) é dependente da temperatura e foi determinada através da interpolação dos dados constantes do Anexo VI. Os valores mensais de e_s relativos às temperaturas mensais médias (Tabela 5.3) estão descritos na Tabela 5.7.

Os parâmetros α e β são variáveis de local para local e levam em consideração o conteúdo de vapor d'água na atmosfera, a altitude do terreno e a espessura das nuvens (Barbosa Jr., 2002). Neste estudo, pelo fato dos municípios de Lavras/MG e São Paulo/SP serem as localidades mais próximas à INB/Caldas que possuem referência a esses valores na literatura, optou-se por utilizar os parâmetros destas cidades. Dantas et al. (2003) determinaram que os valores de α e β para Lavras valem, respectivamente, 0,23 e 0,49. Já para São Paulo, Tucci (1993) indica que estes parâmetros são 0,24 e 0,58, respectivamente.

Tabela 5. 7 – Valores para pressão de saturação do vapor d'água (e_s).

MÊS	e_s (mm-Hg)
janeiro	18,53
fevereiro	18,47
março	17,98
abril	16,44
maio	13,45
junho	12,86
julho	12,82
agosto	14,08
setembro	15,65
outubro	17,26
novembro	17,47
dezembro	18,13

O albedo ou fator de reflectância (a) é um parâmetro de difícil determinação e varia de acordo com o tipo de superfície. Segundo Sellers (1965), para solos nus levemente arenosos o valor de a varia de 0,25 a 0,45. Para Tucci (1993), solos arenosos secos apresentam albedos variando entre 0,15 e 0,45. Demattê et al. (2004) estudaram o albedo de três classes de solo do estado de São Paulo e os resultados deste trabalho apontam uma variação do albedo de 0,30 a 0,35 para os solos Podzólicos Vermelho-Amarelo, talvez, entre os três solos estudados por aqueles autores, o que mais se pareça com o material disposto no BF4. Portanto, para realização deste trabalho foram feitas análises considerando-se especificamente estes dois últimos valores de albedo, isto é $a = 0,30$ e $a = 0,35$.

Os valores de radiação de ondas curtas no topo da atmosfera terrestre (R_t) e da duração máxima da insolação diária (N) dependem da latitude e da época do ano. O mapa regional da mina, fornecido pela INB, indica que o BF4 está situado a $21^{\circ}56'15''$ de latitude sul e $46^{\circ}29'30''$ de longitude oeste. Interpolando-se os valores das tabelas de R_t e N fornecidas em Barbosa Jr. (2002) (Anexos VII e VIII) chega-se aos valores mensais destas variáveis para a latitude mencionada, conforme mostrado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Valores de R_t e N aplicados para o BF4.

MÊS	R_t (cal/cm².dia)	N (h)
janeiro	991	13,4
fevereiro	932	12,8
março	826	12,2
abril	703	11,6
maio	591	11,1
junho	544	10,8
julho	573	10,9
agosto	662	11,3
setembro	791	12,0
outubro	897	12,6
novembro	968	13,2
dezembro	991	13,5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ET_p)

Em função de todo universo de dados meteorológicos disponíveis, as variáveis relativas à Equação de Penman (5.2) puderam ser determinadas com razoável precisão. Sendo assim, este método de estimativa de ET_p foi empregado neste trabalho e seus resultados, obtidos através dos parâmetros mensais médios anteriormente detalhados no Capítulo 5, estão explicitados na Tabela 6.1, segundo os diferentes valores de α , β e de a (albedo) utilizados.

Tabela 6. 1 – Evapotranspiração potencial mensal (mm) segundo os valores de α , β e de a (albedo) adotados.

MÊS	$\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$		$\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$	
	(A) $a = 0,30$	(B) $a = 0,35$	(C) $a = 0,30$	(D) $a = 0,35$
janeiro	90,61	83,74	100,03	92,49
fevereiro	86,94	80,59	96,28	89,26
março	84,09	77,83	93,37	86,45
abril	71,64	65,68	81,5	74,84
maio	55,08	50,17	63,22	57,73
junho	54,76	50,39	62,08	57,18
julho	54,37	49,64	62,26	56,97
agosto	80,25	74,34	90,37	83,74
setembro	95,26	88,43	106,76	99,11
outubro	105,53	98,46	116,39	108,55
novembro	95,76	88,52	106,72	98,7
dezembro	102,14	95,01	112,31	104,44

Segundo as análises realizadas, outubro corresponde ao mês que apresenta as maiores médias de evapotranspiração potencial. Já as menores foram constatadas no

mês de julho, com exceção da análise que considerou $\alpha = 0,24$, $\beta = 0,58$ e $a = 0,30$, cuja menor verificação ocorre em junho.

Contudo, estes resultados expressam somente os valores de evapotranspiração potencial no BF4, uma vez que não haviam informações suficientes e confiáveis de lisímetros, nem de variação do volume de água acumulado (ΔV_{EC}) no BF4 para a avaliação da evapotranspiração real.

Considerando-se que a região do BF4 possui um alto índice pluviométrico relativo (maior que 1600 mm/ano), acredita-se que haja disponibilidade hídrica no solo passível de evapotranspiração durante todo o ano. Nestas condições, como definido no item 4.4.2, espera-se que os valores de evapotranspiração potencial possam representar os valores reais com grande aproximação.

A Tabela 6.2 apresenta as diferenças em porcentagem entre os resultados de ET_p para dois tipos de análises: 1^a) quando se variam os parâmetros α e β , mantendo-se o valor do albedo fixo; 2^a) quando se fixam α e β , variando-se somente o albedo. Desse modo, tendo em vista os resultados da Tabela 6.1, a análise (1-a) relaciona-se à comparação entre as colunas A e C desta tabela. Seguindo o mesmo procedimento, (1-b) refere-se à análise das colunas B e D ; a análise (2-a) representa a comparação das colunas A e B, e (2-b) das colunas C e D.

De acordo com a Tabela 6.2, as diferenças médias entre os resultados mensais de ET_p situam-se em torno de 10,8 % para as análises (1-a) e (1-b), e de 7,6 % para as análises (2-a) e (2-b). Observando-se estas diferenças através do gráfico da Figura 6.1, nota-se que a sensibilidade do modelo empregado é maior para as análises do tipo (1). Em outras palavras, a alteração dos valores de α e β influencia em maior escala os resultados finais de ET_p , logicamente considerando-se os parâmetros que foram estimados neste trabalho e os parâmetros baseados em estudos de outros pesquisadores (ver item 5.3.2.5).

Tabela 6. 2 – Diferenças em porcentagem entre os valores de ET_p quanto às análises (1-a), (1-b), (2-a) e (2-b).

MÊS	DIFERENÇAS (%)							
	(1-a)	cls	(1-b)	cls	(2-a)	cls	(2-b)	cls
	A e C		B e D		A e B		C e D	
janeiro	9,42		9,46		7,58		7,54	
fevereiro	9,70		9,71		7,30		7,29	
março	9,94		9,97		7,44		7,41	
abril	12,10		12,24		8,32		8,17	
maio	12,88		13,10		8,91		8,68	
junho	11,79		11,87		7,98		7,89	
julho	12,67		12,87		8,70		8,50	
agosto	11,20		11,23		7,36		7,34	
setembro	10,77		10,78		7,17		7,17	
outubro	9,33		9,30		6,70		6,74	
novembro	10,27		10,31		7,56		7,51	
dezembro	9,06		9,03		6,98		7,01	

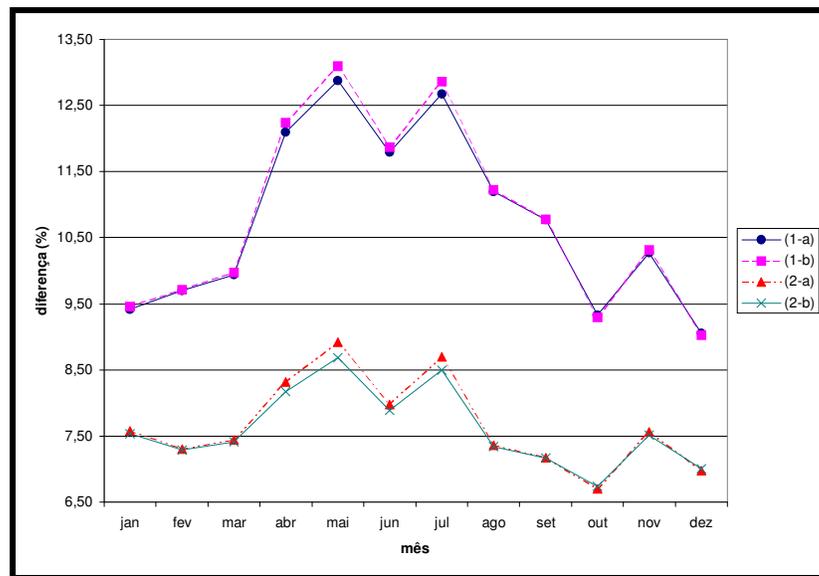


Figura 6. 1 – Diferenças em porcentagem entre os valores mensais de ET_p segundo as análises (1-a), (1-b), (2-a) e (2-b).

Outro fato que pode ser percebido é a semelhança de aspecto entre as curvas que representam as análises mencionadas (Figura 6.1). Esta semelhança se deve ao fato de tanto α e β , quanto o albedo (a) influenciarem a mesma parcela da equação (5.4), que é utilizada para a determinação da radiação efetivamente absorvida pela superfície (R_{liq}). Nesta equação, que resulta do balanço de energia, α e β atuam no sentido de representar

a “perda” de radiação solar devido à presença da atmosfera, enquanto a procura considerar a quantidade de radiação perdida por reflexão na superfície.

6.2 – DIFERENÇA $[P - ET_p]$ NO BF4

Como foi abordado no item 4.4, o conceito da infiltração (I) surge na equação do balanço hídrico quando da hipótese da superfície representar o volume de controle que se pretende estudar. Porém, na outra hipótese, que contempla a consideração do subsolo e que foi adotada neste trabalho, a variável I não aparece. No entanto, uma vez que os escoamentos superficiais no BF4 foram desprezados e subtraídos da equação do balanço hídrico, optou-se por considerar que a taxa de precipitação (P) subtraída da evapotranspiração potencial (ET_p) seja igual à infiltração, ou seja, a passagem de água da superfície para o interior do solo.

Portanto, uma vez que se estabeleça um regime de fluxo permanente no BF4, todo o volume infiltrado deveria atingir a água subterrânea e, a partir de seu fluxo, alcançar a base do BF4 (BNF) ou outros caminhos de percolação da água subterrânea. Desta forma, caso este volume seja inferior ao volume coletado na BNF, haveria, em tese, contribuição de água subterrânea de outras origens para a geração da drenagem ácida no BF4. De modo inverso, se o volume infiltrado superasse o coletado na BNF, o excedente líquido estaria percolando para outros locais, contribuindo para alimentar bacias adjacentes.

As Tabelas 6.3 e 6.4 mostram, respectivamente, os resultados de infiltração ($P - ET_p$) para $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$, e para $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$. Como pode ser verificado, os resultados apresentam valores negativos de infiltração para os meses de junho a setembro. Isto significa que a ET_p supera, em magnitude, os índices pluviométricos deste período. Em outros termos, diz-se que o fluxo de água que adentra ao solo através da precipitação é inferior àquele que sai sob a forma de vapor, estimulado pelos processos energéticos e aerodinâmicos anteriormente descritos.

Caso as análises do balanço hídrico fossem elaboradas mensalmente, o termo de variação do volume de água no solo ΔV_{EC} , previsto na equação (4.3), deveria ser contabilizado. Neste sentido, os resultados apontam uma tendência de que esta variação

ΔV_{EC} seria negativa para o período de junho a setembro, representando decréscimo de água no volume de controle.

Tabela 6.3 – Infiltração ($P - ET_p$) no BF4 para $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$, segundo os valores de albedo adotados.

MÊS	P (mm)	ET _p (mm)		I (mm)	
		a = 0,30	a = 0,35	a = 0,30	a = 0,35
janeiro	319,44	90,61	83,74	228,83	235,70
fevereiro	215,75	86,94	80,59	128,81	135,16
março	204,82	84,09	77,83	120,73	126,99
abril	94,12	71,64	65,68	22,48	28,44
maio	70,50	55,08	50,17	15,42	20,33
junho	26,74	54,76	50,39	-28,02	-23,65
julho	24,49	54,37	49,64	-29,88	-25,15
agosto	36,32	80,25	74,34	-43,93	-38,02
setembro	79,11	95,26	88,43	-16,15	-9,32
outubro	131,01	105,53	98,46	25,48	32,55
novembro	177,93	95,76	88,52	82,17	89,41
dezembro	257,24	102,14	95,01	155,10	162,23
a - albedo estudado		Σ		661,05	734,68

Tabela 6.4 - Infiltração ($P - ET_p$) no BF4 para $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$, segundo os valores de albedo adotados.

MÊS	P (mm)	ET _p (mm)		I (mm)	
		a = 0,30	a = 0,35	a = 0,30	a = 0,35
janeiro	319,44	100,03	92,49	219,41	226,95
fevereiro	215,75	96,28	89,26	119,47	126,49
março	204,82	93,37	86,45	111,45	118,37
abril	94,12	81,5	74,84	12,62	19,28
maio	70,50	63,22	57,73	7,28	12,77
junho	26,74	62,08	57,18	-35,34	-30,44
julho	24,49	62,26	56,97	-37,77	-32,48
agosto	36,32	90,37	83,74	-54,05	-47,42
setembro	79,11	106,76	99,11	-27,65	-20,00
outubro	131,01	116,39	108,55	14,62	22,46
novembro	177,93	106,72	98,7	71,21	79,23
dezembro	257,24	112,31	104,44	144,93	152,80
a - albedo estudado		Σ		546,19	628,02

As Figuras 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 mostram, segundo os dois valores de albedo adotados ($a = 0,30$ e $a = 0,35$), as médias mensais de P e ET_p e também a evolução mensal da diferença destes dois parâmetros que, teoricamente, corresponderia à infiltração (I). As duas primeiras figuras referem-se aos valores $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$, e as duas últimas, aos valores $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$.

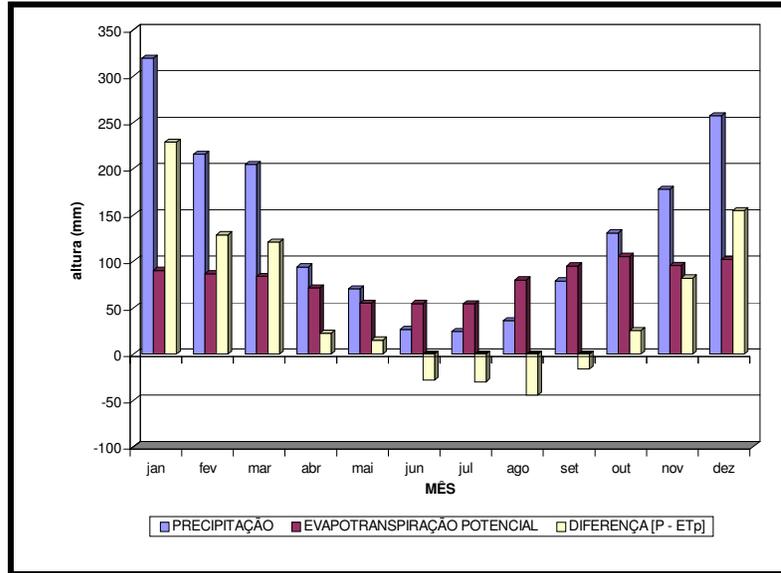


Figura 6. 2 - Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,30$) – $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$.

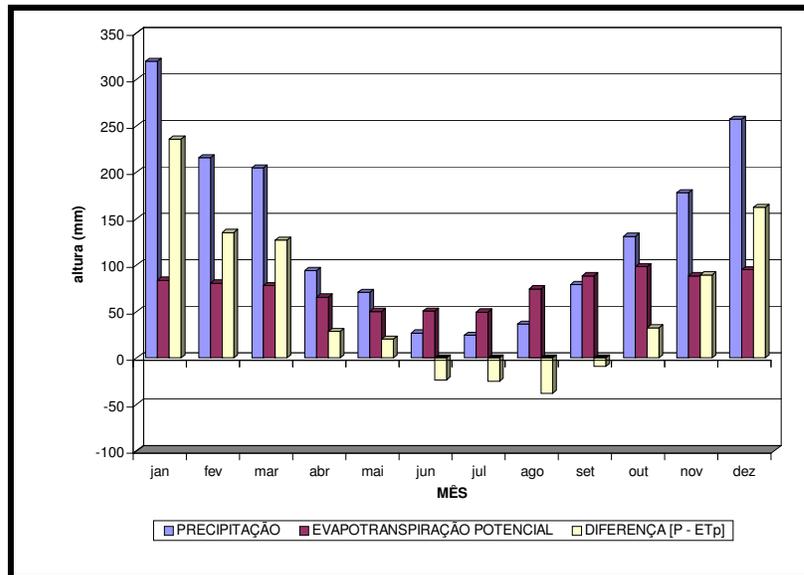


Figura 6. 3 - Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,35$) – $\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$.

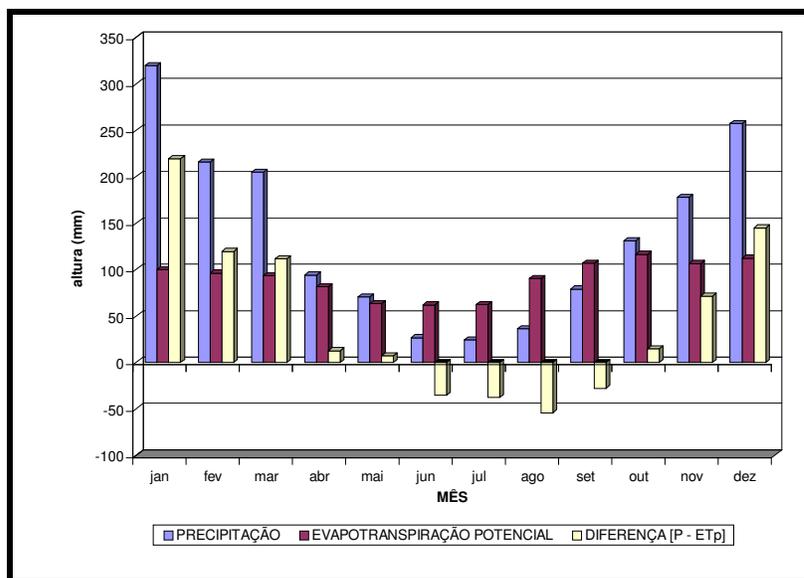


Figura 6.4 - Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,30$) – $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$.

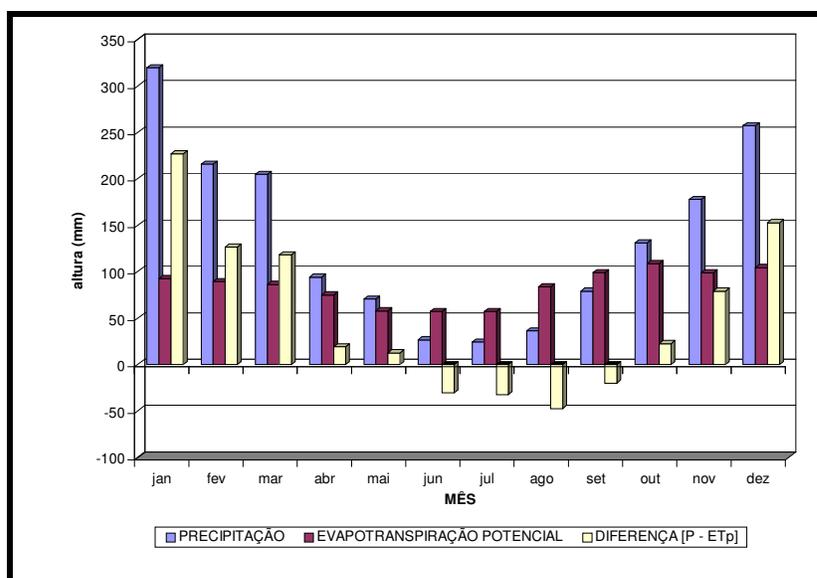


Figura 6.5 - Comparação entre as médias mensais de P e ET_p ($a=0,35$) – $\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$.

As figuras 6.2 a 6.5 ilustram o comportamento mensal de ET_p e $I(P - ET_p)$ diante da variável P , que foi anteriormente representada na Figura 5.6. Percebe-se, através delas, que as variações mensais de ET_p são inferiores às variações de P . Outro fato observado é que, assim como a precipitação, os valores de evapotranspiração também sofrem diminuição durante o período de estiagem, caracterizado no item 5.3.1

como sendo entre os meses de abril e setembro. Porém, em termos absolutos, estas variações são menores que as encontradas para P .

As variações ocorrem até que, de junho a setembro, os resultados de ET_p superam os índices pluviométricos médios. Esta constatação torna-se um indicativo de que, durante este período, o solo da região do BF4 se desatura, ou seja, perde água, caracterizando variações negativas do volume de água acumulado no solo (V_{EC}), como citado anteriormente. Entretanto, nos outros meses, em que P supera ET_p , ocorre o inverso, isto é, as variações ΔV_{EC} tendem a se tornarem positivas.

Porém, devido às dificuldades já abordadas de determinação dos valores mensais de ΔV_{EC} no BF4, optou-se pela realização de uma análise anual, que prevê que a soma das variações positivas e negativas do volume de água acumulado no solo tende a se anular numa consideração de longo período. Sendo assim, a expressão (4.3) pôde ser redefinida, resultando na equação (5.1) que será posteriormente avaliada no item 6.4.

Na análise anual, os somatórios dos valores mensais de I , também explícitos nas Tabelas 6.3 e 6.4, foram realizados para as quatro situações hipotéticas estudadas. Os resultados apontam diferenças de 10,02 % (Tabela 6.3) e 13,03 % (Tabela 6.4) quando se fixam α e β e modifica-se a . Já quando se variam α e β e fixa-se a (entre tabelas), essas diferenças alcançam 17,38 % e 14,52 % quando a é igual a 0,30 e a 0,35, respectivamente. Diante disto, dentre os parâmetros estimados neste trabalho, constata-se novamente que α e β são aqueles que mais influenciam os resultados do modelo adotado.

6.3 – VAZÃO MEDIDA NA BNF (G_{out})

Assumiu-se que os dados de G_{out} obtidos na INB/Caldas corresponderiam aos registros mensais médios na base do BF4 (BNF), durante o período de janeiro de 1998 a agosto de 2004 (Anexo IX). Estes dados foram determinados por funcionários da empresa através de medição direta, que consistia da contagem do tempo gasto para o preenchimento de tambores, cujos volumes eram previamente conhecidos. Efetuado mensalmente, este procedimento permitia o cálculo da vazão instantânea, que era então generalizada como sendo a vazão média mensal drenada durante aquele mês, em m^3/h .

Disponibilizados estes dados, foram realizadas as médias aritméticas de vazão para os meses correspondentes do período mencionado. A partir daí, considerando-se o número de dias de cada mês, os volumes médios mensais escoados na base do BF4 (BNF) foram obtidos. A Tabela 6.5 apresenta estes valores mensais de G_{out} , em $m^3/mês$, além do volume anual médio coletado na BNF.

Tabela 6.5 – Volumes médios mensais e anual médio de G_{out} coletados na BNF (01/1998 a 08/2004).

MÊS	VOLUME (m³)
janeiro	49986,17
fevereiro	48748,80
março	53621,14
abril	49453,71
maio	50007,43
junho	45617,14
julho	47541,60
agosto	43779,09
setembro	40488,00
outubro	40932,40
novembro	42312,00
dezembro	46016,40
ANUAL	558503,89

Observando estas médias mensais através do gráfico da Figura 6.6, nota-se a existência de um período com menores vazões, entre os meses de agosto a novembro, e de outro cujos volumes mensais drenados são mais elevados, de dezembro a julho. A constatação desta flutuação anual das vazões faz suscitar uma correspondência à sazonalidade dos períodos chuvosos, descritos no item 5.3.1.

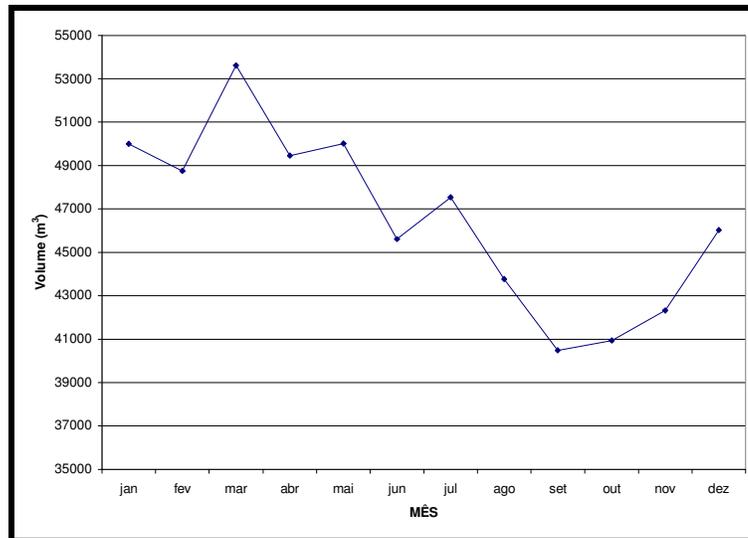


Figura 6.6 – Flutuação anual dos volumes médios mensais G_{out} drenados na BNF (01/1998 a 08/2004).

6.4 – COMPARAÇÃO DE VALORES – BALANÇO HÍDRICO

Como os valores de G_{out} foram obtidos em volume, houve a necessidade de multiplicar o termo $[P - ET_p]$, definido em altura, pela área A da microbacia do BF4, avaliada em torno $834.778,6 \text{ m}^2$, de modo a homogeneizar as dimensões dos termos. Desse modo, a expressão do balanço hídrico (5.1), aplicada ao BF4, foi reescrita da seguinte forma:

$$[P - ET_p] \cdot A + G_{in} = G_{out} \quad (6.1)$$

A primeira parcela da equação (6.1) resulta numa quantidade teórica correspondente ao volume de água de chuva que entra na microbacia em um ano. Deste modo, observando-se os resultados obtidos nas Tabelas 6.3 e 6.4 para o somatório $\Sigma [P - ET_p]$, foram feitas as comparações destes volumes obtidos de forma empírico-teórica com o volume anual médio acumulado e escoado na BNF (G_{out}) (Tabela 6.5). Estas comparações, obtidas para os diferentes valores de α , β e a , estão descritas nas Tabelas 6.6 e 6.7.

Tabela 6. 6 – Comparação entre os volumes médios acumulados na BNF e os volumes de infiltração obtidos do balanço hídrico do BF4 ($\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$).

VOLUME ANUAL NA BNF (m ³)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (m ³)		DIFERENÇA (%)	
	a = 0,30	a = 0,35	a = 0,30	a = 0,35
558503,89	551828,83	613293,58	1,20	-9,81

Tabela 6. 7 – Comparação entre os volumes médios acumulados na BNF e os volumes de infiltração obtidos do balanço hídrico do BF4 ($\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$).

VOLUME ANUAL NA BNF (m ³)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (m ³)		DIFERENÇA (%)	
	a = 0,30	a = 0,35	a = 0,30	a = 0,35
558503,89	455946,17	524256,10	18,36	6,13

De antemão, as diferenças reveladas nas duas tabelas acima referem-se, de acordo com a abordagem deste trabalho, à parcela G_{in} da equação (6.1). Quando positivas, as diferenças indicam a existência de contribuições hídricas subterrâneas para o volume de controle analisado, no caso, o BF4. De modo inverso, isto é, quando negativas, fugas subterrâneas para outras bacias adjacentes podem estar ocorrendo.

A Tabela 6.6 mostra valores bastante concordantes entre os referidos volumes, revelando diferenças da ordem de -9,81 a 1,20%. Esta comparação evidencia claramente a contribuição efetiva da precipitação no topo do BF4 para o escoamento na BNF, considerando-se todos os possíveis erros pertinentes ao cálculo do Balanço Hídrico e o fluxo permanente no interior do BF4. Na Tabela 6.7, os resultados indicam que, embora possa haver alguma contribuição de outras fontes, ou seja G_{in} positivo, esta não ocorre de maneira tão significativa, sendo menor que 18,36%.

Ressalta-se novamente as considerações assumidas nos cálculos feitos anteriormente:

- o escoamento superficial como sendo nulo;
- a evapotranspiração potencial como sendo igual à evapotranspiração real;
- a variação anual do volume de água acumulado no solo (ΔV_{EC}) sendo nula;
- a vazão na BNF como sendo o único ponto exutório da microbacia do BF4, correspondendo ao escoamento subterrâneo total na microbacia (G_{out}).

Da mesma forma, outras hipóteses são passíveis e dentre elas a hipótese da existência de um regime hídrico subterrâneo permanente, onde haveria entrada de água de bacias adjacentes (G_{in}) e saída para outras bacias (G_{out}) através de outros pontos, que

não a vazão na BNF. Se tal hipótese for correta, haveria uma pluma ácida de contaminação a jusante da BNF, de acordo com a conformação do terreno em vale e uma vez que, comprovadamente, o BF4 gera drenagem ácida. O monitoramento das águas superficiais no entorno na INB não demonstra esta contaminação, o que sugere que a hipótese acima não seja verdadeira.

De qualquer forma, estudos mais profundos sobre o regime hídrico e sobre a qualidade da água subterrânea no vale a jusante do BF4 poderão comprovar melhor o que foi afirmado ao fim do parágrafo anterior.

Numa tentativa de se avaliar a relação hídrica entre a vazão na BNF e a precipitação, foram feitas correlações, como se seguem nos itens 6.5 e 6.6 seguintes. A existência desta relação hídrica poderia reforçar a sugestão da maior contribuição da precipitação para a vazão na BNF, como sugerido pelos resultados das Tabelas 6.6 e 6.7, e confirmar as hipóteses sugeridas para o balanço hídrico executado.

6.5 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO (P) E VAZÃO NA BNF (G_{out})

A Figura 6.7 apresenta, em conjunto, os gráficos da precipitação no CIPC (em azul) e de vazão real na bacia BNF (em rosa). Na tentativa de correlacionar as flutuações mensais de vazão com as estações chuvosa e de estiagem, o ordenamento dos pontos de inflexão mais destacados de ambos os gráficos foi adotado de modo a simplificar a abordagem. Os pontos ordenados numericamente referem-se aos de valores máximos enquanto que os de ordem alfabética, aos de valores mínimos. Aqueles assinalados com apóstrofe (') designam os pontos de destaque na curva de vazões. Adotando-se este artifício, procurou-se fazer comparações entre os pontos correspondentes de ambos os gráficos.

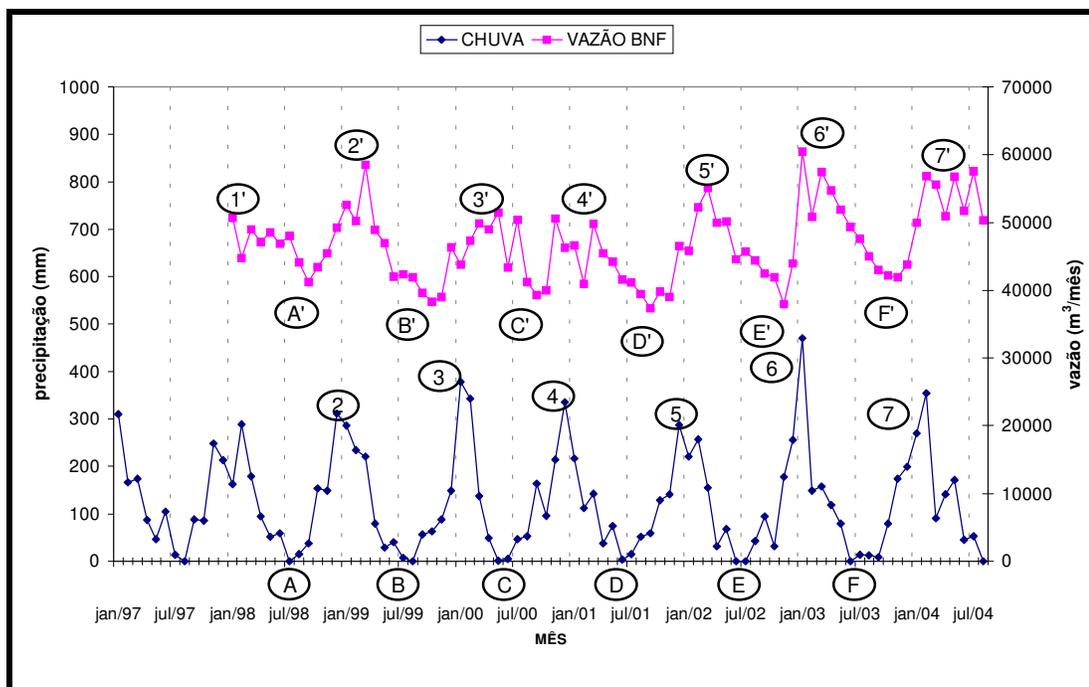


Figura 6.7 – Correlação da precipitação com a vazão na BNF – período de 01/1997 a 08/2004.

Em termos de forma, é possível notar algumas semelhanças de comportamento entre alguns trechos correlacionados dos gráficos. O trecho compreendido entre os pontos A' e 2' (A' – 2'), por exemplo, apresenta aspecto parecido com o trecho (A – 2), porém com aproximadamente dois ou três meses de retardo. A mesma observação pode ser feita também entre os trechos (2' – B') e (2 – B), (D' – 5') e (D – 5), (5' – E') e (5 – E). Já os demais trechos não apresentaram uma analogia de comportamento bem definida.

Dentre os pontos de vazões mínimas (A' a F'), verifica-se uma tendência geral deles se situarem em torno de 40000 m³/mês. Percebe-se também que os picos mínimos de vazão tendem a ocorrer depois de dois ou três meses após os picos mínimos de precipitação, considerado o tempo de retardo (*lag time*) para as vazões mínimas.

Entretanto, as correlações entre os valores máximos de precipitação e de vazão não se mostraram muito claras através dos gráficos. Como exemplo, os pontos de máxima 1', 3', 4' e 7' não revelaram picos bem definidos, apresentando oscilações que, possivelmente, estão associadas a erros de medição ou da generalização mensal das vazões, mencionadas no item 6.3.

Em outra constatação, o pico de vazão 3' atingiu valores inferiores ao pico anterior (2'), mesmo com o pico de precipitação 3 sendo superior ao 2. O mesmo fato pode ser também observado entre os pontos 4 – 4' e 5 – 5'. Porém, desconsiderando-se os pontos que podem conter erros de verificação – 1', 3', 4', e 7' – , encontra-se similaridade quanto à elevação dos picos para os pontos correspondentes 2 – 2', 5 – 5' e 6 – 6'. Quanto ao tempo de retardo, somente os pontos 1', 6' e 7' não evidenciaram a sua existência. Para os demais picos de vazão máxima, inclusive aqueles mal definidos na figura, o tempo de retardo foi de dois a três meses em relação ao seu correspondente de precipitação, assim como para os picos mínimos.

As correlações positivas entre a vazão na BNF e a precipitação média mensal, principalmente para os picos de mínimos, reforçam as hipóteses assumidas e as interpretações feitas para os resultados obtidos no balanço hídrico do BF4.

6.6 – CORRELAÇÃO ENTRE P E OS NÍVEIS DO PIEZÔMETRO BF4PT03

No corpo do BF4 foram instalados três piezômetros com o intuito de se monitorar periodicamente a sua estabilidade física. Os registros das observações mensais destes piezômetros, denominados BF4PT01, BF4PT02 e BF4PT03, se estendem de abril de 2000 a maio de 2002. Contudo, somente os dados referentes ao BF4PT03 não apresentaram interrupções de leitura durante este período. Desta forma, somente este último piezômetro foi correlacionado com a precipitação média mensal.

A construção dos piezômetros ocorreu com a perfuração de poços, que se estenderam verticalmente do topo do BF4, atravessando todo o material depositado (estéril), até uma certa profundidade do terreno original. Os poços foram revestidos com tubos lisos de aço e com diâmetro de 6", sendo o espaço anular compreendido entre o revestimento e as paredes do furo preenchido com pasta de cimento. O piezômetro BF4PT03, em particular, foi construído de acordo com as características apresentadas na Tabela 6.8 (MDGEO, 2000b).

Tabela 6. 8 – Perfuração e revestimento usados no piezômetro BF4PT03.

Perfuração			Revestimento
Diâmetro	Intervalo (m)	Material	
12 ¹ / ₄ "	0 a 25	Estéril	Aço galvanizado DIN 2440 Diâmetro de 6' ' Intervalo revestido: 0 a 30,50 m
9 ¹ / ₂ "	25 a 27	Rocha sã	
8 ¹ / ₂ "	27 a 30	Rocha sã	
6"	30 a 110	Rocha sã	

Construído numa determinada cota (h_e), o piezômetro revela as cargas de pressão (h_p) da camada onde foi instalado. Como mencionado no item 4.4.5, a carga hidráulica total equivale à soma das duas anteriores, ou seja, $h = h_e + h_p$. No caso do piezômetro BF4PT03, as leituras obtidas demonstram as cargas hidráulicas totais (h) na base do BF4, sendo suas oscilações associadas diretamente às oscilações da carga de pressão (h_p) nesta camada, sendo um reflexo direto das elevações ou rebaixamentos do nível freático (NA) no BF4.

As correlações entre os dados de precipitação e as leituras efetuadas no piezômetro BF4PT03 foram feitas de forma análoga às do item anterior. Porém, os pontos de destaque relativos às observações no piezômetro foram assinalados com apóstrofes duplos (Figura 6.8).

As análises pontuais nesta figura não revelaram correlações nítidas, uma vez que os pontos correspondentes em destaque não apresentaram flutuações proporcionais. Por exemplo, o ponto do nível 4" mostrou -se mais elevado que o ponto 3" e, no entanto, o ponto 4 (correspondente de precipitação ao ponto 4") foi inferior ao ponto 3 (correspondente de precipitação ao ponto 3"). O mesmo tipo de observação pode ser feito para os pontos correspondentes de mínimo. Deve-se ressaltar ainda que a pouca correlação encontrada entre os pontos do gráfico pode estar associada ao pequeno número de registros piezométricos disponíveis ou mesmo aos possíveis erros de leitura dos níveis ocorridos durante o processo de monitoração do piezômetro.

Porém, observando-se os dois gráficos quanto à forma, é possível verificar semelhanças entre ambos durante o período comum de registros. Como pode ser visualizado, o nível constatado no piezômetro acompanhou as oscilações sazonais de precipitação durante a maior parte do tempo de observação, porém com três ou quatro

meses de retardo. Este retardo supera em aproximadamente um mês aquele encontrado no item 6.5, através da correlação chuva-vazão.

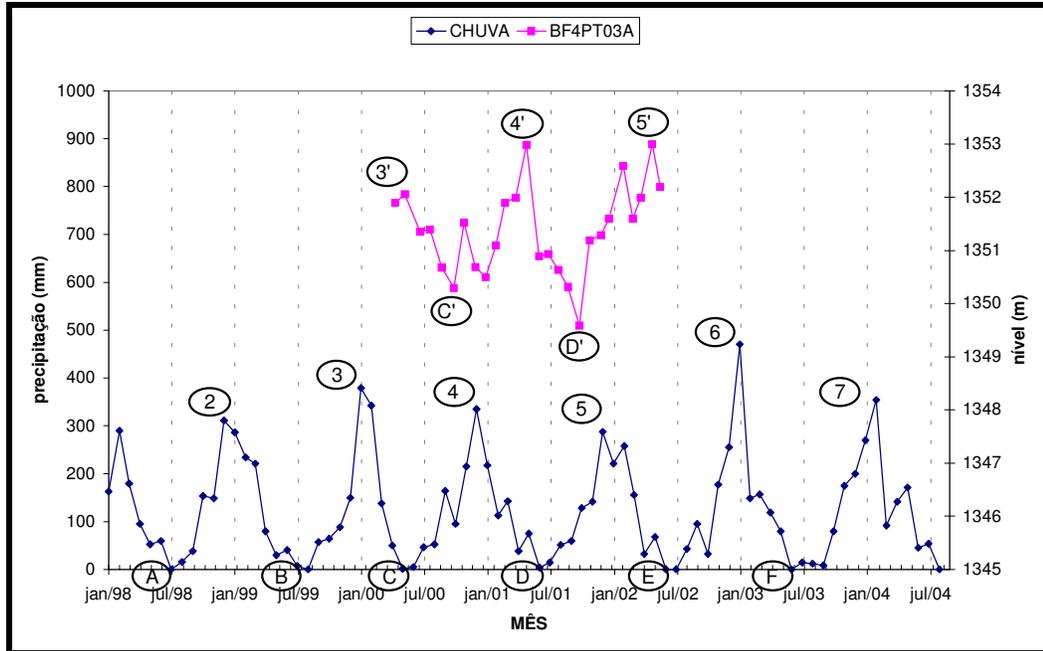


Figura 6.8 – Correlação da precipitação com as leituras efetuadas no piezômetro BF4PT03 (04/2000 a 05/2002).

Segundo Freeze e Cherry (1979), existe um *lag time* caracterizado entre o momento da flutuação da carga h e a sua correspondente leitura no piezômetro. Este *lag time* é tanto maior quanto maior for o volume de água a se percolar pela superfície não revestida do piezômetro, por reflexo desta flutuação. Desta forma, quanto maior o diâmetro do tubo do piezômetro e menor a permeabilidade da camada onde ele se situa, maior será o *lag time*.

Uma vez que o diâmetro do tubo pode ser considerado grande (6") e que o solo do terreno original do BF4 aparenta possuir média condutividade hidráulica (presença de argila e boa graduação), o período de aproximadamente um mês de diferença verificado entre as correlações dos itens 6.5 e 6.6 pode estar associado ao *lag time* relativo às leituras do piezômetro. Este fato reforça ainda mais a hipótese da possível inter-relação entre pluviometria, flutuações do NA e aumento ou diminuição dos volumes drenados ao pé do BF4 (G_{out}).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A drenagem ácida de mina (DAM) pode ser considerada como um grave problema ambiental, que está freqüentemente associado aos resíduos de minerais sulfetados gerados pela indústria da mineração. Em função das agressões e degradações que a DAM pode causar ao meio ambiente, órgãos ambientais vêm ampliando o seu poder de fiscalização quanto a esta questão e, convenientemente, impondo a adoção de medidas remediadoras.

Considerando o cunho ambiental do problema, muitas vezes impulsionado pelo fator econômico associado a ele, torna-se fundamental o conhecimento de todas as variáveis intervenientes na geração da DAM. Tendo em vista a origem hídrica da DAM, a ferramenta do balanço hídrico constituiu um instrumento de grande utilidade na avaliação preliminar dos volumes de efluentes ácidos gerados no BF4.

Diante das características observadas na região do bota-fora BF4, algumas considerações foram possíveis de serem assumidas para efeito da simplificação dos cálculos do balanço, tais como:

- o escoamento superficial como sendo nulo;
- a evapotranspiração potencial como sendo igual à evapotranspiração real;
- a variação anual do volume de água acumulado no solo (ΔV_{EC}) sendo nula;
- a vazão na BNF como sendo o único ponto exutório da microbacia do BF4, correspondendo ao escoamento subterrâneo total na microbacia (G_{out}).

A partir daí, e baseado na aplicabilidade do balanço hídrico, dados diversos sobre a climatologia do CIPC foram resgatados, compilados e organizados, obtendo-se

médias com razoável representatividade. Estas médias foram úteis, sobretudo, para a estimativa mensal dos valores de evapotranspiração (ET), avaliada de acordo com o modelo proposto por Penman.

Quatro hipóteses foram assumidas em função do desconhecimento, para o local do BF4, de três parâmetros necessários a este modelo: albedo (a), α e β . Para o primeiro (a), que é variável de acordo com o tipo de superfície de estudo, adotou-se os valores 0,30 e 0,35. Os outros dois, que são variáveis de local para local, foram avaliados segundo os valores dos municípios mais próximos que possuíam referência a esses parâmetros na literatura: Lavras/MG ($\alpha = 0,23$ e $\beta = 0,49$) e São Paulo ($\alpha = 0,24$ e $\beta = 0,58$). Os valores adotados para estes três parâmetros foram obtidos através de estudos realizados por outros pesquisadores.

Segundo as quatro hipóteses adotadas, realizadas em função dos diferentes valores assumidos para os parâmetros acima descritos, o volume de infiltração na microbacia delimitada para o BF4 é bastante concordante com o volume médio escoado na BNF. Em três delas, os erros encontrados residiram na ordem de -10 a 6%. A outra hipótese, embora indique a contribuição de outras fontes para a geração de DAM no BF4, revela uma tendência de que esta não seja muito significativa, sendo inferior a 18%, aproximadamente. Estes resultados apontam a precipitação sobre o bota-fora BF4 como o principal contribuinte para a geração de DAM no local.

Além disso, as correlações realizadas de precipitação-vazão e de precipitação-piezometria apresentaram bons resultados. O tempo de retardo (*lag time*) encontrado nestas duas correlações, de aproximadamente 2 a 3 meses para ambas, reforça ainda mais a relação hídrica entre a pluviometria, as flutuações do NA e o aumento ou diminuição dos volumes drenados ao pé do BF4, na bacia de coleta denominada BNF (G_{out}).

Considerando-se o cunho empírico-teórico do Balanço Hídrico e os erros inerentes aos modelos utilizados, principalmente com relação à estimativa da evapotranspiração (ET), acredita-se que estas considerações não comprometam a interpretação imediata das seguintes afirmações:

- 1) Toda a infiltração colhida no BF4 é transportada para sua base e coletada na BNF;

- 2) Não há fluxo substancial na base do BF4 que não seja aquele acima referido; isto equivale a dizer que a base do BF4 é praticamente impermeável;
- 3) Não há contribuições substanciais de outras fontes, tais como do Córrego do Consulta ou de outras fontes subterrâneas para o escoamento na BNF;
- 4) Em médio e longo prazo, ao ser interrompida a infiltração decorrente da precipitação, a vazão na BNF possivelmente sofrerá grande impacto (redução).

Nesta Dissertação foram levantados todos os parâmetros que possuíam ligação com o balanço hídrico do BF4. Entretanto, alguns destes parâmetros foram obtidos com períodos curtos de observação e outros, estabelecidos segundo indicações feitas em trabalhos de outros pesquisadores. Sendo assim, sugerem-se alguns estudos e/ou recomendações no sentido de melhorar a qualidade dos resultados deste balanço:

- determinação dos verdadeiros α e β , parâmetros da equação de Penman, para o local do CIPC (BF4);
- avaliação do real valor do albedo (a) para a superfície do bota-fora BF4;
- continuação das medidas diárias de velocidade dos ventos (U_2) e umidade relativa do ar (UR) no CIPC;
- melhorar a qualidade dos registros de vazão na BNF (G_{out}), tornando-os, se possível, diários;
- observação freqüente dos níveis nos piezômetros do BF4;
- iniciar registros regulares de insolação diária (n) no CIPC, através de aparelhos denominados heliógrafos.

É preciso observar também que as conclusões aqui tecidas carecem de mais evidências, principalmente através de estudos mais específicos, tais como:

- Estudos de infiltração em campo;
- Estudos sobre o fluxo no Córrego do Consulta;
- Obtenção de parâmetros e modelagem do fluxo subterrâneo;
- Avaliações sobre o Balanço Hídrico Geral para o CIPC, como um todo.

Sugere-se ainda a reativação do funcionamento dos lisímetros instalados no BF4, que teriam como objetivo fazer a medida direta da evapotranspiração (ET) e/ou determinar as variações mensais dos volumes de água acumulados no BF4 (ΔV_{EC}). Estudos mais detalhados sobre a hidrogeologia local, enfocando cargas e parâmetros hídricos subterrâneos são também interessantes, numa tentativa de modelagem e de simulação computacional do fluxo subterrâneo (G_{in} e G_{out}).

Além dos estudos anteriormente relatados, recomenda-se um maior aprofundamento sobre as características gerais da massa do BF4 como um todo. Sendo assim, trabalhos de caminhamento elétrico, tensiometria e análises composicionais mais sofisticadas teriam grande proveito.

Para finalizar, considerando-se a conclusão principal desta Dissertação sobre a relação hídrica entre a pluviometria e a geração de drenagem ácida na BNF, estudos envolvendo materiais para a selagem e/ou cobertura do BF4 devem ser avaliados. Eles visariam, principalmente, a redução dos volumes de infiltração no BF4 em função da precipitação e a conseqüente diminuição do processo de formação da DAM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. S.; MIRANDA NETO, M. I. (2002). Investigação e monitoramento de áreas contaminadas. Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, Rio de Janeiro, p. 303-317.

BARBOSA JR., A. R. (2002). Hidrologia aplicada. Apostila de curso. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

BRASIL (2004). Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004. Ministério da Saúde. Brasil. 15p.

CAMPOS, T. M.; ARARUNA JR., J. T. (2002). Relato da sessão remediação de áreas contaminadas – ‘Contaminação do subsolo e águas subterrâneas: técnicas de remediação inovadoras e desenvolvimento no país’. Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, Rio de Janeiro, p. 402-411.

CARVALHO, M. S.; FERREIRA, E. M. (2000). Estudo para eliminar metais radioativos e outros efluentes industriais pode recuperar águas para uso agrícola ou industrial. Resumo.

CASTRO, R (1994). Distribuição probabilística da frequência de precipitação na região de Botucatu, SP. Botucatu. Dissertação. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 101p.

CHAMMAS, R. (1989). Barragens de contenção de Rejeitos – Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEB), UFOP, Ouro Preto, MG, 29 p.

CIPRIANI, M. (2002). Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio. Tese. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 332 p.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2005). Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente. Brasil. 23 p.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA E. (2003). Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. Revista Ciência e Agrotecnologia – ‘http://www.editora.ufla.br/revista/27_6/art08.htm’.

DEMATTE, J. A. M.; TOLEDO, A. M. A.; SIMOES, M. S. Metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Sept./Oct. 2004, vol.28, no.5, p.877-889.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION – DEP (1995). ‘The science of acid mine drainage and passive treatment’, Bureau of Abandoned Mine Reclamation, Pennsylvania, p. 1-10.

DUCHESNE, J.; DOYE, I. (2002). ‘Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigation using batch-leaching tests’. Applied Geochemistry.

ENVIRONMENTAL MINING COUNCIL OF BRITISH COLUMBIA – EMCBC (2001). ‘Report of acid mine drainage’. Publications, p. 1-14.

EVANGELOU, V. P.; ZHANG, Y. L. (1995). ‘A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention’. Critical Reviews in Environmental Science and Technology: 141 – 149.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (1997). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. LABHID – Laboratório de Hidrogeologia da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 412 p.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. (2000). ‘Assessment of acid rock drainage pollutants release in the uranium mining site of Poços de Caldas – Brazil’. Journal of Environmental Radioactivity, v. 54, p. 5-25.

FIEDLER, H. D.; SOLARI, J. A. (1988). Caracterização do impacto ambiental da Mina de Candiota sobre as águas superficiais da região. XIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, São Paulo, v. 1, p. 483-498.

FRAENKEL, M. O. et al. (1985). Jazida de Urânio no Planalto de Poços de Caldas – Minas Gerais. Departamento Nacional de Produção Mineral. Principais depósitos minerais do Brasil: Recursos Minerais Energéticos. Brasília: DNPM, v. 1, cap.5, p. 89-103.

FRANCISCO, J.D (1991). Parâmetros pluviométricos auxiliares no planejamento de empreendimentos na região de Botucatu, SP. Botucatu. Dissertação. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 120p.

FRASA INGENIEROS CONSULTORES, S. L. (1997). Relatório de Avaliação Preliminar na Mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas, MG. Ciudad Santo Domingo, Madrid. 57 p.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc. 604 p.

GARCEZ, L. N. (1974). Hidrologia. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP, 249 p.

GRAY, N. F. (1996). Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. Environmental Geology Journal, v. 30, p. 62-71.

KARATHANASIS, A. D.; JOHNSON, C. M. (2003). Metal removal potential by three aquatic plants in an acid mine drainage wetland. Mine Water and the Environment Journal, v. 22. p. 22-30.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. (1984). Lições de hidrologia. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, registro de edição nº 4205, 451 p.

LENTER, C. M. et al. (2002). The effects of sulfate on the physical and chemical properties of actively treated acid mine drainage floc. Mine Water and the Environment Journal, v. 21. p. 114-120.

LUZ, A.B. et al. (1995). Tratamento de minérios. Maio Gráfica Editora, 1ª edição, Rio de Janeiro, 534 p.

LUZ, A.B. et al. (1997). Proposta de projeto para abatimento das drenagens ácidas e reabilitação da pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas. Proposta preliminar. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. 21 p.

MASFERRER, J. A. R. (2002). ‘Passive treatment of acid mine drainage at the La Extranjera Mine (Puertollano, Spain)’. Mine Water and the Environment Journal, v. 21. p. 111-113.

MDGEO (2000a). Estudo da drenagem do bota-fora 4. Relatório de Visita técnica à Indústrias Nucleares do Brasil – Poços de Caldas, MG. Belo Horizonte, MG. 7 p.

MDGEO (2000b). Projeto conceitual da drenagem subterrânea do bota-fora 4 na mina Osamu Utsumi – Poços de Caldas, MG. Belo Horizonte, MG. 22 p.

MDGEO (2000c). Inventário de pontos d’água no entorno da mina Osamu Utsumi e demais instalações das Indústrias Nucleares do Brasil. Relatório parcial. Belo Horizonte, MG. 14 p.

MDGEO (2001). Inventário de pontos d’água no entorno da mina Osamu Utsumi e demais instalações das Indústrias Nucleares do Brasil. Belo Horizonte, MG. 10 p.

PAKTUNC, A. D. (1998). ‘mineralogical constraints on the determination of neutralization potencial and prediction of acid mine drainage’. Environmental Geology Journal, v. 39, p. 103-112.

PASTORE, E.L.; MIOTO, J.A. (2000). Impactos ambientais em mineração com ênfase à drenagem mineira ácida e transporte de contaminates. Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia, v. 23. p. 33-53.

PRADO, V. C. S. (1994). O impacto da produção de concentrado de urânio sobre a qualidade da água dos rios – Um estudo de caso na área do Complexo Mínero-Industrial de Poços de Caldas. Dissertação. Rio de Janeiro, RJ, 195 p.

RAMOS, F. et al. (1989). Engenharia hidrológica, v. 2, ABRH. Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 404 p.

RODRIGUES, J. A. (2001). Drenagem ácida do bota-fora 4 (Mina de urânio de Caldas – MG): aspectos hidroquímicos e hidrogeológicos. Dissertação. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto.

SELLERS, W.D (1965). Physical climatology. The Univ. of Chicago Press, EUA. 272p.

SENGUPTA, M. (1993). Environmental impacts of mining – monitoring, restoration, and control. Lewis Publishers, v. 1, p. 167-259.

SHACKELFORD, C. D.; JEFFERIS, S. A. (2000). “Geoenvironmental engineering for in situ remediation”.

SIDDHARTH, S. et al. (2002). “Acid-base accounting: a geochemical tool for management of acid drainage in coal mines”. Mine Water and the Environment Journal, v. 21. p. 106-110.

SIMMONS. J. et al. (2002). “Use of steel slag leach beds for the treatment of acid mine drainage”. Mine Water and the Environment Journal, v. 21. p. 91 -99.

SIMMONS. J. et al. (2003). “Long -term performance of passive acid mine drainage treatment systems”. Mine Water and the Environment Journal, v. 22. p. 118 -129.

SOUZA et al. (1995). Gerenciamento de rejeitos da lavra de minério de urânio do CIPC. III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO’ 95.

TAYLOR, J.; WARING, C. (2001). “The passive prevention of ARD in underground mines by displacement of air with a reducing gas mixture:GaRDS”. Mine Water and the Environment Journal, v. 20. p. 2-7.

TEIXEIRA, W. et al. (2000). Decifrando a Terra, São Paulo: Oficina de Textos Ed.

TUCCI, C. E. M. (organizador) (2002). Hidrologia: ciência e aplicação. 3ª ed. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, RS, 943 p.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – U. S. EPA (1994). “Acid mine drainage prediction”. Technical Document, p. 1-32.

WARD, A. D.; ELLIOT, W. J. (1995). Environmental hydrology. CRC Press, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA, p. 51-174.

WIKMANN, L. O. (1998). Caracterização química e radiológica dos estéreis provenientes da mineração de urânio do Planalto de Poços de Caldas. Dissertação. Piracicaba, SP, 98 p.

ANEXO I

Precipitações mensais (P) – Estações M/1 (jan/77 a dez/88) e M/2 (jan/89 a nov/04).

ANO	Precipitação mensal (mm) - Estação M/2 - INB											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1977	378,90	92,80	266,40	181,20	10,60	33,60	2,20	78,00	84,80	203,40	266,50	271,80
1978	267,90	198,00	96,00	67,50	101,3	52,7	56,00	0,1	53	93,2	199	207,5
1979	245	257,50	239	68,5	118	0,1	68,50	97	137	104	171	282
1980	793,4	365,50	167,6	566,8	75,4	188,4	0,10	64	142,8	490,8	342,2	564,6
1981	902,4	117,40	206,4	36	24,6	36,2	0,10	30,6	15,4	285,8	227,7	337,9
1982	350,8	140,80	237,8	75,8	58	82	38,00	85,2	19,4	198	166,6	359,6
1983	500	306,40	210,2	145,5	178,9	90,9	51,00	8,4	267,8	301,2	176,6	422,3
1984	165,6	92,60	118,6	89,7	80,6	0,1	0,10	160,8	94,2	50,6	142,2	274,4
1985	373,3	208,80	345	105,7	49	9,7	1,40	9,5	84,3	19,6	202,6	177,2
1986	339,6	265,20	254,6	105,4	85,6	0,1	55,60	101,4	26,4	61,6	138,6	545,2
1987	310	119,3	187,4	159,2	112,2	14,4	13,20	8,1	153,8	90,2	137,8	233
1988	264,9	285,5	192,1	111,8	70,9	46,4	3,2	0,1	17,4	207,7	163,8	132,2
1989	387,1	228,7	284,3	63,9	57,8	29,4	73,7	46,4	63,3	47,3	188,7	196,1
1990	267,8	109,8	203,6	72,1	62,1	4	35,6	61,1	53,5	82,5	235,6	220,6
1991	172	183,1	193,1	294,3	52,8	6,9	15,4	0,1	55,2	162	100,85	176,5
1992	375,2	140,5	158,6	56,3	60,6	0,1	23,6	24,4	161,5	212	197,4	144,6
1993	169,3	210	161,9	92,5	77,5	19,1	10,8	29,4	138,5	147,4	177,7	182,8
1994	150,5	218	382,1	33,8	99,9	17,3	21,6	0,1	0,1	92,6	108,9	293,3
1995	271,3	463,5	243,3	59,1	37,5	8,7	28,6	4,3	62,2	230,5	127,9	209,8
1996	417,2	281,6	290,7	82,7	42,9	12	12,4	60,8	130,5	167,1	307,3	335,9
1997	310,1	166,8	174,5	87	46,6	104,9	14,3	0	88,9	85,9	248,7	213,5
1998	163	289,4	179,6	94,7	51,9	58,8	0,5	15,4	37,6	153,8	148,9	311,5
1999	286,4	234,5	221,1	79,3	29,5	40,1	7	0	57	63,6	87,8	149,4
2000	378,9	342,6	137,63	49,58	1,61	5,3	46,23	52,74	163,95	95,24	214,56	334,81
2001	217,36	112,35	142,7	37,92	74,59	3,78	14,76	51,36	59,77	128,54	141,41	287,12
2002	220,94	257,54	155,36	31,93	67,81	0	0,51	43,03	95,07	31,59	177,29	255,91
2003	469,87	148,81	157,17	118,98	79,83	0	13,83	12,3	8,85	79,34	174,44	199,14
2004	269,58	353,86	91,06	140,84	170,92	45,4	53,14	0	6,45	142,58	174,18	191,4
MEDIA	319,44	215,75	204,82	94,12	70,50	26,74	24,49	36,32	79,11	131,01	177,93	257,24

ANEXO II

Médias mensais de temperatura (*T*) na Estação M/2 – jan/97 a nov/04.

ANO	Temperaturas médias mensais (°C)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1997	20,27	20,78	19,73	17,73	15,61	14,50	15,20	16,74	20,02	20,37	21,40	20,70
1998	22,05	21,82	21,41	19,60	15,80	14,14	15,33	17,28	19,16	18,89	18,60	20,69
1999	21,55	20,67	20,26	19,00	15,57	14,76	15,70	16,16	18,62	18,53	19,36	19,59
2000	20,67	20,15	20,40	18,33	15,80	15,89	13,14	16,13	17,36	21,04	20,00	20,27
2001	20,98	21,90	21,26	19,74	16,23	15,50	16,36	15,24	16,53	18,17	20,50	19,87
2002	20,70	19,56	20,74	19,84	16,68	15,73	14,64	18,19	17,07	21,76	20,19	21,50
2003	20,80	21,93	20,39	18,89	15,60	15,58	14,50	15,71	18,36	19,35	19,40	21,06
2004	20,05	19,82	18,91	18,50	14,90	14,45	15,33	15,36	20,02	16,79	19,33	ND
MÉDIA	20,88	20,83	20,39	18,95	15,77	15,07	15,03	16,35	18,39	19,36	19,85	20,53

ND – nenhum dado disponível.

ANEXO III

Médias mensais de umidade relativa do ar (UR) – Estação M/2 – jan/89 a fev/98.

ANO	Umidade relativa do ar (%) - médias mensais											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1989	90,02	89,11	91,79	89,45	88,44	90,00	86,18	86,85	89,36	89,36	90,74	91,84
1990	89,68	89,85	92,02	91,44	91,94	ND	82,30	88,46	84,52	89,83	88,23	88,91
1991	91,56	91,98	94,06	92,06	92,22	91,47	90,61	88,15	88,14	88,83	88,62	90,67
1992	92,22	91,29	92,39	92,00	91,01	89,74	89,27	90,07	91,93	91,72	92,80	96,40
1993	92,30	92,43	92,11	92,72	91,13	90,90	89,52	89,79	91,37	91,87	88,85	78,52
1994	78,67	65,46	ND	ND	ND	ND	74,06	74,27	70,74	81,81	85,19	88,25
1995	88,24	92,39	92,05	90,22	91,50	89,45	88,54	ND	ND	ND	ND	ND
1996	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1997	90,54	86,71	86,14	84,06	83,95	79,26	82,49	77,97	76,61	81,08	88,45	87,98
1998	86,29	88,59	ND									
MÉDIA	88,84	87,53	91,51	90,28	90,03	88,47	85,37	85,08	84,67	87,78	88,98	88,94

ND – nenhum dado disponível.

ANEXO IV

Médias mensais de velocidade dos ventos (U_2) na Estação M/1 – jan/89 a abr/91.

ANO	Velocidade dos ventos (m/s)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1989	4,36	4,18	3,99	3,88	4,53	4,67	4,93	5,47	4,42	4,86	5,02	5,61
1990	3,74	4,28	3,81	4,12	4,19	ND	4,18	4,99	4,59	4,93	4,58	5,24
1991	3,50	4,04	3,88	3,56	ND							
MEDIA	3,87	4,16	3,89	3,85	4,36	4,67	4,55	5,23	4,51	4,89	4,80	5,43

Médias mensais de velocidade dos ventos (U_2) na Estação M/2 – ago/92 a dez/92 e jan/96 a dez/96.

ANO	Velocidade dos ventos (m/s)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1992	ND	ND	ND	ND	ND	2,62	2,77	3,21	3,44	3,05	2,85	2,83
1996	2,49	2,73	2,42	1,81	1,98	3,31	2,92	2,46	2,93	3,22	3,56	2,61
MEDIA	2,49	2,73	2,42	1,81	1,98	2,96	2,84	2,83	3,19	3,14	3,20	2,72

ND – nenhum dado disponível.

ANEXO V

Médias mensais de insolação diária (*n*) na Estação de Caldas, MG – jan/89 a dez/04

(*)

ANO	Médias mensais de insolação diária (h)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1989	2,5	3,7	5,4	6,5	7,0	4,9		7,2	5,3	6,2	5,1	4,3
1990	5,7	5,9	5,1	6,2	5,9	6,6	6,0	5,2	5,4	5,1	6,2	6,0
1991	3,9	4,7	2,7	5,2	6,8	6,3	6,2	6,6	3,9	5,9	6,5	4,9
1992	3,9	4,4	2,6	3,6	4,9	2,9	5,4	4,8	2,4	4,0	4,1	5,8
1993	4,3	2,7	4,6	5,7	ND	ND	ND	ND	3,6	5,8	7,3	3,7
1994	3,1	6,5	3,9	5,7	5,5	6,7	ND	ND	6,7	5,0	5,3	5,1
1995	5,2	4,3	5,2	ND	ND	ND	4,6	7,6	5,6	5,4	6,6	4,5
1996	5,0	5,1	4,9	6,8	5,6	6,6	3,9	7,3	4,2	4,8	4,5	4,0
1997	2,4	5,7	4,9	5,8	5,4	5,9	6,5	7,8	4,7	6,1	4,7	4,3
1998	2,7	3,5	5,3	6,5	5,6	5,5	7,0	6,0	5,3	4,3	5,6	4,4
1999	4,3	4,4	6,0	7,1	7,1	6,0	6,3	7,9	7,1	5,3	5,9	4,7
2000	4,6	3,5	2,4	7,7	7,4	7,0	6,1	6,3	31,7	5,2	4,2	4,3
2001	5,6	5,8	4,8	7,3	5,7	6,5	6,7	7,4	5,1	6,6	5,2	4,1
2002	4,0	3,8	6,6	8,5	5,6	6,8	6,5	6,4	5,4	7,1	5,2	4,9
2003	3,2	7,0	4,1	5,7	6,7	7,1	6,4	6,5	6,1	5,4	4,5	4,4
2004	3,6	3,8	4,8	4,8	4,1	5,7	ND	8,1	6,8	3,4	4,2	3,2
MÉDIA	4,0	4,7	4,6	6,2	6,0	6,0	6,0	6,8	6,8	5,3	5,3	4,5

ND – nenhum dado disponível.

(*) Dados fornecidos pelo 5º Distrito de Meteorologia do INMET

ANEXO VI

Pressão de saturação do vapor d'água (e_s) em função da temperatura.

T °C	e_s										
	mbar	mm-Hg									
0	6,11	4,58	11	13,13	9,85	22	26,46	19,85	33	50,36	37,77
1	6,57	4,93	12	14,03	10,52	23	28,11	21,08	34	53,26	39,95
2	7,05	5,29	13	14,98	11,24	24	29,86	22,40	35	56,30	42,23
3	7,58	5,69	14	15,99	11,99	25	31,70	23,78	36	61,14	45,86
4	8,13	6,10	15	17,06	12,80	26	33,64	25,23	37	62,83	47,12
5	8,72	6,54	16	18,19	13,64	27	35,69	26,77	38	66,34	49,80
6	9,35	7,01	17	19,38	14,54	28	37,84	28,38	39	70,01	52,51
7	10,02	7,52	18	20,65	15,49	29	40,10	30,08	40	73,85	55,39
8	10,72	8,04	19	21,98	16,49	30	42,48	31,86	41	77,88	58,41
9	11,48	8,61	20	23,40	17,55	31	44,97	33,73	42	82,10	61,58
10	12,28	9,21	21	24,88	18,66	32	47,60	35,70	43	86,51	64,88
									44	91,12	68,34

Fonte: Barbosa Jr. (2002).

ANEXO VII

Valores da radiação solar recebida no topo da atmosfera (R_t).

latitude	R_t , cal/(cm ² ·dia)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2°N	832	867	885	861	826	802	814	844	873	867	838	814
equador	850	879	885	856	808	785	797	832	867	873	856	832
2°S	861	885	885	850	791	767	779	820	867	879	873	850
4°S	879	897	885	838	779	749	755	808	861	885	885	873
6°S	897	903	885	826	755	732	743	797	861	897	897	890
8°S	909	909	879	814	738	708	720	779	856	897	909	903
10°S	920	920	873	802	720	684	702	767	850	897	915	920
12°S	938	920	867	791	696	661	684	755	838	897	826	832
14°S	950	926	861	773	679	637	661	738	838	903	838	944
16°S	956	932	856	755	661	614	637	720	826	903	944	956
18°S	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
20°S	979	932	838	720	614	566	596	684	802	897	962	985
22°S	991	932	826	702	590	543	572	661	791	897	968	991
24°S	991	932	814	684	566	519	549	643	779	897	968	1003
26°S	997	926	802	661	543	496	519	625	761	891	974	1015
28°S	1003	920	791	643	519	460	496	602	743	885	979	1021
30°S	1003	920	779	620	496	437	472	578	732	873	979	1027
32°S	1009	909	767	596	472	407	448	555	714	867	979	1033
34°S	1009	903	743	578	448	378	313	531	696	861	979	1038
36°S	1009	897	732	555	419	354	389	507	673	850	979	1038
38°S	1009	885	714	531	389	330	366	484	649	838	974	1044
40°S	1003	879	690	507	360	295	336	460	631	826	968	1044

Fonte: Barbosa Jr. (2002).

ANEXO VIII

Valores da duração máxima de insolação diária (N).

latitude	N (horas)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2°N	12,0	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0
equador	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
2°S	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,2	12,2
4°S	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4
6°S	12,4	12,3	12,1	12,0	11,9	11,7	11,8	11,9	12,1	12,2	12,4	12,5
8°S	12,5	12,4	12,1	11,9	11,7	11,6	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6
10°S	12,6	12,4	12,1	11,9	11,7	11,5	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7
12°S	12,7	12,5	12,2	11,8	11,6	11,4	11,5	11,7	12,0	12,4	12,7	12,8
14°S	12,8	12,6	12,2	11,8	11,5	11,3	11,4	11,6	12,0	12,4	12,8	12,9
16°S	13,0	12,7	12,2	11,7	11,4	11,2	11,2	11,6	12,0	12,4	12,9	13,1
18°S	13,1	12,7	12,2	11,7	11,3	11,1	11,1	11,5	12,0	12,5	13,0	13,2
20°S	13,1	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	12,0	12,5	13,2	13,3
22°S	13,4	12,8	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,5
24°S	13,5	12,9	12,3	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,6	13,3	13,6
26°S	13,6	12,9	12,3	11,5	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,7	13,4	13,8
28°S	13,7	13,0	12,3	11,4	10,7	10,4	10,6	11,1	11,9	12,8	13,5	13,9
30°S	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,2	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1
32°S	14,0	13,2	12,3	11,3	10,5	10,0	10,3	10,9	11,9	12,9	13,7	14,2
34°S	14,2	13,3	12,3	11,3	10,3	9,8	10,1	10,9	11,9	12,9	13,9	14,4
36°S	14,3	13,4	12,4	11,2	10,2	9,7	10,0	10,7	11,9	13,0	14,0	14,6
38°S	14,5	13,5	12,4	11,1	10,1	9,5	9,8	10,6	11,8	13,1	14,2	14,8
40°S	14,7	13,6	12,4	11,1	9,9	9,3	9,6	10,5	11,8	13,1	14,3	15,0

Fonte: Barbosa Jr. (2002).

ANEXO IX

Médias mensais de vazão na BNF (base do BF4) (G_{out}) – jan/98 a ago/04.

ANO	Médias mensais de vazão na BNF (m ³ /h)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1998	68,1	66,6	65,9	65,5	65,3	65,1	64,6	59,3	57,3	58,4	63,1	66,2
1999	70,7	74,7	78,7	67,9	63,1	58,3	56,9	56,4	55,1	51,5	54,2	62,3
2000	58,8	70,4	67	68,1	69,2	60,2	67,8	55,4	54,5	53,7	70,2	62,2
2001	62,6	61	66,9	63,2	59,4	57,7	55,3	53	51,8	53,5	54,2	62,5
2002	61,6	77,7	74	69,4	67,4	61,9	61,4	59,7	59	56,3	52,7	59,1
2003	81,3	75,7	77,2	76	69,8	68,5	64	60,5	59,7	56,7	58,2	58,8
2004	67,2	81,7	74,8	70,7	76,3	71,8	77,3	67,6	ND	ND	ND	ND
MEDIA	67,19	72,54	72,07	68,69	67,21	63,36	63,90	58,84	56,23	55,02	58,77	61,85

ND – nenhum dado disponível.