

ESTIMATIVA DA TAXA DE RECARGA DO AQUIFERO A PARTIR DE DADOS DE LABORATÓRIO E MODELAGEM MATEMÁTICA

Ana Carolina Campilho da Silva¹; Rodrigo Menezes Raposo de Almeida²

Resumo – A modelagem da infiltração de água no solo objetivou calcular o balanço hídrico e extrair a quantidade de água infiltrada no solo no local das amostras recolhidas e consideradas representativas na área do Projeto Macacu. Para tal, foi utilizado o programa *Unsat Suite Plus 2.2* da WHI, após a criação de um banco de dados pluviométricos da região, possibilitando dessa forma uma modelagem mais precisa do clima da bacia. Para a montagem do perfil de cada amostra a ser analisada, foram também realizados uma série de ensaios de laboratório, a fim de se determinar os parâmetros físicos de entrada no programa, e os dados não obtidos através de ensaio foram encontrados empiricamente no programa *RETC* utilizando-se as porcentagens de areia, silte e argila contidas em cada amostra ensaiada. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que apresentaram taxas de infiltração das amostras consistentes com os parâmetros físicos e os índices pluviométricos da região.

Abstract – The modeling of water infiltration into the soil aimed to calculate the water balance and extract the amount of infiltrated water into the soil at the site where samples retrieved and considered representative in Project's Macacu site. For such, we used WHI's *Unsat Suite Plus 2.2*, after creating a pluviometric's database of the region, thus enabling a more accurate modeling of basin's climate. To setup the profile of each sample to be analyzed, were also carried out a series of laboratory tests to determine the entry's physical parameters on the application, and data that couldn't be obtained from testing were found empirically using the *RETC* application, using the percentages of sand, silt and clay contained in each sample tested . The results were satisfactory, since it had shown up samples' infiltration rates consistent with the physical parameters and the pluviometric index from the region.

Palavras-chave – recarga, aquífero freático, modelagem

¹ Aluna de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense (UFF), Endereço: Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, sala 133, São Domingos, Niterói, RJ, Telefone: 21 2629 5354 / 21 8869-1054. E-mail: anacampilho@gmail.com

² Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, Endereço: Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, sala 133, São Domingos, Niterói, RJ, Telefone: 21 2629 5354 E-mail: rraposo@pq.cnpq.br

1. INTRODUÇÃO

A quantificação da infiltração das águas subterrâneas é uma das etapas mais difíceis de quantificar no ciclo hidrológico. Seja pela falta de dados históricos ou dificuldade de coleta de dados diretos. Para tal, foram desenvolvidos vários métodos com objetivo de medição direta dos fluxos de água subterrânea, como: medição da variação anual dos níveis d'água subterrânea, medição direta da infiltração através da captação da água percolada utilizando de lisímetros, medição da descarga de água subterrânea num corpo de água superficial através do fluxo de base de uma aquífero.

O método aqui apresentado utiliza um modelo analítico da infiltração de água a partir do balanço hídrico, a partir do módulo *HELP* do programa *Unsat Suite Plus 2.2* da WHI (2004) na região do Projeto Macacu. O valor da infiltração trata-se de um parâmetro importante durante a modelagem da recarga do aquífero freático da região.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a modelagem da infiltração da água da chuva, foi necessária a criação de um banco de dados de precipitação, a fim de posteriormente ser utilizado o programa *Unsat Suite Plus 2.2*, onde são solicitados parâmetros de clima e parâmetros físicos de cada solo a ser analisado.

2.1. Seleção dos parâmetros do modelo

2.1.1. Banco de dados

Foi criada uma base de dados pluviométricos das estações situadas nos bairros da Ilha do Governador e Saúde, no Rio de Janeiro, por se tratar das mais próximas da região e com representatividade do local, possuindo as mesmas características fisiográficas. Para tal, foi realizada uma pesquisa no site da Georio, a fim de se obter as coordenadas das estações e os dados de precipitação, posteriormente convertidos para uma planilha a fim de no programa *Converte 3.1* (2009) converter o arquivo .xls para o formato .dat. Esse foi configurado para o formato canadense, lido pelo programa.

No caso da estação do Rio de Janeiro foram utilizados os dados pluviométricos da estação da Ilha do Governador e para a temperatura gerou-se um outro arquivo .dat, também através do *Converte 3.1* utilizando os dados médios de temperatura, sendo esta posteriormente conferida no database do *Weather Generator*.

2.1.2. Parâmetros de Clima

Para gerar os parâmetros de clima, primeiramente foram importados os dados convertidos em arquivos .dat utilizando-se o sub-programa *Weather Generator*, juntamente com os dados de radiação solar e temperatura conforme ilustrado na Figura 1. Para a radiação solar foi utilizada a base de dados do programa, que possui um extenso número de estações meteorológicas espalhadas pelo mundo, sendo escolhida, no caso da Bacia do Rio Macacu, a estação de Vitória, localizada a 426 Km, considerada para tal representativa.

A seguir, foram configurados latitude e longitude para as estações da Ilha do Governador, Saúde e Rio de Janeiro, adicionando-as a base de dados do programa conforme visto na Figura 2. Posteriormente foram conferidos, e de acordo com o necessário, configurados alguns parâmetros pluviométricos, de temperatura e de evapotranspiração no database do programa. O *Weather Generator* a partir dos dados pluviométricos e de temperatura importados e da radiação solar obtidos, permite modelar o clima da região, prevendo dessa forma, a partir dos dados existentes, os dias chuvosos ou não, bem como qual a temperatura e a radiação solar em cada dia, em um período de anos a ser determinado durante a simulação. A Figura 3 ilustra os dados de entrada obtidos durante a simulação para a precipitação e a temperatura na estação do Rio de Janeiro. Para a simulação foram utilizados os dados de evapotranspiração obtidos a partir de uma média da umidade relativa no local de acordo com o apresentado na Figura 4.



Figura 1: importação dos dados pluviométricos, de temperatura e radiação solar no formato canadense para o *Weather Generator*.

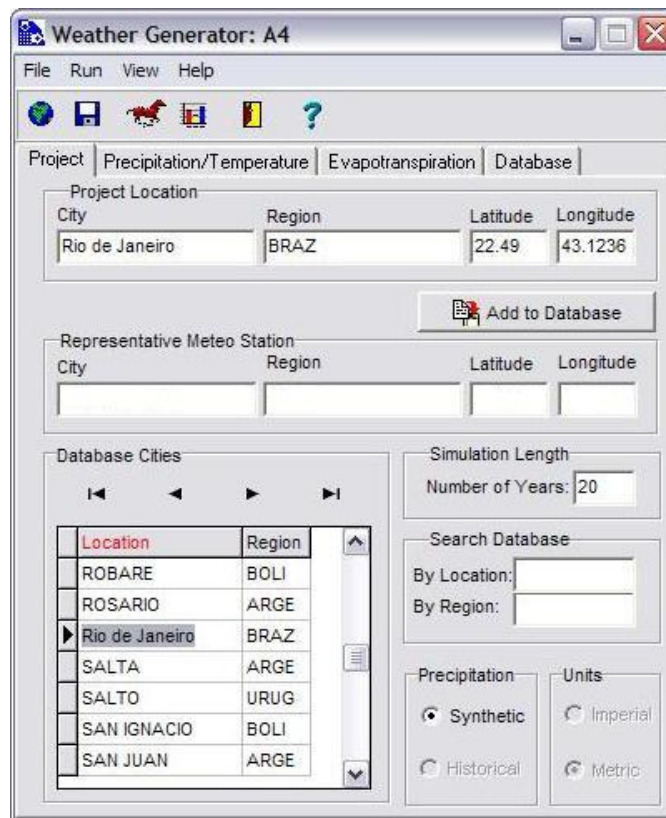


Figura 2: Configuração de latitude e longitude de uma das estações, bem como adição desta a base de dados do programa como estação meteorológica. No caso foi a estação do Rio de Janeiro. Observa-se também que já foi selecionado o período da simulação: 20 anos.

Precipitation (mm)				Temperature (°C)				
	User	Default		User	Default		User	Default
January	114.0	114.0	26.2	26.2	January	26.2	26.2	26.2
February	105.4	105.4	26.5	26.5	February	26.5	26.5	26.5
March	103.4	103.4	26.0	26.0	March	26.0	26.0	26.0
April	137.4	137.4	24.5	24.5	April	24.5	24.5	24.5
May	85.6	85.6	23.0	23.0	May	23.0	23.0	23.0
June	80.5	80.5	21.5	21.5	June	21.5	21.5	21.5
July	56.4	56.4	21.3	21.3	July	21.3	21.3	21.3
August	50.5	50.5	21.8	21.8	August	21.8	21.8	21.8
September	87.1	87.1	21.8	21.8	September	21.8	21.8	21.8
October	88.1	88.1	22.8	22.8	October	22.8	22.8	22.8
November	95.5	95.5	24.2	24.2	November	24.2	24.2	24.2
December	168.9	168.9	25.2	25.2	December	25.2	25.2	25.2

Figura 3: Dados de precipitação e temperatura médios para cada mês obtidos após a simulação no *Weather Generator* para a estação do Rio de Janeiro.

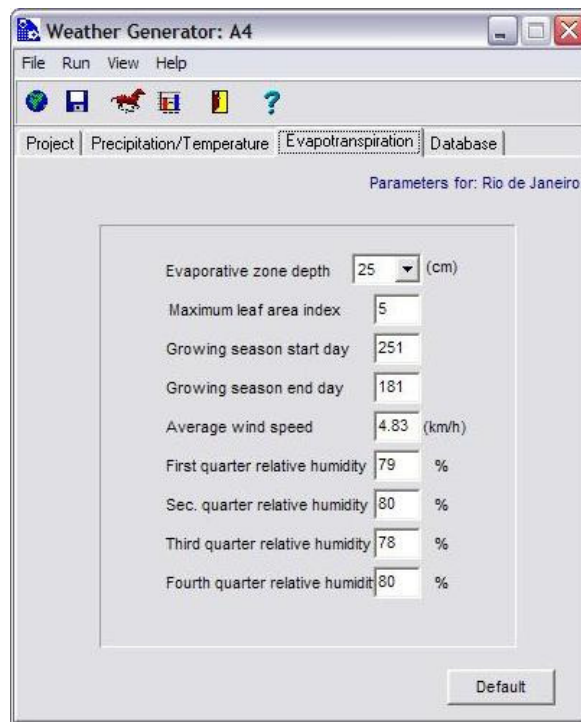


Figura 4: Dados de evapotranspiração de referência da base de dados do *Weather Generator* e de umidade obtidos a partir da umidade relativa média local para a estação adicionada ao banco de dados, no caso Rio de Janeiro.

2.1.3. Parâmetros Físicos do Solo

Foram realizados ensaios de laboratório para a determinação dos parâmetros físicos de cada uma das 15 amostras indeformadas coletadas na região e a serem modeladas. A Tabela 1 apresenta as coordenadas UTM de cada amostra coletada, obtidas com o GPS portátil. A Tabela 2 apresenta os parâmetros físicos obtidos através dos ensaios de laboratório.

Tabela 1: localização das amostras

Nº	UTM-S	UTM-L	Nº	UTM-S	UTM-L
A-1	7,490,522.0	710,719.0	A-9	7,510,652.0	725,835.0
A-2	7,488,188.0	715,851.0	A-10	7,496,370.0	713,090.0
A-3	7,475,649.0	725,385.0	A-11	7,496,569.0	712,926.0
A-4	7,477,333.0	725,381.0	A-12	7,496,566.0	712,929.0
A-5	7,511,922.0	726,720.0	A-13	7,481,387.0	737,515.0
A-6	7,511,918.0	726,700.0	A-14	7,481,329.0	737,170.0
A-7	7,511,445.0	727,883.0	A-15	7,488,287.0	735,708.0
A-8	7,512,583.0	726,620.0			

Tabela 2: Parâmetros físicos obtidos através de ensaios de laboratório

Nº	Tipo	Areia	Argila	Silte	Ensaio				
					G	W _{nat} (%)	γ _{nat} kN/m ³	γ _{seco} kN/m ³	e
A-1	Glei	23	50	27	2.60	64.63	15.55	9.4	1.75
A-2	Glei	29	47	24	2.61	59.08	15.92	10.0	1.61
A-3	Residual	51	40	9	2.67	11.46	17.88	16.0	0.66
A-4	Alúvio	96	2	2	2.65	2.75	16.09	15.7	0.69
A-5	Alúvio	52	11	37	2.64	19.91	17.38	14.5	0.82
A-6	Alúvio	81	7	12	2.66	16.35	14.24	12.2	1.17
A-7	Colúvio	44	41	15	2.62	21.55	15.92	13.1	1.00
A-8	Colúvio	43	18	39	2.62	32.11	15.55	11.8	1.23
A-9	Colúvio	42	23	35	2.66	24.67	16.74	13.4	0.98
A-10	Alúvio	83	7	10	2.64	10.27	19.19	17.4	0.52
A-11	Colúvio	61	23	16	2.62	19.95	17.43	14.5	0.80
A-12	Residual	49	45	6	2.66	22.63	19.66	16.0	0.66
A-13		82	4	14					
A-14		75	13	12					
A-15		61	24	15					
Nº	Ensaio								
	n (%)	S (%)	θ	% de finos	D ₁₀ (μm)	LL	LP	IP	I _A
A-1	63.7	95.94	0.61	50	1.1	90	35	55	1.10
A-2	61.6	95.94	0.59	47	0.7	85	46	39	0.83
A-3	39.9	46.10	0.18	40	0.1	56	29	27	0.68
A-4	40.9	10.54	0.04	2	160	-	-	-	-
A-5	45.1	64.06	0.29	11	2.5	55	32	23	2.09
A-6	54.0	37.08	0.20	7	4.5	-	-	-	-
A-7	50.0	56.42	0.28	41	1.3	137	50	87	2.12
A-8	55.1	68.65	0.38	18	2.2	77	24	53	2.94
A-9	49.5	66.93	0.33	23	2.2	71	21	50	2.17
A-10	34.1	52.48	0.18	7	2.2	71	21	50	7.14
A-11	44.5	65.13	0.29	23	2.2	71	21	50	2.17
A-12	39.7	91.32	0.36	45	2.2	71	21	50	1.11
A-13									
A-14									
A-15									

Os parâmetros necessários para modelar a infiltração são a porosidade total, a capacidade de campo, a umidade higroscópica e a condutividade saturada. Esses parâmetros foram obtidos a partir das curvas características obtidas através de ensaios no laboratório e de ajustes manuais para curvas empíricas obtidas a partir dessas, exceto para as amostras A-1, A-2, A-14 e A-15, as quais foram modeladas no programa *RETC*, versão 6.0, através da sub-rotina *Rosetta Lite versão 1.1* (Junho, 2003). A partir da porcentagem de silte, argila e areia contidas em cada uma das amostras, do peso específico seco, e da umidade volumétrica na sucção de 1/3 e 15 bar, foi gerada uma curva característica empírica, das quais foram retirados os parâmetros necessários para a modelagem, além de ter sido possível obter as permeabilidades saturadas de campo empíricas de todas as amostras, conforme apresentado na Figura 5. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de van Genuchten

obtidos através da modelagem empírica de cada amostra no programa *RETC* ou manualmente a partir do melhor ajuste de uma curva a curva característica obtida nos ensaios.

Figura 5: Exemplo da entrada de dados para a modelagem no *RETC*, sub-rotina *Rosetta Lite* e estimativa dos parâmetros de van Genuchten.

Tabela 3: Parâmetros de van Genuchten obtidos empiricamente através do programa *RETC* e manualmente através da curva característica obtida em ensaios.

Nº	θ_r	θ_s	α	n	K_s (cm/dia)	m	TH33 (cm ³ /cm ³)	TH1500 (cm ³ /cm ³)
A-1	0.110	0.611	0.0237	1.31	108.3	0.235	0.312	0.141
A-2	0.107	0.585	0.0218	1.33	85.0	0.247	0.289	0.131
A-3	0.079	0.485	0.0050	1.20	2.67	0.167	0.378	0.169
A-4	0.053	0.456	0.0005	1.75	55.5	0.429	0.184	0.055
A-5	0.053	0.486	0.0100	1.10	6.81	0.091	0.416	0.253
A-6	0.064	0.580	0.0090	1.55	270.5	0.355	0.176	0.067
A-7	0.350	0.533	0.0005	1.60	8.94	0.375	0.444	0.353
A-8	0.260	0.546	0.0150	1.16	25.2	0.138	0.460	0.336
A-9	0.025	0.511	0.0120	1.11	10.5	0.099	0.418	0.228
A-10	0.060	0.413	0.0008	1.70	21.2	0.412	0.174	0.062
A-11	0.200	0.413	0.0001	1.95	29.2	0.487	0.275	0.200
A-12	0.280	0.383	0.0001	1.66	7.52	0.398	0.352	0.282
A-13	0.040	0.497	0.0011	1.63	122.1	0.386	0.201	0.043
A-14	0.050	0.379	0.0333	1.46	46.6	0.316	0.117	0.054
A-15	0.065	0.385	0.0269	1.32	14.9	0.243	0.184	0.082

2.2. Modelagem

Para a modelagem da infiltração, escolheu-se gerar uma série climática de 20 anos através do sub-programa *Weather Generator*, utilizando-se a configuração citada no item 2.1.2. Em seguida, foi modelado o perfil de infiltração para cada uma das 15 amostras de solo, a partir dos parâmetros físicos do solo, citados anteriormente. Para cada ponto, foram realizadas análises paramétricas, nas quais se variou a declividade em 0%, 5%, 10% e 20%, o comprimento em 100 e 1000 metros e a espessura do solo no local em 2, 5 e 10 metros.

2.2.1. Montagem do perfil de infiltração

Inicialmente, foi considerado que todas as amostras pertenciam a um terreno com declividade zero, profundidade de 10 metros e extensão de 100 metros.

Posteriormente, foram alteradas a declividade para 5%, 10% e 20%, com a mesma profundidade de 10 metros e extensão de 100 metros, anotando-se os resultados numa planilha. Em seguida, alterou-se a extensão para 1000 metros, sempre variando a declividade e registrando os valores. Por fim, variou-se a profundidade do solo para 5 e depois para 2 metros, realizando o mesmo processo descrito anteriormente.

2.2.2. Geração da série climática

A série climática é gerada utilizando-se o sub-programa *Weather Generator*, selecionando no caso um período de 20 anos e com as configurações iguais as especificadas no item 2.1.2. A Figura 6 representa o gráfico da precipitação média anual na estação do Rio de Janeiro, após o período simulado de 20 anos e as Figuras 7 e 8 ilustram as precipitações médias mensais simuladas para os primeiros 10 anos e para os 10 últimos anos, respectivamente. Observa-se que a série anual de precipitação resultou em valores anuais de 755.3 mm no ano 1 até 1478.3 mm no ano 3. Com relação aos valores mensais, verificou-se que os meses de junho a agosto são os meses mais secos com precipitações médias inferiores a 70 mm e os meses de dezembro a março são os mais chuvosos, com precipitações superiores a 120 mm.

A Figura 9 ilustra o gráfico da radiação solar média anual na estação do Rio de Janeiro, após o período simulado de 20 anos e as Figuras 10 e 11 apresentam os gráficos referentes às radiações solares médias mensais simuladas para os primeiros 10 anos e para os 10 últimos anos, respectivamente. Nota-se com relação à radiação solar anual que os valores variam de 17.852 mj/m² no ano 1 até 19.214 mj/m² no ano 20. Considerando-se os valores mensais, observou-se que os

meses de maio a agosto são os meses que apresentam os maiores valores médios de radiação solar, superior a 20 mj/m² e os meses de outubro a março são os meses de menores valores médios de radiação solar, inferior a 18 mj/m².

A Figura 12 ilustra o gráfico da temperatura média anual na estação do Rio de Janeiro, após o período simulado de 20 anos e as Figuras 13 e 14 mostram os gráficos referentes às temperaturas médias mensais simuladas para os primeiros 10 anos e para os 10 últimos anos, respectivamente. Observando-se a série anual de temperatura obtêm-se valores mínimos anuais de 23,22°C no ano 3 até 24,06°C no ano 15. Considerando-se os valores mensais, obteve-se que os meses de junho a setembro são os meses mais frios com temperaturas médias inferiores a 21,5°C, e os meses mais quentes são os meses de novembro a março com temperaturas médias superiores a 24,5°C.

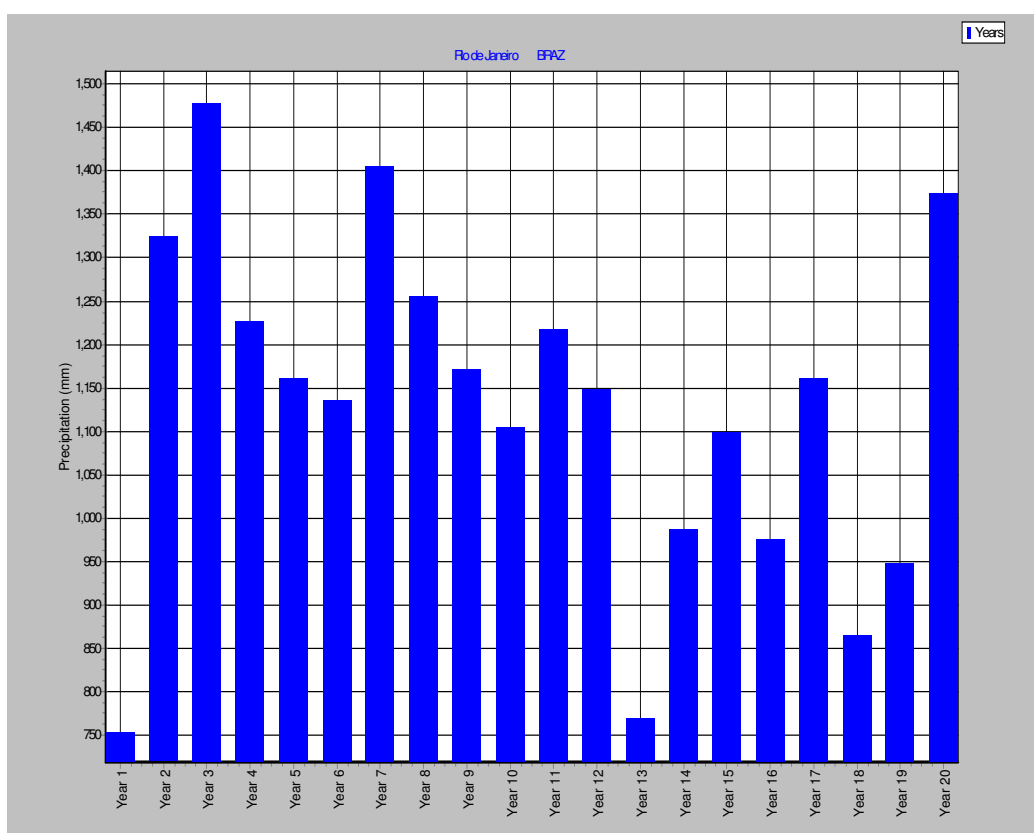


Figura 6: Gráfico da precipitação média anual na estação meteorológica do Rio de Janeiro durante o período simulado no *Weather Generator*: 20 anos.

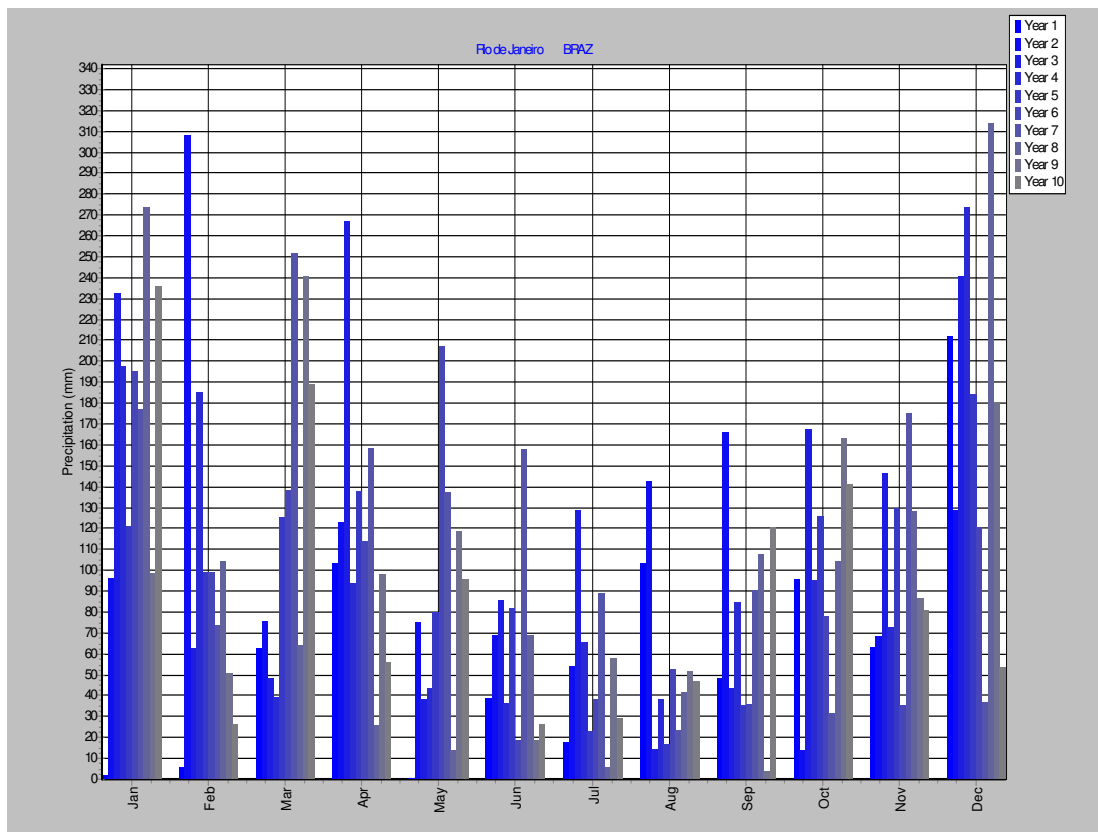


Figura 7: Precipitação média mensal nos 10 primeiros anos simulados.

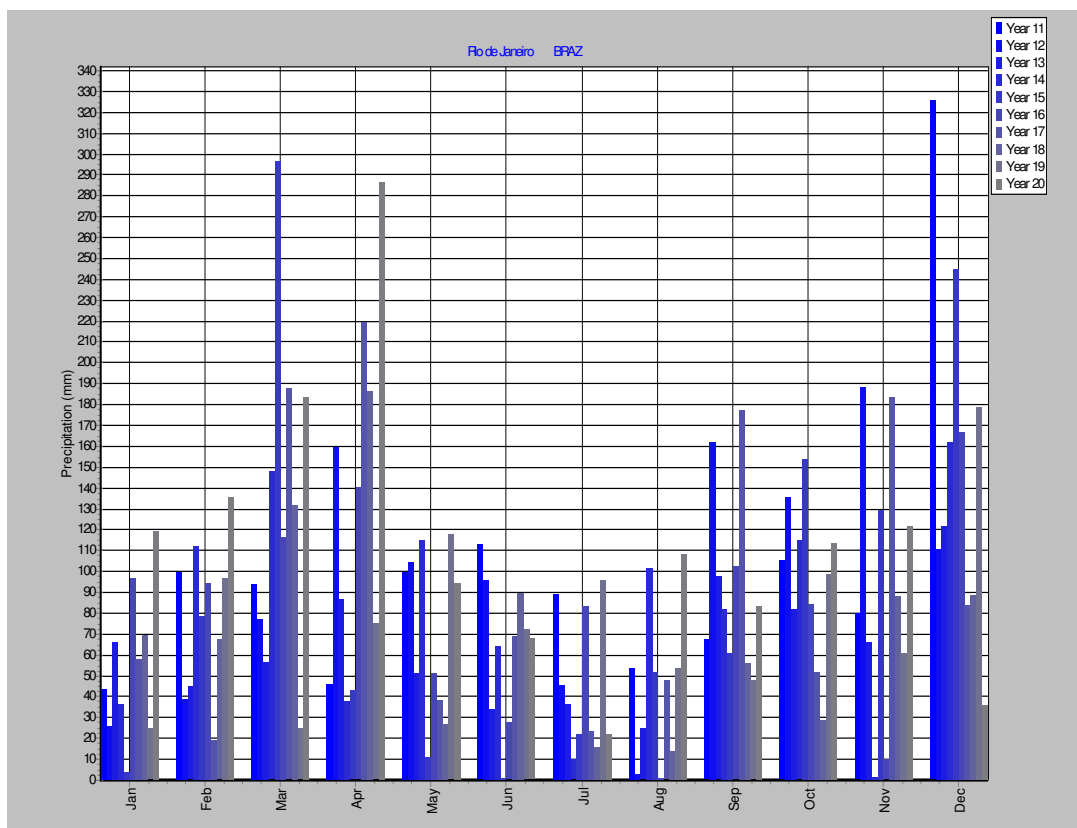


Figura 8: Precipitação média mensal nos 10 últimos anos simulados.

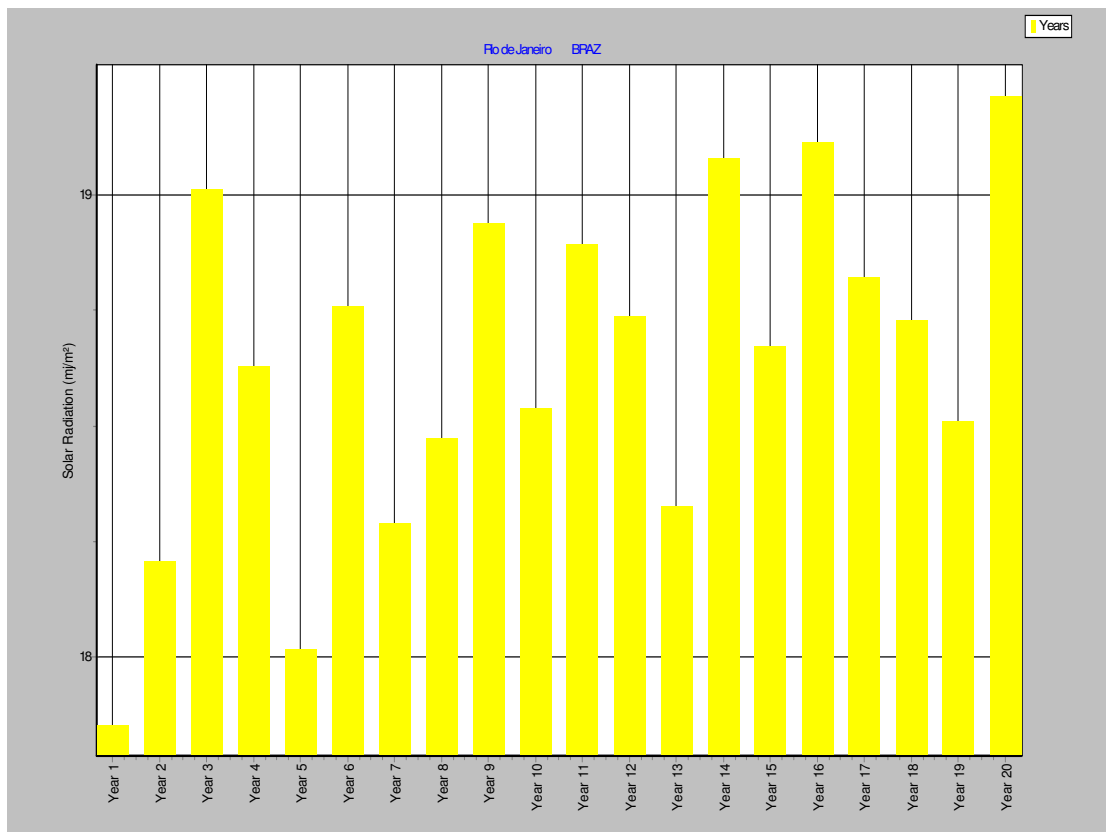


Figura 9: Gráfico da Radiação Solar média anual na estação meteorológica do Rio de Janeiro durante o período simulado no *Weather Generator*: 20 anos.

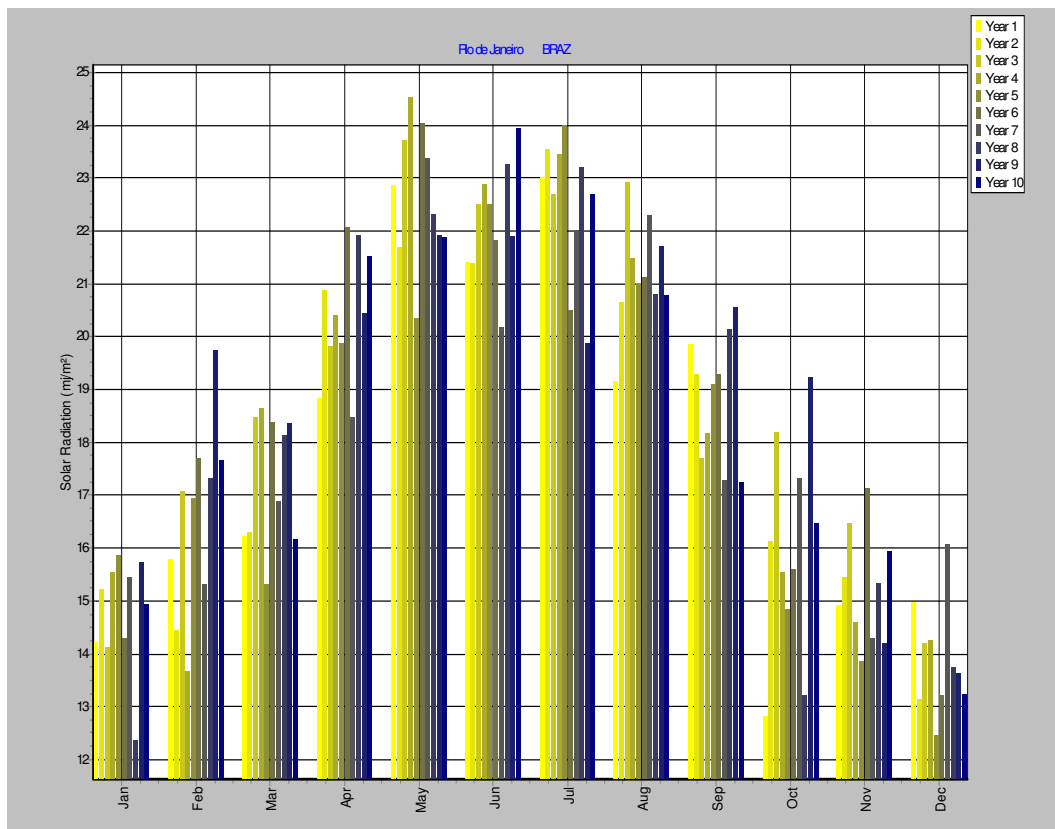


Figura 10: Radiação Solar média mensal nos 10 primeiros anos simulados.

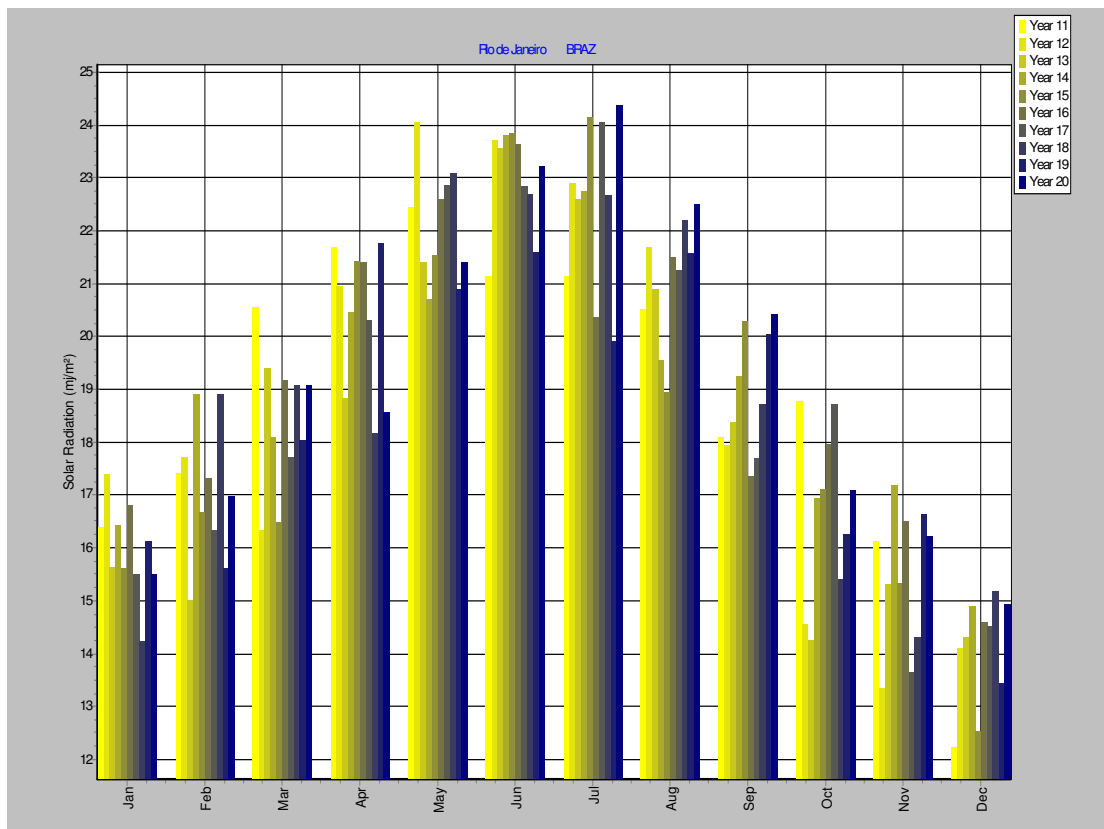


Figura 11: Radiação Solar média mensal nos 10 últimos anos simulados.

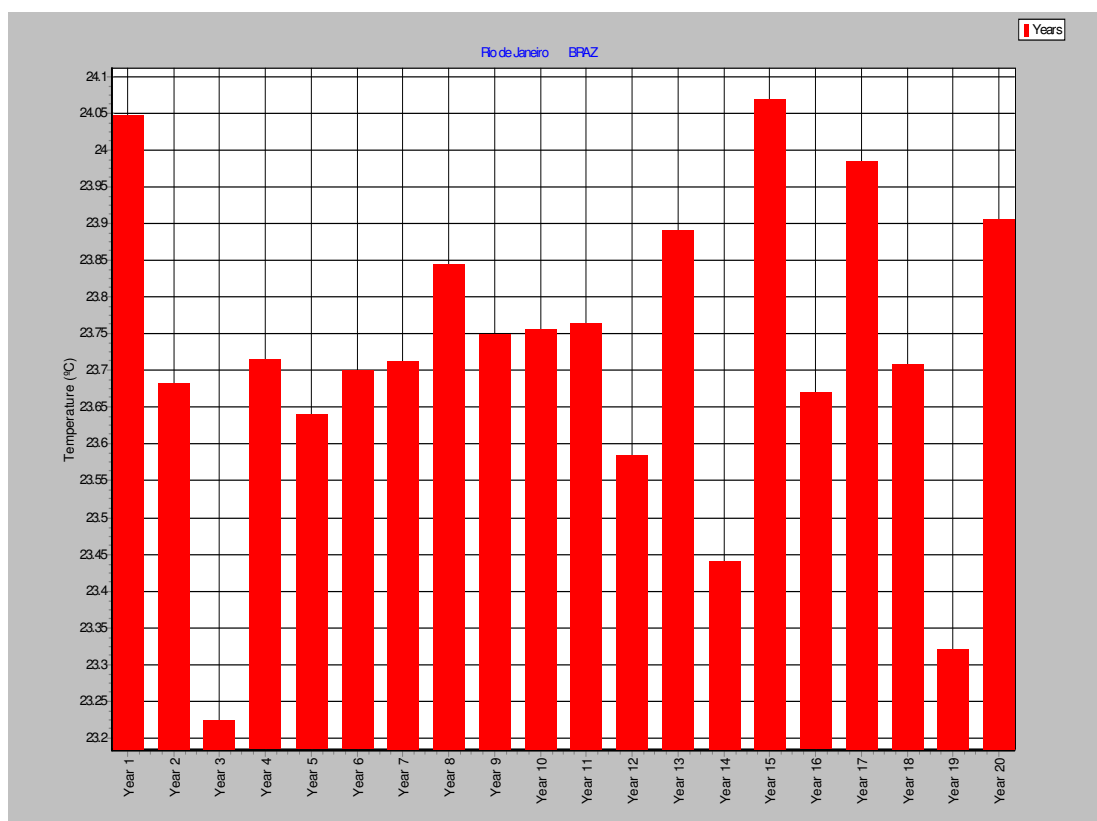


Figura 12: Gráfico da Temperatura média anual na estação meteorológica do Rio de Janeiro durante o período simulado no *Weather Generator*: 20 anos.

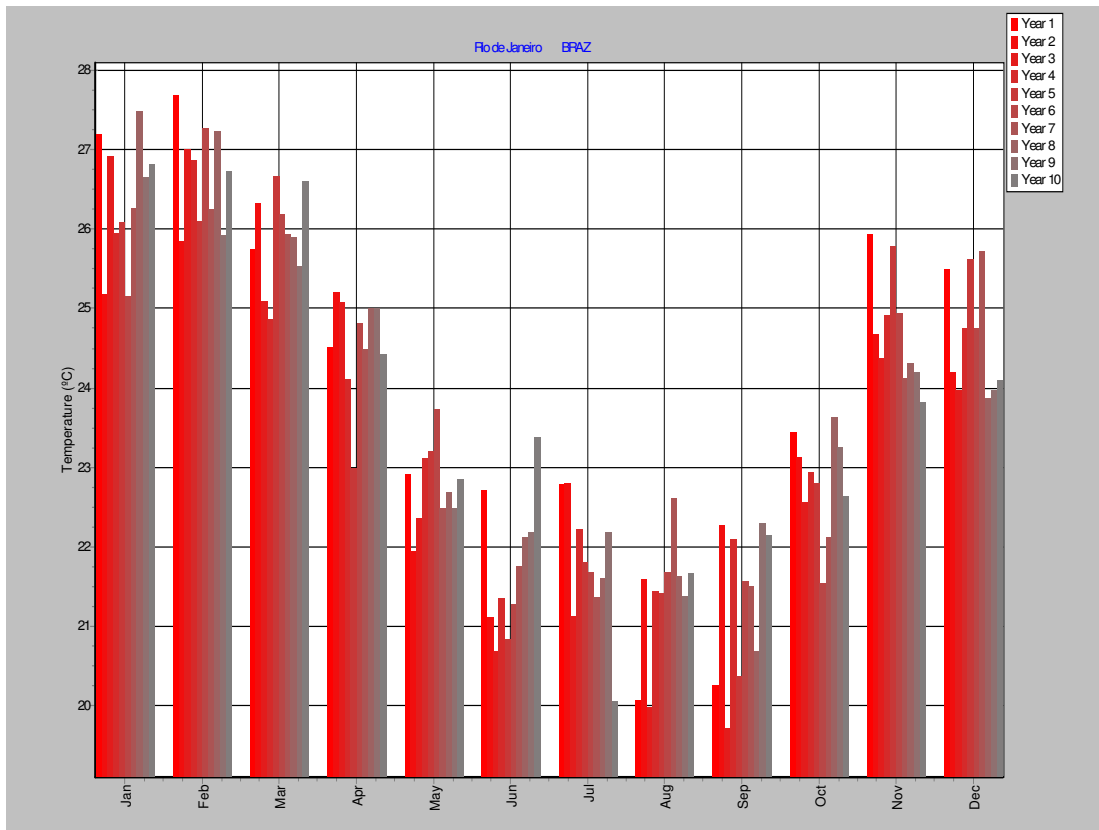


Figura 13: Temperatura média mensal nos 10 primeiros anos simulados.

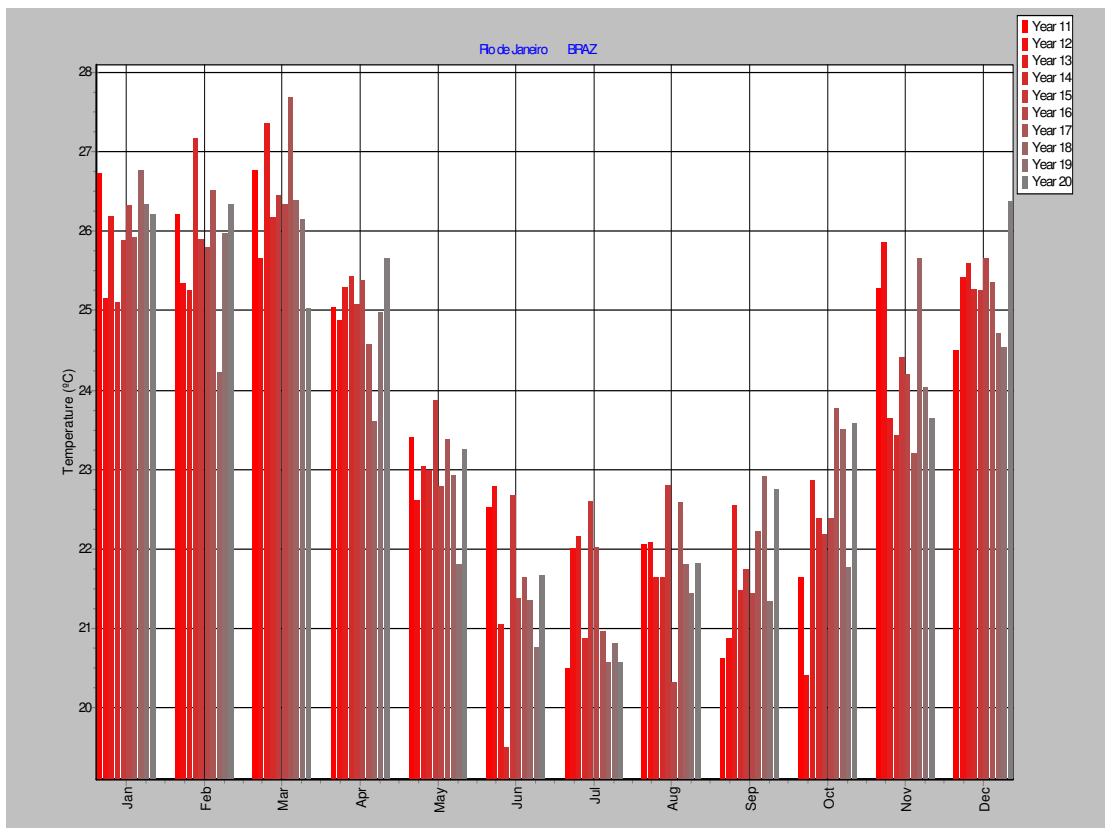


Figura 14: Temperatura média mensal nos 10 últimos anos simulados.

2.2.3. Simulação da infiltração

Após a configuração e tendo sido gerada a série climática no *Weather Generator*, pode-se rodar o módulo *HELP* do programa *Unsat Suite Plus* de modo a calcular o balanço hídrico e extrair a quantidade de água infiltrada no solo no local das amostras recolhidas e consideradas representativas do local.

Considerando-se os fatores climáticos modelados pelo *Weather Generator* e a infiltração calculada pelo *HELP* a partir do perfil do solo, foram obtidos os valores da percolação em 20 anos, em todas as situações testadas, variando-se a declividade, extensão e profundidade do solo no local, conforme especificado anteriormente no item 2.2.1. A Figura 15 ilustra o gráfico para a simulação da infiltração no caso da amostra A-4, contendo a infiltração total em 20 anos de simulação, bem como a precipitação total no período. Através desses fatores é possível obter a taxa de infiltração de cada uma das amostras.

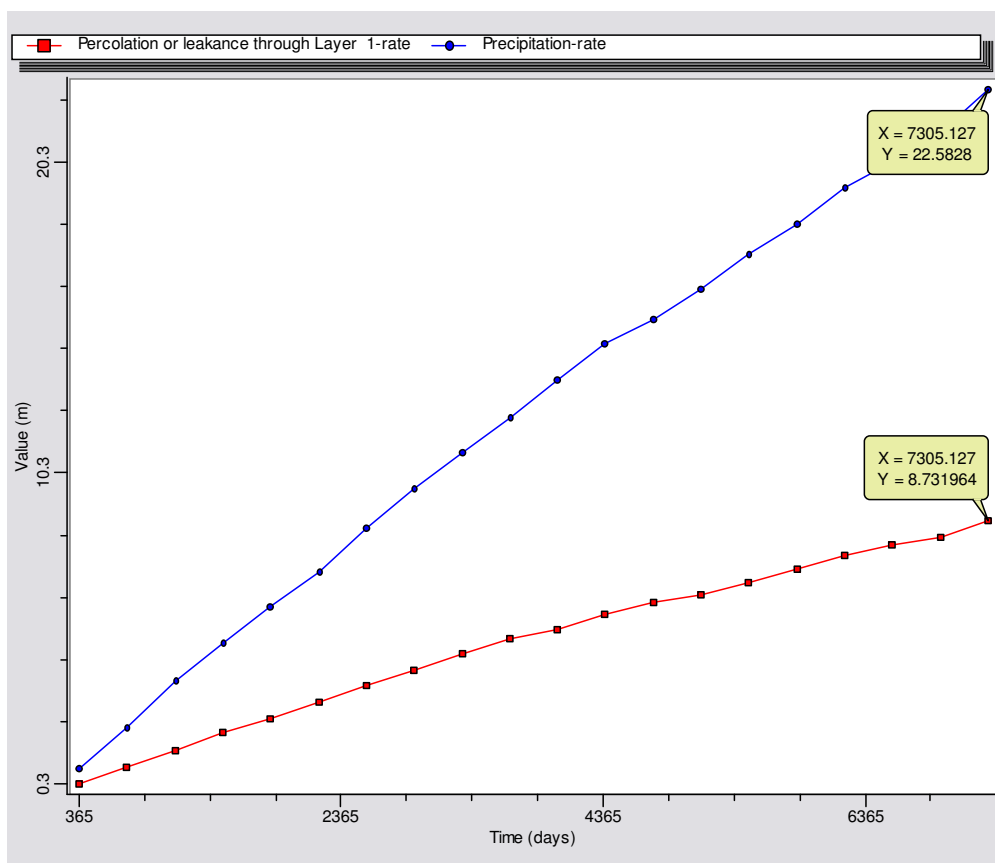


Figura 15: Exemplo de gráfico da precipitação e infiltração acumulada no solo simulado para um período de 20 anos, ponto A-4.

3. RESULTADOS

As amostras modeladas obtiveram taxa de infiltração média de 45%, tendo a amostra A-2 as maiores taxas de infiltração observadas, no caso valores em torno de 75% e a amostra A-3 as menores taxas de infiltração, variando em torno de 30%. Esse fato é ilustrado na tabela 4 para extensão de 100m, profundidade de 10m e as variações de declividade. Verificaram-se também variações significativas de uma amostra para outra.

Observou-se como valor máximo anual para a infiltração no solo 0,8476m na amostra A-2 e mínimo de 0,3443m na amostra A-3, apresentados na tabela 5 para extensão de 100m, profundidade de 10m e as variações de declividade. Para cada uma das amostras, os valores de infiltração média anual encontradas em cada uma das situações propostas variando-se declividade, extensão e profundidade, apresentou valores que não diferem muito nas diferentes situações para cada amostra.

Tabela 4: Valores médios das taxas de infiltração (%) para a extensão de 100m, profundidade de 10m e variações de declividade.

Nº	L = 100 m e H = 10 m			
	Sem inclinação	5% de inclinação	10% de inclinação	20% de inclinação
A-1	0.343	0.342	0.342	0.342
A-2	0.700	0.717	0.751	0.718
A-3	0.320	0.307	0.306	0.305
A-4	0.387	0.380	0.380	0.379
A-5	0.436	0.434	0.433	0.432
A-6	0.368	0.368	0.367	0.368
A-7	0.524	0.524	0.524	0.525
A-8	0.500	0.483	0.479	0.477
A-9	0.395	0.376	0.375	0.374
A-10	0.379	0.375	0.375	0.374
A-11	0.495	0.471	0.469	0.469
A-12	0.652	0.634	0.635	0.632
A-13	0.395	0.394	0.395	0.395
A-14	0.395	0.394	0.393	0.393
A-15	0.387	0.385	0.385	0.384

Tabela 5: Valores médios anuais de infiltração em metros para a extensão de 100m, profundidade de 10 m e variações de declividade.

Nº	L = 100 m e H = 10 m			
	Sem inclinação	5% de inclinação	10% de inclinação	20% de inclinação
A-1	0.3870	0.3864	0.3859	0.3858
A-2	0.7901	0.8094	0.8476	0.8106
A-3	0.3614	0.3469	0.3453	0.3443
A-4	0.4366	0.4292	0.4290	0.4276
A-5	0.4920	0.4899	0.4893	0.4882
A-6	0.4161	0.4153	0.4148	0.4150
A-7	0.5916	0.5913	0.5914	0.5924
A-8	0.5649	0.5450	0.5410	0.5391
A-9	0.4458	0.4251	0.4238	0.4218
A-10	0.4274	0.4240	0.4230	0.4225
A-11	0.5584	0.5320	0.5301	0.5290
A-12	0.7357	0.7156	0.7168	0.7134
A-13	0.4460	0.4454	0.4455	0.4457
A-14	0.4465	0.4448	0.4441	0.4438
A-15	0.4372	0.4346	0.4343	0.4336

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que a taxa de infiltração na região encontra-se em torno de 45%, havendo, entretanto, variações significativas entre as amostras, fato que ocorre devido a variedade de solos representativos existentes na região, desde aluviões até solos residuais, os quais apresentam parâmetros físicos que diferem bastante entre si. Esses influem diretamente na permeabilidade do solo, ocasionando taxas variadas de infiltração.

Recomendamos comparar os resultados de variação do nível d'água nos poços de monitoramento existentes na região e a precipitação no mesmo período, com as taxas de recarga aqui modeladas, de modo a checar os valores obtidos pelo modelo analítico utilizado.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Programa Petrobrás Ambiental pelo suporte financeiro que viabilizou o desenvolvimento desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WHI, UnSat Suíte Plus 2.2 (2004).
RECT, Rosetta Lite versão 1.1 (Junho, 2003)

GEORIO, coleta de dados pluviométricos, <http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/alerta/download.htm>

BARBOSA, A. (2009), Converte 3.1 – programa desenvolvido para o Projeto Macacu, com a finalidade de converter arquivos .xls para .dat lido pelo sub-programa Weather Generator, utilizado durante a modelagem das amostras de solo.

VAN GENUCHTEN, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892898.

VAN GENUCHTEN, M. T., 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model. Research Report 78-WR08. Dept. of Civil Engineering, Princeton Univ., Princeton, New Jersey. 63 pp.