



Aplicação de modelo de balanço hídrico BALSEQ para estimativa da infiltração profunda em região cárstica

(<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.456>)

Rodrigo de Arruda Camargo¹; Eduardo de Aguiar do Couto²; Luna Gripp Simões Alves³; Maria Lúcia Calijuri⁴; Marcos Dornelas Freitas Machado e Silva⁵

Universidade Federal de Viçosa – UFV

Email: ¹rodrigodeacamargo@gmail.com; ²eduardo.acouto@hotmail.com;

³luna.alves@ufv.br; ⁴lucia.calijuri@gmail.com;

⁵marcosdornelases@yahoo.com.br

RESUMO

O atual panorama de escassez hídrica evidencia a necessidade da gestão adequada dos recursos hídricos. Em regiões cársticas, a circulação da água se dá por entre as fraturas existentes, elevando consideravelmente a taxa de infiltração da água, o que explica a baixa incidência de rios e a importância das águas subterrâneas no abastecimento da população. Diante disso, entende-se que conhecer o balanço hídrico se faz necessário, uma vez que este pode auxiliar a tomada de decisões, orientando a gestão das águas. Este trabalho teve como objetivo realizar o balanço hídrico de uma região cárstica, quantificando os valores de água infiltrada, escoada e evapotranspirada, utilizando para isso o modelo BALSEQ. A área de estudo está localizada próxima ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves, no município de Confins, MG. A maior parte da área é ocupada por Formações Florestais (40,9%), seguido por Pastagem (34,5%). Para a estimativa da infiltração profunda, utilizou-se o modelo BALSEQ. O BALSEQ caracteriza-se por ser um modelo numérico de balanço hídrico sequencial em que a infiltração profunda ao final do dia é dada pela diferença entre a precipitação diária e a soma do escoamento superficial, evapotranspiração e a variação da quantidade de água acumulada no solo. Os resultados mostram que, aproximadamente, 60% da precipitação total anual resultam em infiltração profunda, sendo o período de recarga de setembro a março. Após o período de estiagem, as áreas sem cobertura vegetal apresentam maior infiltração profunda, porém, com o passar dos meses, a contribuição das áreas vegetadas torna-se maior, mostrando a importância dessas áreas para a recarga dos aquíferos.

Palavras-chave: Balanço hídrico; região cárstica; modelo BALSEQ.

Application of a water balance model for estimating deep infiltration in a karstic watershed

ABSTRACT

The current scenario of water scarcity evidences the need for an adequate management of water resources. In karstic regions, the water flow through fractures significantly increases the water infiltration rate, which explains the small number of rivers and the importance of groundwater for urban supply. Therefore, the water balance is necessary since it may aid decision making processes and guide water management projects. The objective of this paper was to perform the water balance of a watershed situated in a karstic region quantifying infiltration, runoff and evapotranspiration. The study area is located near the Tancredo Neves

International Airport in Confins, in the state of Minas Gerais, Brazil. Most of the area consists of forest formations (40.9%), and pastures (34.5%). In order to estimate deep infiltration, the BALSEQ model was used. BALSEQ is a numeric model of sequential water balance in which deep infiltration at the end of the day is given by the difference between daily precipitation and the sum of surface runoff, evapotranspiration and the variation of the amount of water stored in the soil. The results show that approximately 60% of total annual precipitation result in deep infiltration, considering the recharge period from September to March. After the dry period, the areas with no vegetal cover present higher deep infiltration. However, over the months, the contribution of the vegetated areas becomes greater, showing the importance of these areas to aquifer recharge.

Keywords: Water balance; karstic areas; BALSEQ model.

1. INTRODUÇÃO

A água representa insumo fundamental à vida, constituindo elemento indispensável e insubstituível em diversas atividades humanas, além de manter o equilíbrio ambiental do planeta. Sem água, a vida na terra não seria possível. A história da água na Terra é complexa e está diretamente relacionada ao crescimento da população humana, ao grau de urbanização e aos usos múltiplos que afetam a sua quantidade e qualidade. Os sistemas aquáticos têm uma grande diversidade de espécies úteis ao homem e são também parte ativa dos ciclos biogeoquímicos e da diversidade biológica do planeta (Tundisi, 2003). Essas considerações explicitam de maneira enfática a necessidade do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos de forma a garantir a disponibilidade de água em quantidade suficiente e qualidade adequada para as gerações presente e futura.

Em regiões cársticas, a gestão eficiente dos recursos hídricos mostra-se indispensável, devido a suas características geomorfológicas e hidrogeológicas peculiares, como a presença de extensas zonas sem correntes de águas superficiais, rápida infiltração de água pluvial e complexa circulação de águas subterrâneas. A água subterrânea no carste possui uma dinâmica própria e, dependendo do aquífero, pode sofrer constante recarga de chuvas ou corpos d'água, assim como interferência direta e indireta das ações do homem (Meneses, 2003). Além disso, em áreas cársticas, as águas subterrâneas são a principal fonte de abastecimento, e devido às características mencionadas, e outras mais, esse recurso é extremamente vulnerável à poluição nesses territórios.

O Brasil possui grandes potenciais de água subterrânea, seja como potencial localizado na forma de umidade do solo que suporta uma exuberante biodiversidade, seja como água que flui no subsolo (Rebouças et al., 2002). Porém, poucos estudos têm se preocupado com essa temática, visando ao apropriado aproveitamento desse recurso ambiental.

A estimativa da recarga das águas subterrâneas é um fator chave em estudos de disponibilidade e modelagem hídrica, sendo assim, essencial para a gestão dos recursos hídricos, na forma de subsídio a tomada de decisões visando ao uso sustentável destes. Contudo, a quantificação da recarga de águas subterrâneas é um processo estimativo, uma vez que não é passível de ser medido diretamente, e existem normalmente dificuldades no que concerne à validação dos resultados obtidos pela aplicação de qualquer método (Oliveira, 2004).

Os métodos que se utilizam de balanço hídrico podem ser utilizados tanto para estimativas de recargas pontuais quanto para escalas maiores, como as bacias hidrográficas. A maior vantagem desses métodos é a geração de informações prontamente disponíveis, que podem ser rapidamente aplicadas, quantificando todo o volume de água afluente e efluente a um sistema. A principal desvantagem está relacionada com o fato de a recarga ser um termo

residual, e sua precisão depender da acurácia de todos os outros termos do balanço hídrico (Ahmad, 2002).

Os recentes avanços nas técnicas de sensoriamento remoto têm possibilitado um aumento na precisão da estimativa de vários parâmetros hidrológicos, principalmente nos campos de áreas irrigadas, por meio do mapeamento da evapotranspiração. A associação desses parâmetros a informações espaciais auxiliam o entendimento do ciclo hidrológico. Uma integração de sensoriamento remoto, Sistemas de Informação Geográfica e coleta de dados *in situ* em muito pode auxiliar na descrição das variações espaciais dos processos hidrológicos, notavelmente na interface terra-atmosfera, nos usos e na recarga de aquíferos subterrâneos.

Nesse contexto, o BALSEQ, um modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário, desenvolvido por Lobo Ferreira para a estimativa da recarga de águas subterrâneas na ilha de Porto Santo - Portugal, é uma importante ferramenta para a estimativa de recarga de aquíferos (Lobo Ferreira, 1981) e, conseqüentemente, à gestão de recursos hídricos. O modelo consiste em dividir a água precipitada em cinco componentes: o escoamento direto, a infiltração superficial, a evapotranspiração real, a água retida no solo e a infiltração profunda. (Oliveira et al., 1994).

O modelo BALSEQ permite obter estimativas de infiltração profunda por incremento do tempo considerado no balanço. Pelo processo de escoamento na zona vadosa, os impulsos de infiltração profunda, estimados para cada incremento de tempo, são atenuados pela redistribuição da umidade que poderá ocorrer na zona vadosa, resultando, assim, um valor de infiltração profunda, que não necessariamente reflete o mesmo valor do impulso de recarga (Oliveira, 2004). Entre os principais trabalhos com aplicação do modelo, destacam-se os desenvolvidos por Oliveira et al. (1994) na península de Setúbal, Portugal, e os de Chachadi et al. (2001) na bacia hidrográfica de Bardez, estado de Goa, Índia e Chachadi et al. (2002) em Kakinada, também na Índia.

Este trabalho teve por objetivo realizar o balanço hídrico por meio do modelo BALSEQ em região cárstica, quantificando os valores de água profundamente infiltrada, escoada e evapotranspirada, considerando para isso as diferentes combinações de uso e classe de solos existentes na área de estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Área de estudo

A área de estudo localiza-se na porção sul da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste Lagoa Santa, contemplando uma área de 6.500 ha, como mostrado na Figura 1. Nessa região, localiza-se o complexo aeroportuário do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (AINT), além dos municípios de Confins e Lagoa Santa.

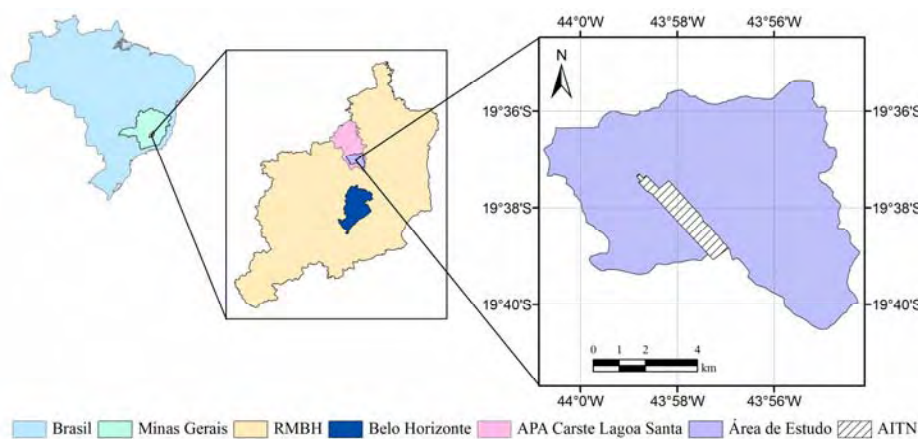


Figura 1. Localização da área de estudo.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Lagoa Santa e seu entorno planáltico enquadra-se na categoria Aw1, ou seja, clima quente com temperatura do mês mais frio superior a 18 °C, e duas estações alternadas, uma chuvosa (verão), e outra seca (inverno), com amplitudes térmicas anuais inferiores a 5°C (Ribeiro, 1995).

A região encontra-se ao norte de Belo Horizonte, e passa por um momento de franca expansão populacional, com taxas de crescimento populacional na ordem de 5% (IBGE, 2010). Com o elevado adensamento da região de Betim e Contagem, o vetor do crescimento populacional da capital mineira passou a apontar para essa região. A construção do AITN, também conhecido por Aeroporto de Confins, acelerou esse processo, já que a partir de sua construção na década de 80, este tem atuado como indutor do desenvolvimento urbano, propiciando a vetorização do fluxo natural de expansão e ocupação urbana em sua direção. A transferência da sede administrativa do governo de Minas Gerais para a região em 2010, além das obras de expansão do aeroporto, também contribuem para o incremento do crescimento populacional da zona norte da região metropolitana de Belo Horizonte.

2.2. Obtenção da base de dados

A determinação da infiltração profunda foi possível a partir da identificação e discretização das unidades Solo x Uso do Solo e Cobertura Vegetal. Para isso, obteve-se a carta pedológica em escala de 1:25.000 a partir do refinamento do mapa pedológico da região em escala 1:50.000, produzido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 1998), seguindo metodologia apresentada por Silva et al. (2010). Na carta pedológica, Figura 2, foram identificadas dez unidades pedológicas, pertencentes a quatro classes distintas, latossolos, cambissolos, argissolos e gleissolos, descritas na Tabela 1.

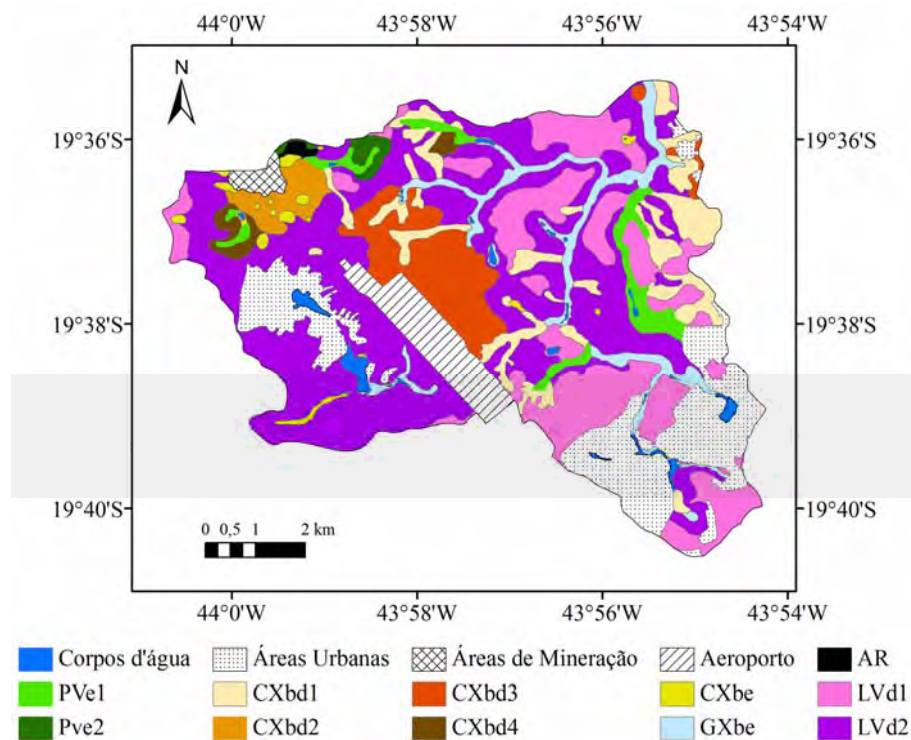


Figura 2. Carta pedológica da porção sul da APA Carste Lagoa Santa.

Tabela 1. Divisão das classes de solo e área ocupada na área de estudo.

Unidades pedológicas	Descrição	Área (%)
PVe1	Argissolo Vermelho Eutrófico, textura muito argilosa, A moderado, relevo plano e suave	2,90
PVe2	Argissolo Vermelho Eutrófico + CambissoloHáplico Tb Distrófico latossólico, ambos textura argilosa, A moderado, relevo ondulado e forte ondulado com microrrelevo forte (cárstico)	0,71
CXbe	CambissoloHáplico Tb Eutróficogleicos, textura muito argilosa, A moderado, relevo plano e suave ondulado (dolinas)	0,98
CXbd1	CambissoloHáplico Tb Distrófico textura muito argilosa cascalhenta e não cascalhenta, pedregoso e não pedregoso, A moderado, relevo suave ondulado com microrrelevo moderado (cárstico)	8,13
CXbd2	CambissoloHáplico Tb Distrófico + CambissoloHáplico Tb Distrófico latossólico, ambos textura muito argilosa, A moderado, relevo suave ondulado com microrrelevo moderado (cárstico)	2,04
CXbd3	CambissoloHáplico Tb Distrófico, textura muito argilosa, cascalhenta e não-cascalhenta, pedregoso e não pedregoso, ambos A moderado, relevo suave ondulado e ondulado	6,85
Cxbd4	CambissoloHáplico Tb Distrófico latossólico + CambissoloHáplico Tb Distrófico, ambos textura muito argilosa, A moderado, relevo suave ondulado e ondulado	1,10
Gxbe	GleissoloHáplico Tb Eutrófico, textura muito argilosa, A moderado, relevo plano e suave ondulado	4,72
LVd1	Latossolo Vermelho Distrófico, textura muito argilosa, A moderado, relevo plano e suave ondulado	16,97
LVd2	Latossolo Vermelho Distrófico, textura muito argilosa, A moderado, relevo suave ondulado e ondulado	34,84

A carta de uso do solo e cobertura vegetal, Figura 3, foi obtida por meio da classificação supervisionada da imagem orbital IKONOS do ano de 2007, com resolução espacial de 1 m. Identificaram-se oito classes, correspondentes a formações florestais, pastagem, solo exposto, sistema viário, aeroporto, áreas urbana, áreas de mineração e corpos d'água.

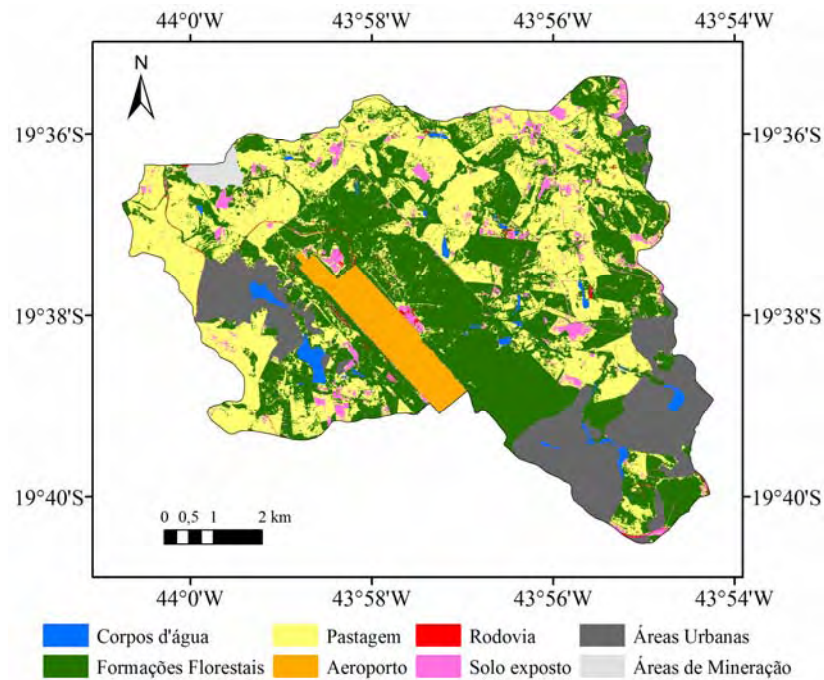


Figura 3. Carta de Uso do Solo e Cobertura Vegetal.

Os dados diários de temperatura foram obtidos do banco de dados do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e os dados diários de precipitação foram obtidos a partir de uma série de 1991-2005 da estação meteorológica instalada no Aeroporto Internacional Tancredo Neves. A umidade relativa do ar média mensal e a velocidade do vento média mensal para altura de 2 metros foram obtidas a partir de uma série de 1961-1990 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do Brasil. A simulação da infiltração profunda pelo modelo BALSEQ foi realizada para o período de 1991-2005.

2.3. Modelo BALSEQ

O modelo BALSEQ (Lobo Ferreira, 1981) é um modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário no nível do solo, desenvolvido em 1981 por Lobo Ferreira para a estimativa da recarga de águas subterrâneas na ilha de Porto Santo. O fluxograma desse modelo é apresentado na Figura 4.

Neste modelo, constituirá infiltração profunda, toda água infiltrada na superfície que excede a capacidade de campo do solo (Oliveira, 2004). Considerando que não há camadas menos permeáveis na zona vadosa abaixo do solo, o valor da infiltração profunda calculado para cada dia traduzirá o valor de recarga que ocorrerá mais tarde. (Paralta et al., 2003). Dessa forma, a infiltração profunda pode ser expressa pela equação 1:

$$I_p = P - ETR - \Delta A_i - ES \quad [1]$$

Em que P é a precipitação, ETR é a evapotranspiração real, ΔA_i a variação do armazenamento da água no solo ao fim de um dia, e ES o escoamento superficial. Para a aplicação sequencial dessa fórmula, é necessário conhecer os valores de precipitação e da evapotranspiração potencial (ETP) referidos a cada intervalo de tempo do balanço, assim como o valor da quantidade máxima de água no solo disponível para evapotranspiração (AGUT).

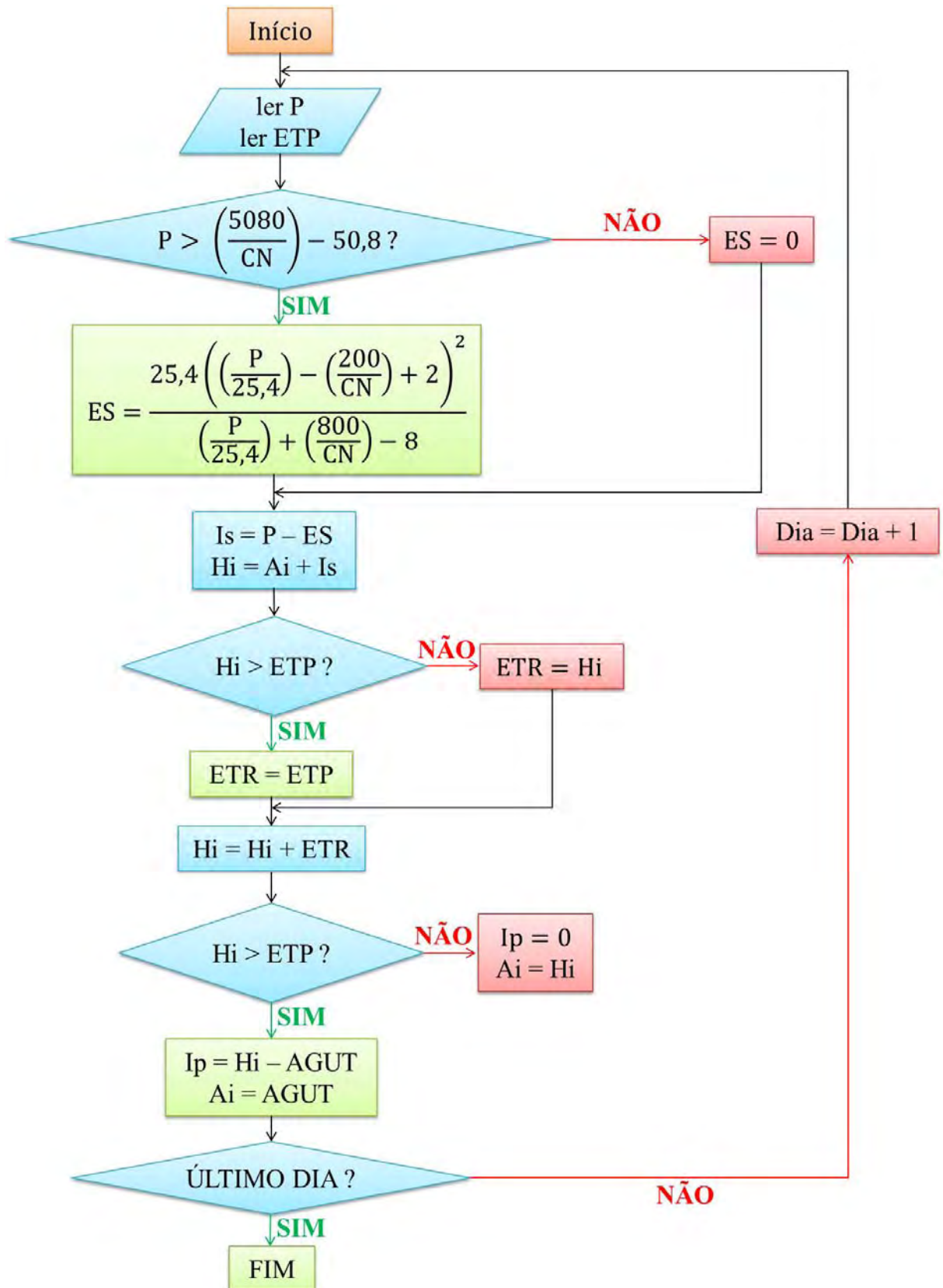


Figura 4. Fluxograma de funcionamento do modelo BALSEQ, P: precipitação; CN: número da curva, ES: escoamento superficial, ETP: evapotranspiração potencial, ETR: evapotranspiração real Is: infiltração superficial, Ai: água armazenada no solo no final do dia, Hi: água armazenada no solo ao longo do dia, AGUT: quantidade máxima de água disponível no solo para evapotranspiração, Ip: infiltração profunda.

A estimativa do escoamento superficial foi realizada a partir do método do número da curva (CN), desenvolvido pela United States Soil Conservation Service (US-SCS, 1972), vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA), que define o número característico de escoamento em função uso e manejo da terra, do grupo de solo, da condição hidrológica e da umidade antecedente do solo. Na atribuição dos valores de CN, considerou-se a influência do relevo, da textura do solo e das características cársticas para condições de umidade antecedente AMC II, chegando aos valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de CN adotados para as relações solo x uso do solo para condições de umidade antecedente AMC II.

Uso do solo e Cobertura Vegetal	Solos			
	Cambissolos	Gleissolos	Latosolos	Argissolos
Formações Florestais	55	77	25	70
Pastagem	66	83	45	77
Rodovia	98	98	98	98
Solo exposto	82	89	72	87
Aeroporto - Área Impermeável	99	99	99	99
Aeroporto – Gramados	66	66	66	66
Área Urbana	96	96	96	96
Área de Mineração	87	87	87	87
Afloramento Rochoso	100	100	100	100

A estimativa da evapotranspiração real (ETR) foi obtida a partir da relação entre a evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente da cultura (Kc), como é mostrado na equação 2. A evapotranspiração de referência foi obtida pelo método da Radiação Solar (Oliveira et al., 2008), método que combina os efeitos de balanço de energia e aerodinâmico (equação 3). Neste trabalho, considerou-se o Kc de 1,5 para as formações florestais e 1 para as regiões de pastagem e para as áreas de gramado do aeroporto, sendo esses valores retirados do boletim FAO 56 (2005).

$$ETR = Eto \times Kc \quad [2]$$

$$Eto = W \times cv \times Rs \quad [3]$$

em que ETo - evapotranspiração de referência, por Radiação Solar (mm.dia-1), cv - fator de ajuste, em função dos intervalos de velocidade média do vento (m.s-1) medida a 2 m de altura e intervalos de umidade relativa média (%), W - fator de ponderação calculado em função da temperatura média diária do ar, e Rs - radiação solar incidente (mm.dia-1).

O AGUT foi estimado a partir dos parâmetros: capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PM) e profundidade do solo sujeita a evapotranspiração (rp), de acordo com a equação 4. Os valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente foram obtidos seguindo-se a metodologia de Lopes et al. (2009). Os valores para a profundidade do solo sujeita a evapotranspiração foram obtidos a partir de trabalhos de Almeida e Soares (2003). Na Tabela 3, apresentam-se os valores utilizados no cálculo do AGUT.

$$AGUT = \frac{CC-PM}{10} \times rp \quad [4]$$

Tabela 3. Valores utilizados para o cálculo do AGUT.

Solo x Uso e Cobertura	CC (g/100g)	PM (g/100g)	rp (cm)	AGUT (mm)
CXbd1 + Formações	27,6	12,4	150	228,0
CXbd1 + Pastagens	27,6	12,4	50	76,0
CXbd1 + Rodovia	27,6	12,4	0	0,0
CXbd1 + Solo Exposto	27,6	12,4	5	7,6
CXbd2 + Formações	29,4	13,0	150	246,0
CXbd2 + Pastagens	29,4	13,0	50	82,0
CXbd2 + Rodovia	29,4	13,0	0	0,0
CXbd2 + Solo Exposto	29,4	13,0	5	8,2
CXbd3 + Formações	30,2	14,2	150	240,0
CXbd3 + Pastagens	30,2	14,2	50	80,0
CXbd3 + Rodovia	30,2	14,2	0	0,0
CXbd3 + Solo Exposto	30,2	14,2	5	8,0
CXbd4 + Formações	31,0	15,0	150	240,0
CXbd4 + Pastagens	31,0	15,0	50	80,0
CXbd4 + Rodovia	31,0	15,0	0	0,0
CXbd4 + Solo Exposto	31,0	15,0	5	8,0
CXbe + Formações	34,8	22,6	150	183,0
CXbe + Pastagens	34,8	22,6	50	61,0
CXbe + Rodovia	34,8	22,6	0	0,0
CXbe + Solo Exposto	34,8	22,6	5	6,1
GXbe + Formações	39,0	19,0	80	160,0
GXbe + Pastagens	39,0	19,0	40	80,0
GXbe + Rodovia	39,0	19,0	0	0,0
GXbe + Solo Exposto	39,0	19,0	5	10,0
LVd1 + Formações	25,0	23,4	500	80,0
LVd1 + Pastagens	25,0	23,4	50	8,0
LVd1 + Rodovia	25,0	23,4	0	0,0
LVd1 + Solo Exposto	25,0	23,4	5	0,8
LVd2 + Formações	28,0	21,0	500	350,0
LVd2 + Pastagens	28,0	21,0	50	35,0
LVd2 + Rodovia	28,0	21,0	0	0,0
LVd2 + Solo Exposto	28,0	21,0	5	3,5
PVe1 + Formações	33,5	22,4	250	277,5
PVe1 + Pastagens	33,5	22,4	50	55,5
PVe1 + Rodovia	33,5	22,4	0	0,0
PVe1 + Solo Exposto	33,5	22,4	5	5,6
PVe2 + Formações	35,0	23,6	250	285,0
PVe2 + Pastagens	35,0	23,6	50	57,0
PVe2 + Solo Exposto	35,0	23,6	5	5,7
Aeroporto - Gramados	22,0	15,0	50	35,0

Por não conhecer o valor da quantidade de água armazenada no solo anterior ao primeiro dia da simulação, considerou-se esse valor como sendo equivalente à capacidade de campo para cada classe de solo. Desse modo, a modelagem conseguiu gerar os dados finais de infiltração profunda. O passo seguinte foi uma calibração da modelagem com uma nova estimativa dos valores de A_i para o dia 31 de dezembro de 1990 a partir de uma média entre os valores de A_i gerados pela modelagem para os cinco últimos dias de 1991 a 2004 e os primeiros cinco dias de 1992 a 2005.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios mensais de infiltração profunda gerados pelo modelo BALSEQ para toda a bacia, juntamente com os parâmetros calculados de precipitação, escoamento superficial e evapotranspiração real são apresentados na Tabela 4. A variação mensal dos componentes do balanço hídrico para a área de estudo pode ser observado na Figura 5.

Tabela 4. Valores médios dos componentes do balanço hídrico para o período 1991-2005.

MÊS	PT	ES	ETR	Ip
Janeiro	314,66	121,68	42,23	151,02
Fevereiro	168,62	60,06	42,69	75,45
Março	176,47	68,09	50,98	72,52
Abril	40,92	12,07	41,01	17,64
Maio	30,30	9,14	16,01	12,90
Junho	5,53	1,26	2,76	2,74
Julho	6,13	1,52	1,75	2,91
Agosto	11,38	3,39	3,17	4,86
Setembro	60,47	20,23	14,14	23,85
Outubro	82,73	25,93	22,70	34,24
Novembro	248,03	91,83	35,34	97,35
Dezembro	336,13	128,49	38,81	145,85
Total Anual	1481,35	543,69	311,58	641,33

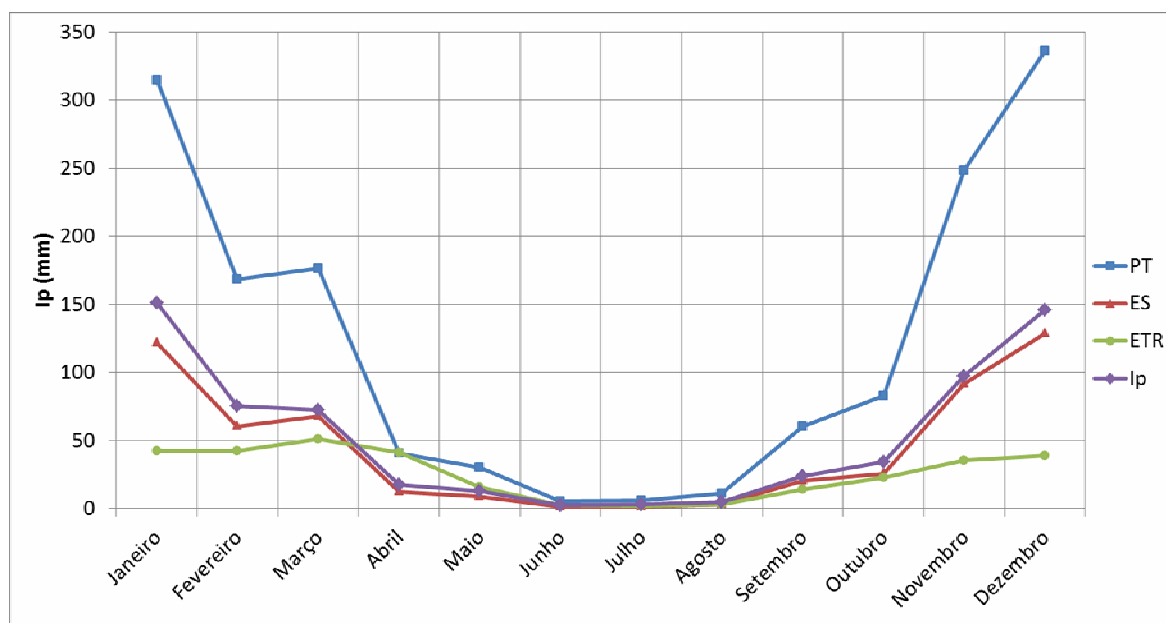


Figura 5. Valores médios mensais dos componentes do balanço hídrico para o período de 1991-2005.

A estimativa da infiltração profunda ao longo do período apresentou valores próximos a 43% da precipitação total, com as recargas médias anuais variando entre os meses, de 39% a 50% da média da precipitação anual no período estudado. Isso representa um volume de, aproximadamente, 4×10^7 m³ de água. O considerável valor de infiltração pode estar relacionado às características geomorfológicas e hidrogeológicas comuns aos carstes. Somado a esse fator, a grande presença de latossolos na área estudada (51,41%) também pode contribuir para o elevado valor de recarga. Os latossolos apresentam avançado estágio de intemperização, sendo solos muito evoluídos, variando de fortemente a bem drenados (EMBRAPA, 2006). Além disso, são altamente estruturados e estão associados a profundo manto de alteração, que alcança mais de 80 metros, onde a água encontra boas condições de infiltração, por tratar-se de meio poroso. Além das características físicas favoráveis à infiltração, a pequena fração urbanizada da região também apresenta significativa contribuição nesses resultados.

O resultado da aplicação do modelo sugere que na área de estudo, em alguns momentos, a evapotranspiração apresenta valores maiores do que o escoamento superficial. Essa peculiaridade está relacionada ao padrão de uso do solo e cobertura vegetal observado, em que significativa fração da precipitação sofre evapotranspiração. A constatação de que a evapotranspiração apresenta valores elevados quando comparada ao escoamento superficial, e dessa forma, contribui mais efetivamente para a diminuição da quantidade de água disponível para a infiltração, pode mascarar o impacto negativo da impermeabilização do solo no ciclo hidrológico se não for considerada a proporção da área total ocupada por cada uso existente. É importante mencionar que o processo de urbanização inadequada, e a consequente impermeabilização do solo podem ocasionar prejuízos relacionados à disponibilidade hídrica, como a diminuição da recarga dos aquíferos devido à redução das taxas de infiltração, e também o assoreamento de corpos d'água como consequência do maior arraste de partículas e desencadeamento de processos erosivos. Além disso, o aumento de áreas impermeabilizadas pode proporcionar o aumento da vazão de cursos d'água em períodos chuvosos, elevando as chances de ocorrência de inundações (Tucci, 1995).

O processo de escoamento superficial é dependente da existência de precipitação, o que pode explicar o comportamento semelhante das curvas das variáveis citadas, como observado na Figura 5. Por outro lado, a evapotranspiração apresenta padrão pouco variável ao longo do ano em relação aos outros parâmetros. Muito mais do que à precipitação, essa perda de água está relacionada a outros fatores, como a demanda hídrica das plantas e o volume de água armazenado no solo (Lopes et al., 2009).

Em relação à infiltração profunda, observa-se que depois do período de estiagem, esta retoma seu crescimento tão logo a intensidade de precipitação aumenta. Esse comportamento pode ser atribuído a elevada permeabilidade do solo devido às características cársticas da região. Em terrenos menos drenados, espera-se um retardo no crescimento da curva de infiltração profunda em relação à de precipitação, correspondente ao tempo necessário para que infiltre uma lâmina superior à capacidade de retenção de água no solo, ou seja, que seja superada a capacidade de campo. A Figura 6 apresenta a dinâmica temporal, ao longo dos meses do ano, da infiltração profunda.

No início do período chuvoso, como se pode observar no mês de setembro, as áreas de solo exposto apresentam maior infiltração profunda que as demais regiões. O solo sem cobertura vegetal, muito embora esteja propenso aos impactos das gotas de chuva e, conseqüentemente, ao processo de impermeabilização, apresenta baixa capacidade de retenção de água, permitindo a ocorrência da infiltração profunda logo nos primeiros dias de chuva. Em outras palavras, o escoamento em áreas de solo exposto tende a ser maior do que em áreas vegetadas, todavia, a lâmina d'água que vier a infiltrar nessas áreas, tornar-se-á infiltração profunda rapidamente devido à baixa capacidade de retenção. As áreas vegetadas,

no entanto, apresentam alta capacidade de retenção, principalmente nas regiões onde as raízes estão concentradas. Nessas áreas, a precipitação é interceptada pela vegetação e infiltra no solo lentamente, o que retarda o início da contribuição para a recarga dos aquíferos subterrâneos. Além disso, o significativo volume de água evapotranspirada nas áreas vegetadas também contribui para o retardo da infiltração profunda. A alta capacidade de retenção de água nos solos nas áreas florestadas, somada ao baixo volume escoado, é importante para garantir a disponibilidade de água no período de estiagem.

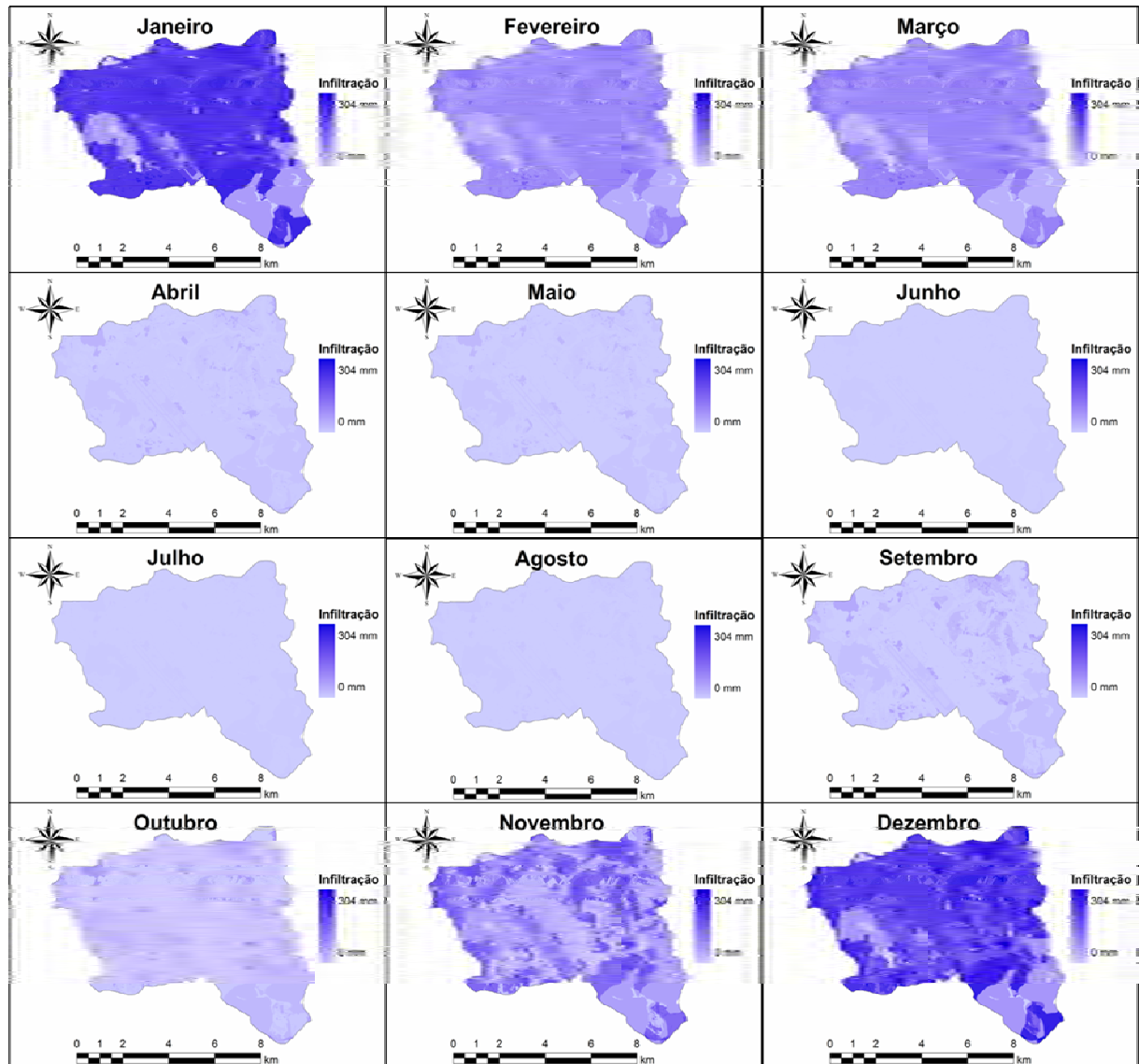


Figura 6. Ilustração da recarga na área de estudo mês a mês.

Apesar da infiltração profunda se dar de forma mais lenta nas áreas vegetadas no começo do período chuvoso, com o passar dos meses a lâmina infiltrada nessas regiões aumenta, e nos meses de novembro a janeiro passa a ser responsável pela principal parte do total infiltrado. Isso ocorre devido ao menor escoamento superficial existente nas áreas florestadas em relação às áreas de solo exposto, o que faz com que maior quantidade de água fique disponível para a infiltração.

Com o fim do período de chuvas, as áreas de solo exposto continuam contribuindo e as áreas florestadas já apresentam redução na infiltração, já que o volume de água perdida por evapotranspiração é mantido, e o volume precipitado é reduzido. No mês de abril, por

exemplo, as pequenas frações que continuam contribuindo para infiltração são as regiões de solo exposto.

4. CONCLUSÃO

O modelo BALSEQ mostrou-se passível de aplicação em região cárstica, permitindo a estimativa da infiltração profunda ao longo dos anos, e a avaliação da sua dinâmica temporal, mês a mês. A infiltração profunda apresentou valores próximos a 43% da precipitação total, com as recargas médias anuais variando entre os meses, de 39% a 50% da média da precipitação anual no período estudado. O que representa um volume de aproximadamente $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ de água. O considerável valor de infiltração pode estar relacionado às características geomorfológicas e hidrogeológicas comuns aos carstes somado a grande presença de latossolos na área estudada.

Observou-se que com o início da chuva, as áreas de solo exposto apresentam maior contribuição para a infiltração profunda, em comparação com os outros usos. Porém, com o passar dos meses e o aumento da precipitação, as áreas de floresta e pastagem tendem a contribuir mais com a infiltração profunda, sendo inclusive a principal responsável pela lâmina total infiltrada na área de estudo. Com o fim do período chuvoso, a contribuição das áreas de floresta e pastagem são praticamente nulas, devido a evapotranspiração, sendo as áreas de solo exposto responsável pela recarga dos aquíferos.

A discriminação da contribuição de recarga para cada tipo e uso do solo pode prover subsídios à tomada de decisões visando o uso sustentável dos recursos ambientais da região, à medida que torna possível o estabelecimento de cenários de alterações no uso e ocupação do solo e os impactos na recarga do aquífero cárstico.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FAPEMIG pelo apoio por meio de bolsas, financiamento pelo projeto Avaliação do uso e ocupação do solo e proposição de zoneamento ambiental para microbacias da região da APA Carste Lagoa Santa.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na Costa Leste do Brasil. *Revista Árvore*, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622003000200006>
- AHMAD, M. D. **Estimation of net groundwater use in irrigated river basins using geo-information techniques: a case study in Rechna Doab, Pakistan.** 2002. 160f. Tese (Doutorado) - Wageningen University, Ensched, 2002.
- CHACHADI, A. G.; RAIKAR, P. S.; LOBO FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M. **GIS and mathematical modelling for the assessment of groundwater vulnerability to pollution: application to an indian case study area in Goa.** Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2001. 69p.
- CHACHADI, A. G.; MOINANTE, M. J.; OLIVEIRA, M. M. **Measuring, monitoring and managing sustainability: the coastal dimension – coastin.** Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2002. 43p. Relatório 279/02 – GIAS.

CAMARGO, R. A.; COUTO, E. A.; ALVES, L. G. S.; CALIJURI, M. L.; MACHADO e SILVA, M. D. F. Aplicação de modelo de balanço hídrico BALSEQ para estimativa da infiltração profunda em região cárstica. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 303-317, 2011. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.456>)

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **APA Carste de Lagoa Santa**: meio físico. Belo Horizonte, 1998. 253p. v. 1.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMPBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. 2005. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490E/x0490e00.htm#Contents>>. Acesso em: 15 maio 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades@**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: fev. 2010.

LOBO FERREIRA, J. P. Mathematical model for the evaluation of the recharge of aquifers in semiarid regions with Scarce (Lack) hydrogeological data. In: EUROPEAN MECHANICS COLLOQUIUM - EUROMECH, 143., 2-4 Sep. 1981, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1981.

LOPES, J. D. S.; LIMA, F. Z. de; OLIVEIRA, F. G. **Irrigação por aspersão convencional**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2009. 333p.

MENESES, I. C. R. R. C. **Análise geossistêmica na área de proteção ambiental (APA) Carste Lagoa Santa, MG**. 2003. 187f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

OLIVEIRA, M. M.; MOINANTE, M. J.; LOBO-FERREIRA, J. P. **Estudo da caracterização dos aquíferos e dos consumos de água na Península de Setúbal**. Contribuição do LNEC para o Relatório da HP a Entregar à EPAL em Fevereiro de 1994. Relatório Final. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994. Relatório 37/94 – GIA.

OLIVEIRA, M. M. Aplicação de dois métodos diferentes para a estimativa da recarga de águas subterrâneas numa área de Estarreja. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7., 2004, Lisboa. **Resumos...** Lisboa: APRH, 2004. 14 p.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; SANTOS, F. X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.**, v. 3, n. 1, p. 58-67, 2008.

PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M. M.; LUBCZYNSKI, M. W.; RIBEIRO, L. F. Avaliação da recarga do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos – disponibilidades hídricas e implicações agroambientais. In: SILUSBA – SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6., 2003, Cidade da Praia. **Anais...** Cidade da Praia: APRH, 2003. p. 501-506.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 2. ed. São Paulo: Escrituras, 2002. 703 p.

RIBEIRO, C. M. O clima no Planalto de Lagoa Santa-MG. In: KOHLER, H. C. (Coord.). **Estudos ambientais e propostas de manejo, na região do carste, no Planalto de Lagoa Santa**. Projeto FAPEMIG: CEX-1133/90. Belo Horizonte: FEPEMIG, 1995. Relatório Final. Parte 2. v.1.

CAMARGO, R. A.; COUTO, E. A.; ALVES, L. G. S.; CALIJURI, M. L.; MACHADO e SILVA, M. D. F. Aplicação de modelo de balanço hídrico BALSEQ para estimativa da infiltração profunda em região cárstica. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 303-317, 2011. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.456>)

SILVA, M. D. F. M.; CALIJURI, M. L.; CAMARGO, R. A.; ALVES, H. O.; SANTIAGO, A. F. Uso de geoprocessamento para refinamento do mapa de solos na APA Carste Lagoa Santa – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 24., 2010, Recife. **Anais...** Aracajú: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 2010.

TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (Org.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH; Editora da UFRGS, 1995. Cap. 1, p. 15-36.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. 2. ed. São Paulo: Rima, 2003. 248 p. UNITED STATES GOVERNMENT. Soil Conservation Service. **National engineering handbook: hydrology**. Washington, DC, 1972. Section 4.