

Modelação Hidrológica da Bacia Drenante da Albufeira de Pracana

Anabela Venâncio¹; Flávio Martins¹; Pedro Chambel² e Ramiro Neves²

¹ HIDROTEC - Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Algarve, Campus da Penha 8005-139 Faro, Portugal.

² Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, Portugal.

RESUMO

O uso inadequado do solo assim como práticas agrícolas incorrectas podem ter como consequência a contaminação dos recursos hídricos por poluição de origem difusa.

Na perspectiva de identificar possíveis fontes de poluição, o objectivo deste trabalho é quantificar as cargas de nutrientes de origem natural, agrícola e urbana que chegam à albufeira de Pracana e analisar as alterações de carga resultantes de diferentes cenários do uso do solo, recorrendo à modelação matemática. Este conhecimento contribui para a compreensão dos processos que dão origem à poluição existente na albufeira e os factores que condicionam o seu estado trófico.

A ferramenta utilizada para a realização do estudo foi o modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool, USDA Agricultural Research Service).

Palavras-chave: bacia hidrográfica de Pracana, poluição difusa, nutrientes, modelação matemática, SWAT

1. Introdução

O uso inadequado do solo assim como práticas agrícolas incorrectas pode ter como consequência a contaminação dos recursos hídricos por poluição de origem difusa.

Para compreender e esclarecer a origem da poluição que chega às albufeiras vários estudos têm sido feitos combinando diversas metodologias, nomeadamente utilizando as guidelines OSPAR, (Convenção para a Protecção do Meio Marinho do Atlântico Nordeste), método dos coeficientes de exportação (Tanik,1999), modelos matemáticos, entre outros. Paralelamente têm vindo a ser desenvolvidos modelos hidrológicos e de qualidade da água para analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água.

Os resultados desses modelos juntamente com as medidas existentes fornecem pistas para a identificação da origem e natureza da poluição e para a quantificação das suas cargas.

O objectivo deste trabalho é quantificar as cargas de nutrientes de origem natural, agrícola e urbana que chegam à albufeira de Pracana e analisar as alterações de carga resultantes de diferentes cenários do uso do solo, recorrendo à modelação matemática. Com este estudo espera-se adquirir mais conhecimento sobre a origem da poluição existente na albufeira e os factores que condicionam o seu estado trófico.

A ferramenta utilizada para a realização do estudo foi o modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool, USDA Agricultural Research Service).

Em síntese, nas secções seguintes são apresentadas as componentes principais que permitiram obter os resultados para os cenários pretendidos

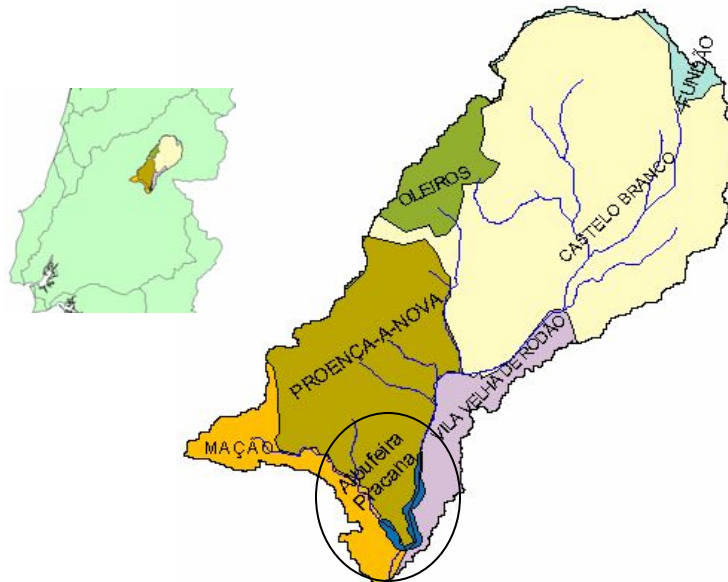
2. Caracterização da Área de Estudo

2.1. Localização Geográfica

A bacia drenante da albufeira de Pracana situa-se na bacia hidrográfica do Tejo e tem uma área aproximada de 1433 Km².

Os principais concelhos são Castelo Branco e Proença-A-Nova, ocupando 80% da bacia. Os outros concelhos têm uma pequena parte da sua área no interior da bacia, Figura 1. A albufeira de Pracana, localiza-se entre o concelho de Mação e Vila Velha de Ródão, o seu uso principal é hidroeléctrico e o curso de água que a alimenta é o rio Ocreza.

Figura 1 - Localização da Bacia Drenante da Albufeira de Pracana.



2.2. Clima

O território de Portugal Continental localiza-se entre as latitudes 37° e 42° N e as longitudes de 9.5° e 6.5° W. Está situado na zona de transição entre o anticiclone subtropical (anticiclone dos Açores) e a zona das depressões subpolares. Os factores que mais condicionam as condições climáticas em Portugal Continental são, além da latitude, a orografia, a influência do oceano Atlântico e a continentalidade, (Perfil Climático de Portugal Continental, 1961 a 1990).

A bacia de Pracana encontra-se numa região que em termos climáticos gerais, caracteriza-se por clima temperado, com Verões quentes e secos e com Invernos com precipitação. Devido à variação altimétrica, apresenta diferenças à medida que caminhamos para as zonas mais altas. A precipitação nas zonas altas alcança valores na

ordem dos 1400 mm por ano, nas zonas mais baixas a precipitação diminui para os cerca de 900 mm por ano. A temperatura média anual situa-se entre as isotérmicas 9° e 20°.

2.3. Breve descrição das cargas de nutrientes na Bacia Drenante da Albufeira de Pracana

As cargas afluentes à albufeira de Pracana e as cargas na respectiva bacia foram alvo de estudo para o Plano de Bacia Hidrográfica do Tejo (PBH). De acordo com o PBH as cargas estimadas para o azoto e o fósforo, apresentadas cargas totais (urbanas + industriais), são respectivamente 213 ton/ano e 63 ton/ano. Estas cargas são devidas ao facto de existir uma forte componente industrial que se localiza maioritariamente no concelho de Castelo Branco.

No que diz respeito a agropecuária, o estudo efectuado da Comissão Europeia ADAS/NIVA (2002), estimou que pressão de origem agrícola é baixa pois os pastos permanentes e as oliveiras constituem 57% da Superfície Agrícola Útil (SAU) (40% de pastos e 17 % de olival). Em relação à pecuária este estudo estimou as cargas de azoto e de fósforo em cerca dos 170kg/haSAU/ano. Ou seja os animais podem ser indicativos de fontes poluidoras pontuais no entanto são mais significativas a nível local.

3. Descrição do Modelo SWAT

O modelo SWAT (*Soil Water Assessment Tool*), trata-se de um modelo matemático, originado em 1996 e continuamente desenvolvido desde então pelo *Agricultural Research Service* e pelo *Texas A&M University*, tem como principal função a análise dos impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água (Neitsch et al., 2000).

3.1. Ciclo Hidrológico do Swat

O escoamento ou hidrologia da bacia é a principal força motriz para o transporte de nutrientes, sedimentos, ou quaisquer outras propriedades. No Swat o ciclo hidrológico tem duas divisões principais: i) Fase de terra; ii) Fase da rede de canais e albufeiras. Pretende-se com este trabalho estimar as fontes difusas para o rio. Não é objectivo deste estudo utilizar o Swat para estimar a retenção de nutrientes na rede de canais e albufeiras. Deste modo não serão aqui descritos os processos modelados na fase de rede de canais e albufeiras do Swat.

Na fase de terra a produção de água superficial da bacia hidrográfica é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i + q_{lat}) \text{ eq 1}$$

Onde:

- SW_t - humidade do solo final em mm,
- SW_o - humidade do solo inicial em mm,
- t – tempo (dias),
- R - precipitação no dia i em mm,

Q - escoamento superficial no dia i em mm,
ET - evapotranspiração no dia i em mm,
P - percolação no dia i em mm,
 q_{lat} - escoamento lateral no dia i em mm,
 w_{revap} – ascensão capilar do aquífero para o solo no dia i em mm,

O escoamento superficial é estimado usando a equação de *runoff* do *Soil Conservation Service-SCS* (Neitsch et al., 2000).

A escala da CN não é linear, variando entre 1 e 100. Estes valores extremos correspondem, respectivamente, a uma cobertura totalmente permeável até uma cobertura impermeável. A infiltração vai ainda depender do teor de água do solo.

3.1.2. Meteorologia

O SWAT tem incorporado um modelo climatológico, WXGEN Weather Generator Model (Sharpley and Williams, 1990). Este modelo estima valores diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, radiação solar, humidade relativa e velocidade do vento, com base em valores médios mensais. Esta opção é a escolhida porque no tipo de simulações que se pretende realizar as variações inter-anuais de precipitação afectam as cargas estimadas.

3.1.3. Operação de Auto-Fertilização

No modelo SWAT o crescimento das plantas é limitado sempre que as plantas não têm pelo menos 50 % das quantidades de Azoto e Fósforo que são esperados em cada fase de desenvolvimento da planta. Esta situação ocorre sempre que não existem estes nutrientes no solo em quantidades suficientes. Quando o crescimento da planta decresce com a falta de azoto o modelo automaticamente aplica o fertilizante. Esta operação é opcional mas tem a vantagem de reproduzir a situação típica de uma cultura agrícola e é particularmente útil no caso em que são desconhecidas as práticas agrícolas.

O SWAT contém uma base de dados com vários tipos de fertilizantes que podem ser aplicados ao solo, deste modo pode-se escolher o tipo de fertilizante, a quantidade máxima aplicada ao solo durante um ano, assim como a quantidade máxima durante uma aplicação. Foram usados todos os valores por defeito do modelo para esta operação: A quantidade máxima adicionável numa única aplicação foi estabelecida em 200kgN/ano. Enquanto que a quantidade máxima adicionável durante um ano foi fixada em 300kgN/ano.

4. Recolha de Dados

As principais informações requeridas pelo SWAT, são:

- DEM (Modelo Digital de Terreno)
- Uso do solo
- Tipo de solo
- Dados meteorológicos

Os dados altimétricos usados para criação do modelo digital de terreno da bacia drenante da Albufeira de Pracana foram obtidos de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, www2.jpl.nasa.gov). O DEM permite determinar a direcção do escoamento, assim como as características físicas da bacia.

A rede hidrográfica pode ser determinada automaticamente a partir do modelo digital do terreno ou pode ser fornecida através de um mapa. Para a bacia de Pracana foi utilizada uma rede hidrográfica auxiliar obtida da carta hidrográfica do Atlas do Ambiente. Esta rede auxiliar foi depois utilizada pelo modelo em conjunto com o DEM para criar a rede hidrográfica final.

4.1 Tipo de solo

O uso do solo e tipo de solo são dados importantes pois a junção destes dois tipos de informação com os dados meteorológicos vão influenciar significativamente o balanço hídrico.

A textura do solo é uma propriedade básica da física do solo. Com base nela é possível estimar outras propriedades físicas necessárias para o cálculo de escoamentos e qualidade da água no solo. As texturas foram obtidas do mapa desenvolvido pela “The Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture, Coordination of Agricultural Research”, (1985), ver Tabela 1, Figura 2: Tipo de Solo

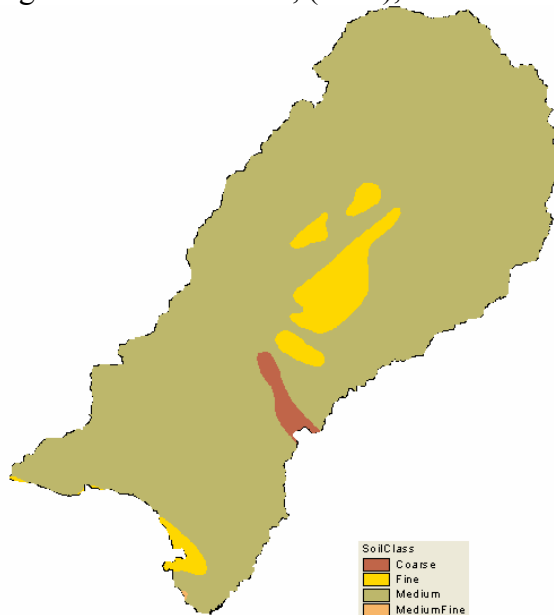
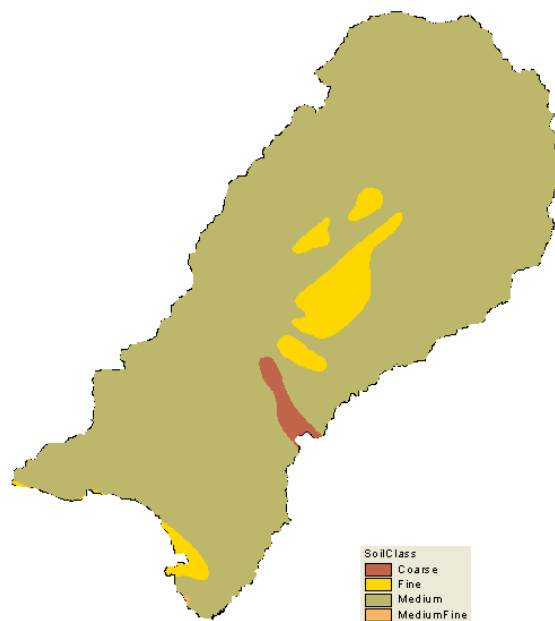


Tabela 1 - Texturas do Solo

Classe textural	Área (Km ²)	Área (%)
Fine	87	6.1
Coarse	17	1.2
Medium	1329	93.7

Figura 2: Tipo de Solo



Utilizou-se ainda uma função de pedotransferência desenvolvida por Saxton et al. (1986). Com base na percentagem de areia e argila, estimaram-se valores de capacidade de campo, coeficiente de emurchecimento, porosidade e condutividade em saturado, Tabela .

Tabela 2 - Características do Solo

Classe textural	Argila [%]	Areia [%]	Grupo hidrológico do SCS	Densidade [kg/dm ³]	Água disponível [mm/mm]	Condutividade hidráulica em saturado [mm/hr]
Fine	47,50	52,50	D	1,30	0,09	1.05
Coarse	9,0	91,0	A	1,73	0,07	37.99
Medium	17,50	82,50	A	1,51	0,20	9.17

4.2. Coberto Vegetal

O coberto vegetal utilizado no modelo para simular a situação actual foi obtido a partir da Carta de Ocupação do Solo (COS' 90) e da carta Corine Land Cover (Corine), disponíveis em <http://www.igeo.pt/>. A primeira tem uma escala de 1:25 000 sendo referente aos anos 90-91. A segunda tem uma escala de 1:100 000, é referente aos anos de 85-87 e foi usada nas zonas da bacia onde a primeira não tem informação. A Tabela I descreve o uso do solo em cinco grandes grupos: água, agrícola, florestal, industrial e urbano, sendo a área agrícola estimada de 458 km².

A qualidade dos dados assim obtidos foi analisada comparando-os com os obtidos a partir do Recenseamento Geral Agrícola (RGA) de 1989 e de 1999. A área agrícola apresentada por estas cartas (458 km²) é concordante com os dados do RGA de 1989 (393 km²).

Tabela I –Áreas ocupadas pelos vários tipos de cobertura do solo na bacia da albufeira de Pracana de acordo com a “Carta de Ocupação do Solo - COS' 90” completada com a “Carta Corine Land Cover”

Tipo de cobertura do solo	Área [km²]	[%]
Água	8	0.6%
Agrícola	458	32.4%
Floresta	929	65.7%
Industrial	6	0.4%
Urbano	13	0.9%
Total	1414	100.0%

As áreas dos diferentes usos do solo obtidas a partir das cartas COS' 90 e Corine, sintetizadas na Tabela I dão 458 km², cerca de 20% acima dos 393 km² obtidos a partir do RGA de 1989 e de 50% acima do obtido a partir do RGA de 1999. Em termos de fracção da área da bacia esta diferença representa cerca de 12% por excesso. Apesar desta diferença, na implementação do modelo SWAT foi considerada a área agrícola de 458 km², por duas razões: (1) não é fácil corrigir aquelas cartas e (2) o erro do modelo será por excesso o que não compromete os resultados deste estudo.

O modelo SWAT tem uma base de dados de culturas limitada, mais adaptada à agricultura Norte-Americana do que à agricultura Europeia, o que obriga a fazer algumas opções quando se aplica o modelo. No caso da bacia de Pracana optou-se pelo o olival, a vinha e o eucalipto. A qualidade das opções pode ser verificada através de uma análise de sensibilidade dos resultados a opções alternativas.

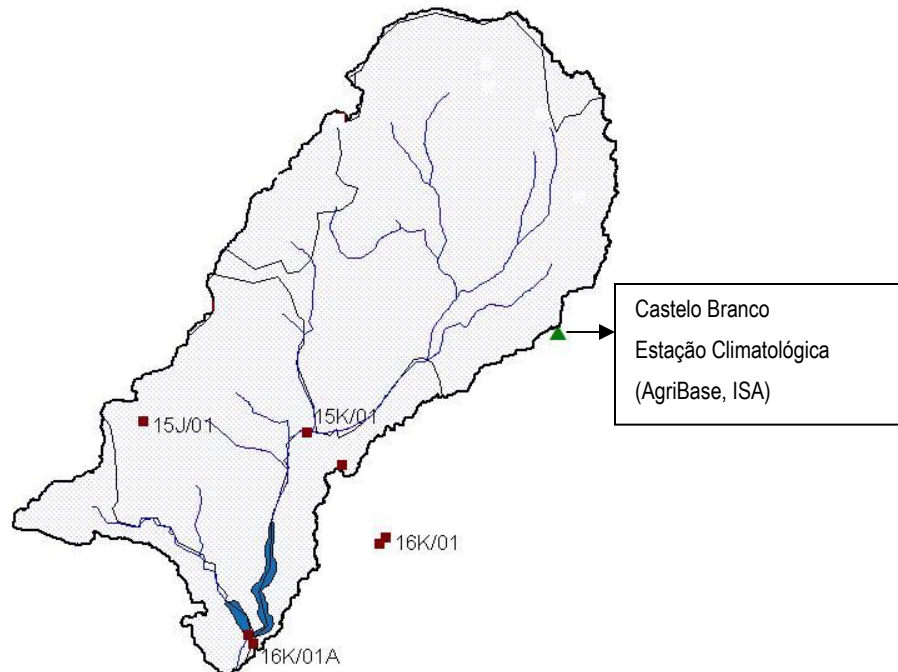
4.3. Meteorologia

O SWAT necessita de valores diários de precipitação, radiação, humidade relativa, velocidade do vento e temperatura máxima e mínima. Estes dados podem ser introduzidos directamente através de um ficheiro ou podem ser simulados pelo modelo. Do ponto de vista hidrológico a variável meteorológica que mais influencia o caudal é a precipitação. Este facto foi determinado após a elaboração de diversas simulações com testes de sensibilidade aos parâmetros meteorológicos.

Por esse motivo foram usados os dados de precipitação diária real, a série de dados foi obtida da estação climatológica Vila Velha de Rodão (16K/01), com localização: latitude = 40°; longitude = 8°, ver Figura 3. Os dados de radiação, temperatura, velocidade do vento e humidade relativa foram utilizados para comparar com as estimativas do modelo. Isto porque o período para o qual existem estes dados é muito limitado, tendo-se optado por utilizar as estimativas do modelo.

Quanto aos outros dados climatológicos, usou-se o modelo para os simular. Este modelo estima valores diários com base em valores médios mensais. Os dados médios mensais necessários foram obtidos da estação climatológica de Castelo Branco com localização: latitude = 39.8°; longitude = 7.5°, ver Figura 3.

Figura 3: Localização das estações de monitorização na bacia de Pracana (ISA, 2004).



Com a informação desta estação, no período de 1958 a 1988, foram calculadas médias mensais de: temperatura máxima, temperatura mínima, vento, radiação solar, a quantidade de precipitação ocorrida num mês e o ponto de orvalho.

4.4. Hidrologia

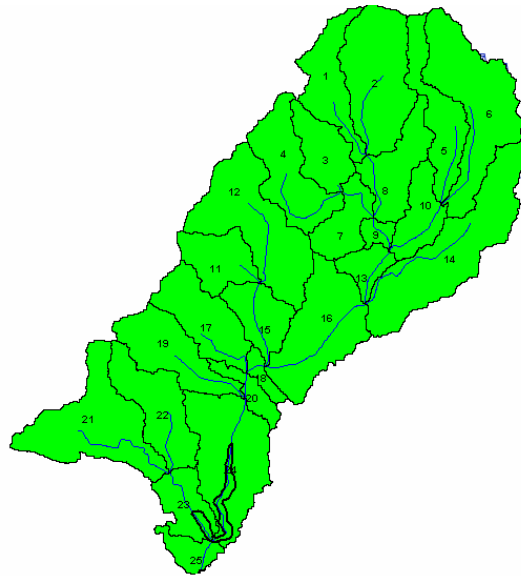
Somente uma estação da rede hidrométrica foi utilizada, pois era que possuía a melhor localização para obter valores de caudal médio diário dentro da bacia drenante da albufeira de Pracana.

5. Delineação da Bacia Hidrográfica

Com as rotinas de delineação da interface BASINS, foi feita a divisão da bacia hidrográfica em 25 sub-bacias. O resultado é o apresentado na Figura . O critério de divisão foi baseado na topografia do terreno e na definição de um limite inferior para a área por sub-bacia, que para a bacia de Pracana foi de 3000 ha. Este valor permite a criação de um número de bacias que é suficiente para reter as principais características da bacia sem aumentar de forma proibitiva as exigências computacionais. Com base nas sub-bacias, no modelo digital de terreno e na rede hidrográfica auxiliar é criada a rede hidrográfica do modelo e é determinada a direcção do escoamento em cada troço do sistema.

Para cada sub-bacia o SWAT usa o conceito de HRU'S, Hydrologic Response Units. Estas definem-se como áreas homogéneas onde é possível definir o tipo de solo, a cobertura vegetal e o uso do solo. Para a bacia de Pracana definiu-se para cada sub-bacia um valor máximo de 10% de HRU. Este valor foi escolhido para que cada sub-bacia não seja dividida num número excessivo de HRU'S.

Figura 4: Delineação da Bacia Pracana (25 sub-bacias).



6. Parametrização dos elementos mais relevantes para a estimativa das cargas

O modelo SWAT calcula a carga de nutrientes que chega à Albufeira somando os efeitos do transporte através das escorrências superficiais, bem como nos escoamentos subterrâneos e finalmente através do transporte nas linhas de água.

As escorrências superficiais transportam nitratos provenientes principalmente da chuva e da fertilização agrícola. Para a fertilização usou-se a auto fertilização (ver secção 3.1.3).

Para o escoamento subterrâneo as concentrações de nitrato e fósforo que serviram de input para o aquífero do SWAT foram obtidos da base de dados de águas subterrâneas do SNIRH.

Efectuou-se uma pesquisa de dados na rede de qualidade de água subterrânea do SNIRH, nas estações localizadas na área adjacente da albufeira de Pracana, de modo a obter valores de concentração de nitrato mais representativos da respectiva bacia. Os valores impostos no modelo são (0.6mgN/l) e (0.08mgP/l) e foram considerados constantes em toda a bacia. Na situação pristina da bacia considerou-se que as concentrações eram aproximadamente zero.

7. Resultados do Modelo

Para comparar os resultados do modelo foi escolhida a estação de Almeirão, Figura 7, da base de dados do Snirh, pois dentro da bacia esta é a única que dispõe de uma série temporal de caudal.

7.1 Calibração e Resultados do Modelo Hidrodinâmico

As simulações foram efectuadas num período de 52 anos de 1953 a 2001. Efectuaram-se comparações directas entre medidas de caudal e os resultados do modelo.

Estas comparações foram feitas com uma base anual, Figura e diária, Figura . Os resultados modelados e medidos foram comparados com o escoamento que ocorreria se 1/3 da precipitação fosse transformado em escoamento. É fácil verificar a boa performance do SWAT no que diz respeito às variações anuais de volume de água escoado. Para efectuar a calibração foram ajustados parâmetros relacionados com a velocidade de escoamento no aquífero.

Figura 5: Comparação com as medidas do INAG (valores anuais).

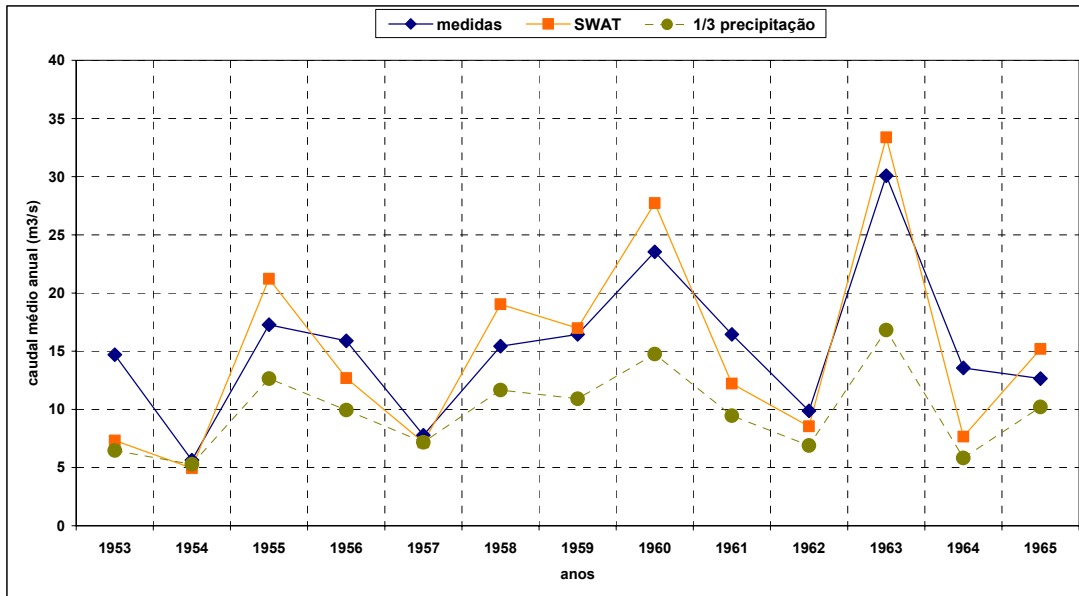
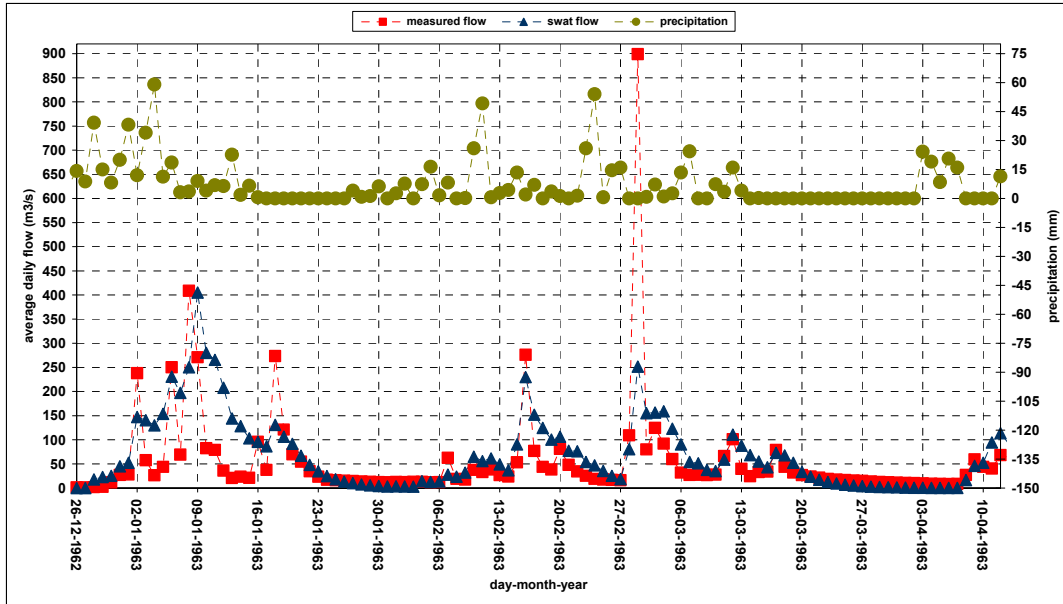


Figura 6: Comparação com as medidas do INAG (valores diários).



Como o passo de tempo no SWAT é de 1 dia é natural que os processos de alta-frequência (com períodos da ordem de poucos dias) não sejam bem resolvidos por este modelo. De qualquer forma da comparação dos resultados com as medidas numa base diária, Figura 7, é possível observar que os resultados do modelo retêm as principais características do escoamento, tanto na previsão do atraso, e consequentemente do dia em que se dá o pico do escoamento, como no valor do caudal máximo e da curva de relaxação e retorno ao caudal de base após o evento de precipitação.

8. Simulação de Cenários

Para quantificar as cargas difusas de nutrientes foram simulados dois cenários com diferentes cobertos vegetais:

1. Cenário em que o uso do solo da bacia é dado pelas cartas de coberto vegetal.
2. Cenário com a bacia coberta de floresta ou seja no seu estado natural.

Figura 7: Estação de monitorização da qualidade da água da bacia drenante da Albufeira de Pracana. Divisão entre área monitorizada e não monitorizada da bacia.



As cargas do modelo são o somatório das várias formas do azoto, (nitrato, nitrito e amónia) e do fósforo (mineral e orgânico).

A bacia foi dividida em duas zonas: i) zona monitorizada, ii) zona não-monitorizada, de acordo com a Figura . Esta divisão deve-se ao facto de só existir informação sobre uma parte da bacia. Os valores estimados para os vários cenários, para a zona monitorizada e não monitorizada bem como para o total da bacia, para as cargas anuais encontram-se na Tabela .

Tabela 4: Cargas anuais de fósforo e azoto para os diversos cenários

	Mon		UnMon		Total	
	[Ton/ano]		[Ton/ano]		[Ton/ano]	
	N	P	N	P	N	P
Cenário 1	210	18	98	8	308	26
Cenário 2	48	1.2	22	0.4	70	1.6

O primeiro cenário considera a existência de fertilizações de N e P em função das necessidades da planta (auto fertilização). Esta fertilização corresponde a uma adição anual média de 111kgN/ha/ano e 17kgP/ha/ano. Esta fertilização é aplicada na área de sequeiro da bacia que corresponde a cerca de 250 km². As simulações dos cenários mostram que a carga de nutrientes pode aumentar ou diminuir consoante o uso do solo. O cenário com floresta é o que apresenta menor carga de nutrientes, tendo sido usado como situação pristina da bacia.

Conclusões

De uma maneira geral pode-se dizer que o padrão das curvas de caudal do modelo é semelhante à dos valores medidos. Isto tanto para os valores anuais como para os valores

diários, Figura e Figura . Ainda nos valores diários é de salientar que as medidas apresentam elevados picos de caudal que o SWAT não consegue acompanhar. Isto deve-se possivelmente à formulação usada no modelo, com passo temporal de 1 dia que não permite a simulação de fenómenos de alta-frequência. Isto não é no entanto uma limitação neste trabalho pois o objectivo é de estimar cargas médias anuais.

A bacia no seu estado actual tem uma carga de origem difusa de 308 tonN/ano e de 26 tonP/ano. Da carga de azoto cerca de 23 % é uma carga de fundo de origem natural enquanto que na carga de fósforo cerca de 6% é de origem natural.

Analisando este estudo e outros estudos já realizados pode-se concluir que para evitar a eutrofização da albufeira de Pracana se deve fazer prioritariamente através do controlo das descargas de origem urbana e das descargas nos cursos de água de efluentes de instalações agropecuárias. A poluição de origem difusa tem uma menor contribuição.

A execução desta tarefa de modelação permitiu ainda concluir que a informação é essencial para a obtenção de bons resultados com este tipo de modelos, por conseguinte a componente de monitorização da bacia deve ser substancialmente reforçada.

Referências Bibliográficas

- [1] ISA – Instituto Superior de Agronomia (2004) AGRIBASE - Base de dados da Secção de Agricultura agricultura.isa.utl.pt/agricultura/agribase
- [2] Neitsch, S.L. Arnold, J.G. Kiniry, J.R. Williams, J.R. *Soil and Water Assessment Tool*, User's Manual, 2000.
- [3] Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, K.W. King 2000, SWAT2000 Theoretical Documentation. Grassland, Soil and water Research Laboratory Agricultural research service.
- [4] OSPAR (2001) Framework and Approach of the Harmonised Quantification and Reporting Procedures for Nutrients (HARP) <http://euroharp.org/rl/guidelines>
- [5] PBH – Tejo (Plano de Bacia Hidrográfica do Tejo) http://www.inag.pt/inag2004/port/a_intervencao/planeamento/pbh/pbh03.html
- [6] Portuguese National Water Authority (INAG), www.inag.pt
- [7] Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. and Papendick, R.I., *Estimating generalized soil-water characteristics from texture*. Soil Sci. Soc. Amer. J. 50(4):1031-1036, 1986.
- [8] Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddataproducts.html>
- [9] Srinivasan, R. and J.G. Arnold, *Integration of a basin-scale water quality model with GIS*, Water Resources Bulletin, 30(3): 453-462, 1995.
- [10] The Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture, Coordination of Agricultural Research, "Soil Map of the European Communities at 1:1 000 000. The Office for Official

Publications of the European Communities, ISBN 92-825-5427-9, L-2985 Luxembourg, 124 pages, 1985.