

4. Dados climáticos, pedológicos, hidrológicos e hidroagrícolas

4.1. Breve introdução

Este capítulo visa a obtenção e o tratamento de informações de ordem climática, pedológica, hidrológica e ambiental que constituem as principais bases de dados a considerar para entender, pelo menos em parte, os problemas de escassez da água, sua gestão, disponibilidades e procura nos casos de estudo. Daí a necessidade de identificar e avaliar a qualidade dos principais dados climáticos, as propriedades hidráulicas dos solos e funções de pedo-transferência, os dados hidrológicos e balanço hídrico – modelo Temez assim como a avaliação da quantidade e qualidade da água empregue na rega.

4.2. Dados climáticos - qualidade e preenchimento das séries de dados climáticos

4.2.1. Nota prévia

Na recolha de informação de carácter hidroclimatológico na Ilha de Santiago, os principais problemas encontrados foram a quantidade e qualidade de dados disponíveis. Concretamente no que respeita a registos de precipitação, dos 55 postos pluviométricos existentes alguns possuíam períodos sem observações ou com reduzido número de dados. Durante o tratamento dos dados anuais e mensais, observaram-se alguns meses sem precipitação durante o ano, bem como alguns anos contínuos de seca. Tendo em conta os constrangimentos citados, adotou-se o procedimento seguidamente descrito no tratamento das séries de dados climáticos da Ilha de Santiago com interesse para o estudo em vista. Primeiramente, procedeu-se a uma apreciação das séries anuais de precipitação recorrendo aos testes referidos no Capítulo 2, a saber, o teste de Mann-Whitney para testar a homogeneidade da média e da variância, o teste de Mann-Kendall para analisar a ausência de tendência e o teste de Kendall para apreciar a ausência de autocorrelação. Numa segunda fase, procedeu-se à homogeneização das séries climatológicas mensais e anuais através do método dos resíduos acumulados, *MRA*. Numa terceira fase, após o teste de homogeneidade, efetuou-se o preenchimento de falhas recorrendo aos métodos de regressão linear e *MOVE4*.

4.2.2. Dados climáticos analisados

Os dados com interesse para o estudo levado a cabo compreenderam as temperaturas máxima e mínima (°C), a humidade relativa média (%), a insolação (h), a velocidade média do vento a 2 m de altura ($m s^{-1}$) e a precipitação (mm), abrangendo um período entre 1960 a 2008. Tais dados foram obtidos em oito estações climatológicas e em vinte e sete postos pluviométricos (udométricos) inseridos nas proximidades das bacias hidrográficas de São Domingos e Ribeira Seca na Ilha de Santiago. Foram selecionadas, sobretudo, as estações de monitorização com mais de vinte anos de observações anuais e com registos recentes. Os dados climáticos inventariados foram disponibilizados pelo INMG. Menciona-se que, na Ilha de Santiago, existem cento e dez postos pluviométricos, dos quais cinquenta e cinco estão operacionais, sendo que os vinte e sete foram pré-selecionados deste último conjunto.

No Quadro 4.1 apresentam-se as estações climatológicas e os postos pluviométricos em análise. Das dez estações climatológicas operacionais existentes na Ilha de Santiago não foram selecionadas as de Serra Malagueta e de Chão Bom por se inserirem longe das bacias hidrográficas casos de estudos. A Figura 4.1 apresenta a distribuição espacial das

estações climatológicas - São Domingos, Trindade, São Francisco, Telhal, São Jorge, Assomada Portãozinho, Santa Cruz e Praia aeroporto - e postos pluviométricos próximos das bacias hidrográficas.

Quadro 4.1: Estações climatológicas e os postos pluviométricos pré-selecionados.

Nº	Nome	Código	Latitude	Longitude	Altitude	Período em análise	Precipitação média anual (mm)
1	Alto Casa Naia	806097	15.03	-23.37	543	1979-2006	437
2	Alto Figueirinha	806106	15.02	-23.34	325	1971-2006	301
3	As. Portãozinho*	806095	15.05	-23.68	550	1961-2008	490
4	Babosa Picos	806096	15.04	-23.37	454	1961-0008	430
5	Capela Garcia	806249	15.01	-23.33	290	1984-2006	360
6	Currálinho	806103	15.01	-23.36	818	1961-2008	496
7	Escola Agropec.	806078	15.02	-23.36	369	1978-2006	396
8	Figueira de Portugal	806109	14.59	-23.34	378	1961-2004	221
9	Funco Bandeira	806071	15.03	-23.35	600	1977-2003	246
10	João Goto	806075	15.03	-23.38	404	1972-2008	328
11	Lém Pereira -S.Cruz	806246	15.02	-23.34	360	1984-2008	292
12	Montanha Banana	806061	15.04	-23.34	215	1972-2008	211
13	Poilão	806063	15.04	-23.33	100	1971-1994	302
14	Ponte Ferro	806074	15.03	-23.35	230	1971-2008	290
15	Ribeirão Chiqueiro	806107	15.00	-23.31	280	1971-2008	232
16	Praia Aeroporto*	806002	14.55	-23.29	64	1961-2008	162
17	Ribeirinha	806070	15.04	-23.34	194	1979-2008	285
18	Rui Vaz	806079	15.02	-23.36	798	1978-2008	415
19	Sala (Renque)	806065	15.04	-23.31	180	1963-2008	222
20	Santa Cruz*	806014	15.08	-23.33	4	1961-2005	265
21	S. Domingos*	806080	15.01	-23.32	235	1962-2008	326
22	S. Francisco*	806009	14.59	-23.29	89	1961-2008	211
23	S. Jorge Órgãos*	808268	15.03	-23.36	310	1960-2008	452
24	Telhal*	806090	15.05	-23.40	335	1963-2006	364
25	Trindade*	806010	14.57	-23.33	204	1962-2006	194
26	Várzea de Santana	806105	15.03	-23.36	320	1978-2006	365
27	Vale de Mesa	806072	15.03	-23.34	242	1978-2006	276

Obs: Os nomes assinalados com asteriscos (*) são estações meteorológicas ou climatológicas.

Anota-se que se procedeu ao cálculo do coeficiente de determinação, R^2 , da relação entre as séries climatológicas (temperaturas máxima e mínima, vento, humidade relativa, e insolação) e entre as séries pluviométricas a fim de determinar o grau de vizinhança entre os postos. Valores do coeficiente de determinação, R^2 , iguais ou superiores a 0.7 e do coeficiente de regressão, b , no intervalo $0.7 \leq b \leq 1.3$ foram considerados como indicadores de condições de vizinhança suficientemente boas para permitir o cálculo de dados incompletos, nos mesmos tipos de variáveis climatológicas, em postos vizinhos (Allen *et al.*, 1998). Os valores de R^2 encontram-se resumidos no Quadro 1.A2 do Anexo II.

4.2.3. Análise da qualidade dos dados de temperatura, vento, insolação e humidade relativa

Para aplicação dos testes de aleatoriedade utilizou-se o *software* desenvolvido por Matias (1998) no CEER/ISA, tendo por base o nível de significância de $\alpha=0.05$ (Rosa *et al.*, 2010a).

A probabilidade αp foi calculada em todos os testes, correspondendo à probabilidade de obter um valor tão extremo quanto o da estatística do teste, z , considerando como verdadeira a hipótese nula. É dada por:

$$\alpha p = 2 \left[1 - P \left(Z \leq |z_U| \right) \right] \quad (4-1)$$

z_U é o valor da variável normal padronizada. Se $\alpha p < \alpha$ a hipótese nula é rejeitada, para um nível de significância α .

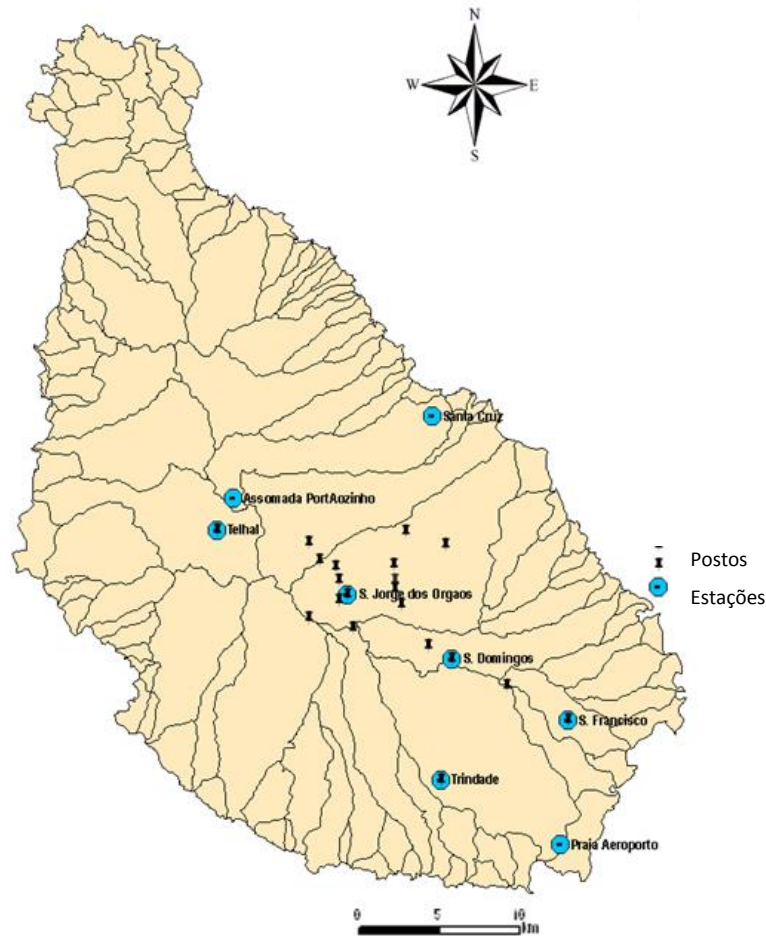


Figura 4.1: Localização das estações climatológicas e os postos pluviométricos.

Para verificação de homogeneidade dos dados anuais e mensais, recorreu-se ao programa automático desenvolvido no âmbito desta investigação em Matlab, *MRA-Geral*. Concluiu-se que as variáveis climatológicas anuais tais como insolação, velocidade do vento e temperatura mínima nas estações climatológicas de São Domingos e São Jorge, (localizadas nas bacias hidrográficas de São Domingos e Ribeira Seca, respetivamente) apresentavam valores de α_p menores que $\alpha=0.05$ nos testes de autocorrelação, de tendência e de homogeneidade da média. Os resultados desta análise são apresentados no Quadro 4.2. As variáveis anuais acima referidas que não passaram nos anteriores testes foram submetidas ao teste de homogeneidade e correção pelo método dos resíduos acumulados, *MRA*. Para o efeito, obtiveram-se as médias regionais para estas variáveis, como indicado nos Quadro 2.A2 e 3.A2. e nas Figuras 1.A2 e 2.A2 do Anexo II. Os resultados confirmam a homogeneidade dessas séries uma vez que os resíduos acumulados estão confinados ao interior das elipses.

Quadro 4.2: Resultados da análise de qualidade das séries climatológicas anuais das estações de São Domingos e São Jorge.

Estação meteorológica	Variável climatológica	N	Teste de autocorrelação		Teste de tendência		Teste de homogeneidade da média		Homogeneidade da variância	
			Z	α_p	Z	α_p	Z	α_p	Z	α_p
São Domingos	Temperatura máxima (°C)	18	0.248	0.804	1.515	0.130	-0.840	0.401	880.000	2.000
	Temperatura mínima (°C)	18	0.458	0.647	1.441	0.149	-1.602	0.109	-0.902	0.367
	Vento (m s ⁻¹)	18	2.590	0.010	-1.289	0.197	-0.089	0.929	1.574	0.116
	Humidade relativa (%)	15	1.230	0.219	-1.488	0.137	1.880	0.060	-1.261	0.207
	Insolação (h)	16	1.686	0.092	2.797	0.005	-2.150	0.032	-0.015	0.988
São Jorge	Temperatura máxima (°C)	24	0.903	0.366	1.687	0.092	-1.654	0.098	-0.161	0.872
	Temperatura mínima (°C)	24	2.412	0.016	1.861	0.063	-2.287	0.022	-1.043	0.297
	Vento (m s ⁻¹)	24	0.714	0.475	0.302	0.762	-0.033	0.974	1.285	0.199
	Humidade relativa (%)	24	0.162	0.871	-1.092	0.275	1.380	0.168	1.518	0.129
	Insolação (h)	21	2.141	0.032	3.867	0.000	-2.917	0.004	1.361	0.173

N – nº de observações

4.2.4. Análise da qualidade de dados de precipitação

A análise da distribuição espacial dos postos pluviométricos resultou na exclusão do posto de Assomada dada a sua fraca influência nas bacias hidrográficas casos de estudo. O estudo prosseguiu, assim, com 26 postos pluviométricos. Os resultados da análise de qualidade das séries de precipitação anual indicaram que apenas no posto Escola Agropecuária, *EAP*, não se confirmava a hipótese de homogeneidade, conforme decorre dos resultados apresentados no Quadro 4.A2 do Anexo II.

A série anual de precipitação do posto Escola Agropecuária não passou no teste de ausência de tendência, o que sugere que os valores de x_i da precipitação anual aí registada tendem a aumentar ou a diminuir monotonicamente ao longo do tempo. Assim, na tentativa de maior rigor na identificação de quebras de homogeneidade e de possíveis correções a efetuar, optou-se por submeter as séries de precipitação, tanto anuais, como mensais no posto *EAP*, ao teste de resíduos acumulados, tendo por base os postos vizinhos de São Jorge e de Ponte Ferro. No Anexo II, apresentam-se no Quadro 5.A2 e na Figura 3.A2 os valores de precipitação anual do posto mencionado, bem como a série regional homogênea. Pela observação da figura, entende-se que as precipitações anuais podem ser consideradas homogêneas, uma vez que os resíduos acumulados, E_i , se inserem no interior da elipse de eixos $\alpha= 9$ e $\beta= 9.8461$. Relativamente às séries mensais no posto *EAP*, a homogeneidade foi comprovada para todos os meses com exceção do mês de abril. Este mês foi então corrigido, como indicam as Figura 4.A2 a) e b) do Anexo II. Abril é um mês seco, normalmente com precipitação nula. Os postos *EAP*, Ponte Ferro e São Jorge, por se localizarem em zonas de altitude beneficiam, por raras vezes, de alguma precipitação contudo muito diminuta. Anota-se que a aplicação conjugada dos testes de qualidade e do *MRA* se revelou um procedimento importante para análise da qualidade de séries climatológicas, anuais e mensais, das regiões semiáridas. Com efeito, verificou-se que a análise estatística (teste de aleatoriedade), não obstante permitir detetar anomalias, pode não ser suficiente para apreciar a qualidade das séries hidrológicas. Na aplicação ao posto

EAP, o teste de homogeneidade pelo *MRA*, aos dados mensais, confirmou anomalias que não seriam possíveis detetar aplicando apenas o teste de aleatoriedade às séries anuais.

Nos gráficos da Figura 5.A2 e Quadro 6.A2 do Anexo II, apresenta-se a evolução temporal dos resíduos acumulados (E_i) mensais, e da sua relação com a elipse de eixos α e β , respetivamente, para o posto *EAP*.

4.2.5. Preenchimento de falhas mensais e diárias

Uma vez comprovada a homogeneidade das séries climatológicas e das séries de precipitação nas estações climatológicas e nos postos pluviométricos para o estudo, recorreu-se às séries homogéneas e às médias regionais homogéneas para proceder ao preenchimento dos dados em falta e à extensão/prolongamento das amostras.

a) Dados de temperatura, vento, insolação e humidade relativa

Como anteriormente mencionado, as séries de temperatura mínima e de insolação na estação de São Jorge foram corrigidas em termos de homogeneidade. Porém, não houve necessidade de preenchimento de falhas nem de extensão das séries deste posto dado que as mesmas estavam completas para o período de 1981 a 2001.

Contrariamente à estação de São Jorge, na de São Domingos as séries climatológicas, com exceção da série de temperatura máxima, apresentavam alguns dados em falta no período de 1984 a 2001. Na Figura 4.2 representam-se os valores mensais de temperatura mínima, insolação, humidade relativa e vento da estação climatológica de São Domingos, posto Y, e das respetivas médias regionais homogéneas, X, bem como as equações que exprimem as regressões lineares simples entre as variáveis em presença. No Quadro 7.A2 do Anexo II apresentam-se os dados mensais das séries climatológicas na estação de São Domingos, devidamente homogeneizados e com as falhas preenchidas (MOVE4) para o período 1984-2001.

a) Dados de precipitação

O preenchimento de falhas nas séries de precipitação mensal foi efetuado com base nos registos em postos vizinhos considerados homogéneos. De entre os vinte e seis postos adotados no estudo foram identificados vinte e três postos que cumpriram as condições de boa vizinhança (coeficientes de determinação e declives, $R^2 \geq 0.7$ e $0.7 \leq b \leq 1.3$, respetivamente). Foram, assim, preenchidas falhas em alguns meses do período de 1978 a 2008, bem como falhas diárias do posto de São Domingos (1984-2001).

Para o preenchimento de falhas utilizaram-se apenas as séries de precipitação homogéneas e completas, a saber, as séries nos postos de São Jorge dos Órgãos, Curralinho, Babosa Picos, Praia Aeroporto e São Francisco. Visto as séries de precipitação nos postos de Ponte Ferro e São Domingos apresentarem muito poucas falhas, foram utilizadas no cálculo da média regional homogénea nos períodos em que não apresentavam falhas (Quadro 4.3).

Resultou, assim, a informação sistematizada no Quadro 4.3 relativa: i) ao posto Y com falhas de dados e ao número e à correspondente percentagem dessas falhas; ii) aos postos vizinhos utilizados no cálculo da média regional homogénea, representada pela variável X; iii) aos parâmetros a e b e ao coeficiente de determinação da reta de regressão linear simples, $Y=a+bX$; e iv) ao método de preenchimento utilizado.

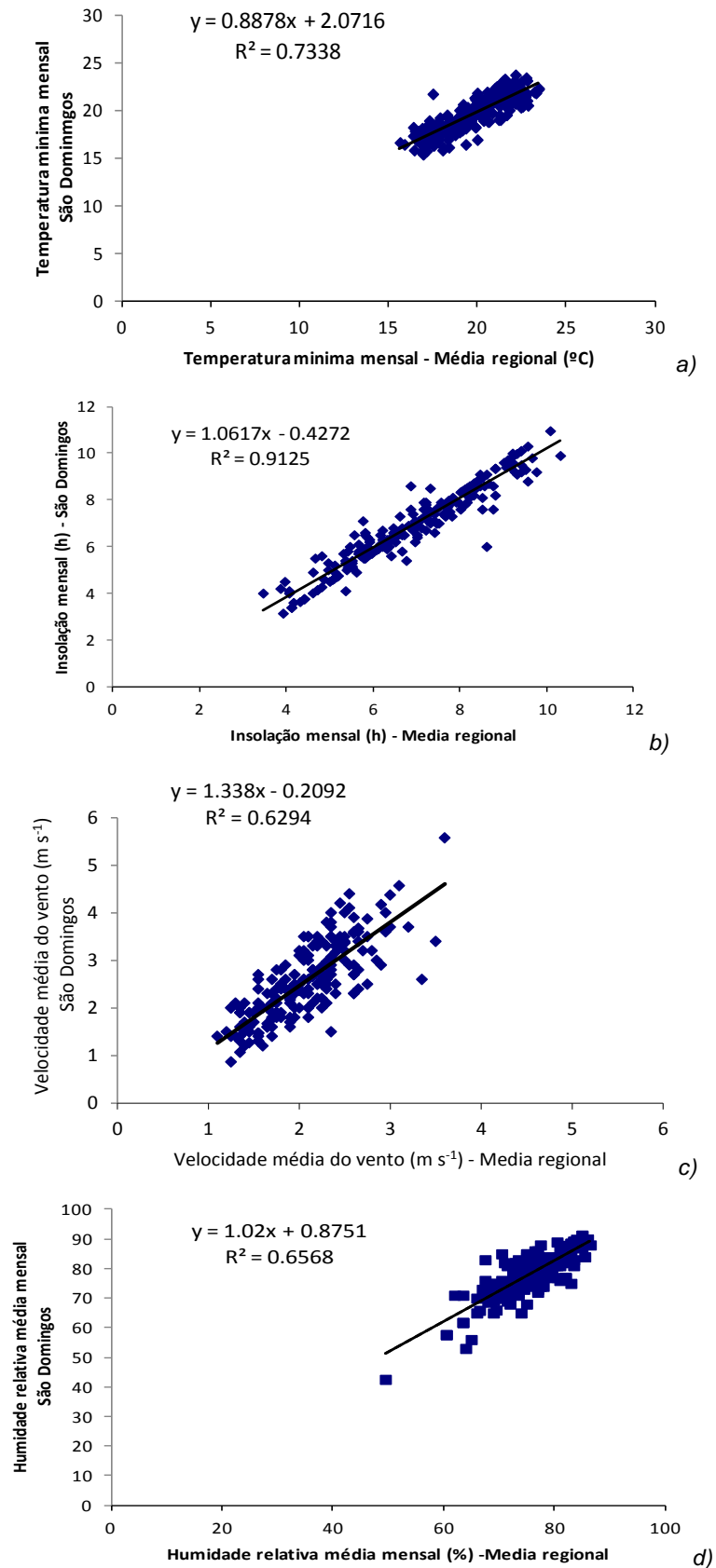


Figura 4.2: Regressão linear simples, entre as variáveis climatológicas com dados em falta, Y, e as respectivas séries homogêneas, X - Estação de São Domingos. a) temperatura mínima; b) insolação; c) velocidade do vento; d) humidade relativa.

Quadro 4.3: Postos com falhas de registos de precipitação, número e percentagem dessas falhas, postos vizinhos utilizados no cálculo da média regional, parâmetros a e b da reta de regressão e respetivo coeficiente de determinação, R^2 , e método de preenchimento utilizado.

Postos com falhas	Falhas		Postos vizinhos	Parâmetros da reta de regressão, $Y=a+bX$			Método de preenchimento das falhas
	Valor	%		b	a	R^2	
1- João Goto	62	17	Ponte Ferro São Jorge	1.0828	-1.9202	0.7801	Move4
2- Ribeirinha	26	7	São Jorge Babosa Picos Currálinho	0.6827	-0.1227	0.8533	Move4
3- Ribeirão Chiqueiro	28	8	Praia Aeroporto Currálinho São Jorge	0.6616	1.1665	0.7825	Move4
4- Ponte Ferro	3	1	Babosa Picos Currálinho São Jorge	0.6575	0.6368	0.8162	Regressão linear
5- Poilão	168	45	São Jorge São Domingos Ponte Ferro	0.8906	-1.6646	0.8192	Move4
6- São Domingos	12	3	Currálinho Babosa Picos São Jorge	0.6641	-0.1055	0.8118	Regressão linear
7- Capela Garcia	111	30	São Domingo São Jorge	1.1295	-1.0893	0.8339	Move4
8- Rui Vaz	61	20	Currálinho São Francisco São Jorge	1.3070	-1.9900	0.9164	Move4
9- Telhal	74	25	Babosa Picos Currálinho São Jorge	0.8931	-1.568	0.908	Move4
10- Trindade	50	16	Praia Aeroporto São Francisco São Jorge	0.7578	-0.6477	0.7793	Move4
11- Alto Figueirinha	39	12	São Jorge Babosa Picos Currálinho	0.7564	-1.7889	0.8946	Move4
12- Escola agropecuária	38	11	Babosa Picos Currálinho São Jorge	1.0220	-1.6717	0.9229	Move4
13- Funco Bandeira	77	26	São Jorge Babosa Picos Currálinho	0.7034	-1.4299	0.8413	Move4
14- Vale De Mesa	80	24	São Jorge Babosa Picos Currálinho Babosa Picos	0.7487	-1.2637	0.8977	Move4
15- Várzea Santana	38	10	Currálinho São Jorge	0.9288	-1.5061	0.9247	Move4
16- Alto Casa Naia	53	14%	Babosa Picos Currálinho São Jorge	1.0483	1.5721	0.7067	Move4
17- Santa Cruz	134	36%	Babosa Picos Ponte Ferro São Jorge	0.6320	0.1945	0.7456	Move4
18-Sala (Santa Cruz)	56	15%	Babosa Picos Ponte Ferro São Jorge	0.7582	-1.6939	0.6676	Move4

Verifica-se que, no geral, existe uma elevada correlação entre os registos de precipitação nos postos com falhas, Y , e a correspondente média regional homogénea, X . Com efeito, obtiveram-se valores de R^2 entre 0.67 e 0.92, significando que entre 67% e 92% da variância das séries com falhas é explicada pela média regional da precipitação e vice-versa.

O Quadro 8.A2 do Anexo II contém as séries mensais homogeneizadas e preenchidas para o período de 1978-2008. Tais séries foram adotadas para avaliar a precipitação média ponderada nas duas bacias casos de estudo. Nas Figuras 6.A2 a 23.A2 do Anexo II representam-se as relações obtidas por análise de regressão linear simples entre a precipitação mensal nos 18 postos com falha (séries Y) e a precipitação mensal da série homogênea regional (séries X).

4.2.6. Precipitação nas bacias hidrográficas dos casos de estudo

A precipitação nas bacias hidrográficas que constituem os casos de estudo foi determinada pelo método dos polígonos de Thiessen que pode ser expresso por:

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^{Ne} A_i P_i}{Ne} = \sum_{i=1}^{Ne} p_i P_i \quad (4-2)$$

$$\text{com } p_i = \frac{A_i}{A} \quad (4-3)$$

onde,

- P_A precipitação ponderada ou simplesmente precipitação na bacia hidrográfica (mm);
- P_i precipitação (ou função desta) medida no posto i;
- p_i peso atribuído ao posto i, sendo que $p_i > 0$ e $\sum p_i = 1$;
- A_i área de influência (polígono de Thiessen) do posto i (km²);
- A área total da bacia hidrográfica (km²).

Segundo Tucci (2000) o método de Thiessen, contrariamente a outros métodos de ponderação espacial, é passível de aplicação mesmo em situações onde os postos pluviométricos não estão distribuídos de modo uniforme. Apresenta a desvantagem de não atender a fatores de ordem física com influência por vezes significativa na variação espacial da precipitação, como sejam a altitude ou a exposição das encostas. No Quadro 9.A2 do Anexo II, apresentam-se os postos pluviométricos com influência nas bacias hidrográficas em estudo, bem como as respetivas áreas de influência e pesos, sendo que a esquematização da aplicação do método consta das Figuras 4.3 e 4.4.

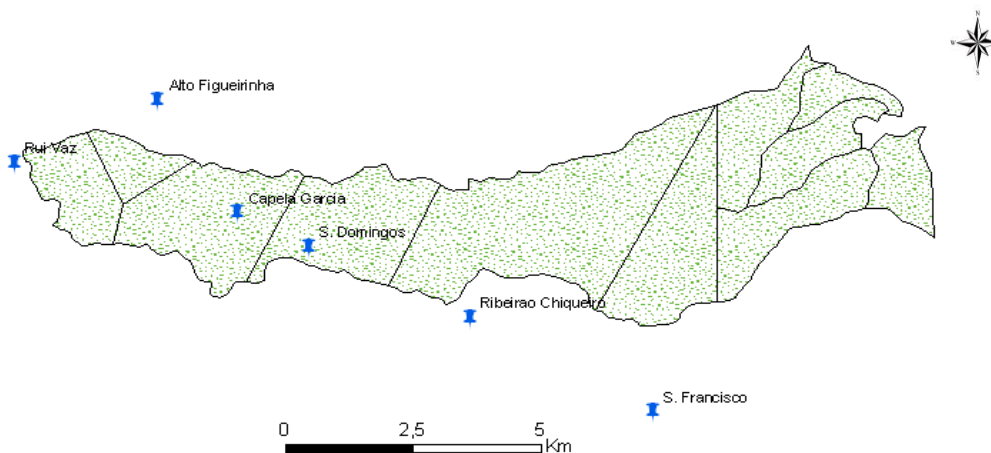


Figura 4.3: Aplicação do método de Thiessen à bacia hidrográfica de São Domingos: postos udométricos e respetivas áreas de influência - Caso de estudo 1.

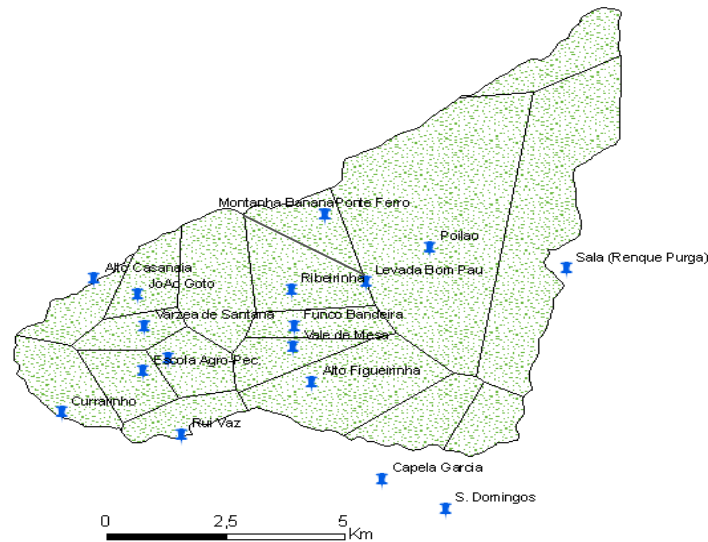


Figura 4.4: Aplicação do método de Thiessen à bacia hidrográfica da Ribeira Seca: postos udométricos e respectivas áreas de influência - Caso de estudo 2.

A Figura 4.5 mostra que os valores de precipitação anual na bacia da Ribeira Seca são ligeiramente superiores aos correspondentes valores em São Domingos, em consequência da topografia da primeira bacia, mais favorável à ocorrência de precipitação.

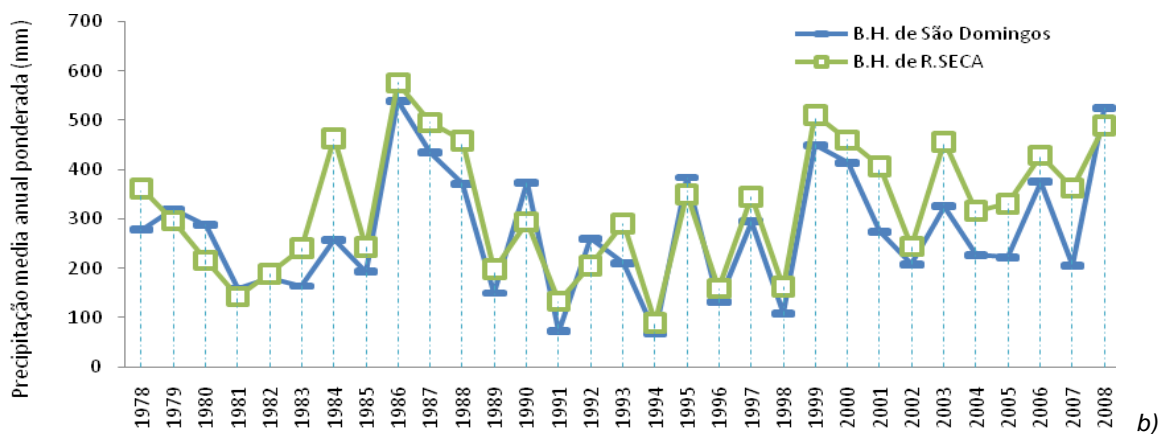


Figura 4.5: Precipitação anual nas bacias hidrográficas de São Domingos e da Ribeira Seca.

Os resultados da aplicação do método de Thiessen à escala mensal para o período compreendido entre 1978 e 2008 estão representados na Figura 4.6.

Observa-se que a precipitação mensal é ligeiramente superior na bacia hidrográfica da Ribeira Seca comparativamente à bacia de São Domingos, sendo que em ambos os casos existe uma acentuada variabilidade intra-anual (sazonal) e interanual. Em anos secos, a escassez de água é mais evidente em São Domingos do que em Ribeira Seca, apesar de tais anos secos afetarem a disponibilidade de água em toda a Ilha.

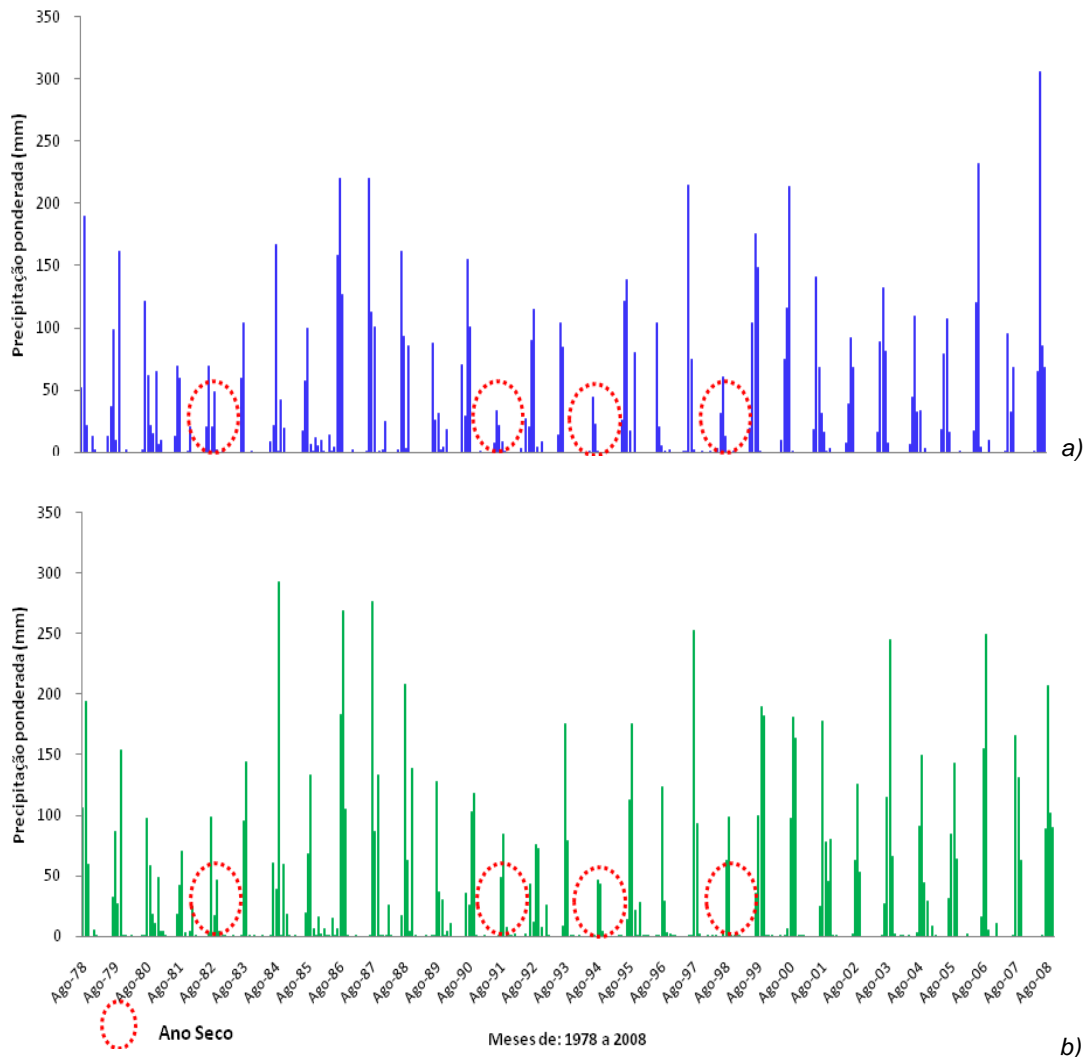


Figura 4.6: Variabilidade temporal da precipitação nas bacias hidrográficas casos de estudo: a) bacia de São Domingos; b) bacia de Ribeira Seca.

Nos Quadros 10.A2 e 11.A2 do Anexo II apresentam-se os valores de precipitação mensal ponderada nas bacias de São Domingos e Ribeira Seca respetivamente. Tais quadros mostram que a precipitação é mais significativa durante a época húmida, de julho a outubro. De novembro a fevereiro podem ocorrer precipitações pontuais com alguma magnitude (em São Domingos, 80.2 mm em dezembro de 1995 e, em Ribeira Seca, 138.3 em novembro de 1988).

4.2.7. Evapotranspiração de referência

Para determinar a evapotranspiração de referência, ET_o , nas bacias hidrográficas adotadas como casos de estudo recorreu-se às estações climatológicas de São Domingos e de São Jorge (Quadro 4.4), com base nas quais se aplicou o modelo WINISAREG, que calcula ET_o pelo método de Penman-Monteith (PM). O Quadro 4.4. contém as coordenadas geográficas das estações mencionadas.

Quadro 4.4: Localização geográfica das estações São Domingos e São Jorge.

Estação	Bacia hidrográfica	Longitude	Latitude	Altitude
São Domingos	São Domingos	23° 32' 57.0"	15° 01' 08.9"	235m
São Jorge	Ribeira Seca	23° 36' 17.7"	15° 03' 09.1"	310m

O cálculo requereu registos diários das seguintes variáveis: temperatura máxima (°C) e mínima (°C) humidade relativa média (%), vento ($m s^{-1}$), e insolação (h). Os períodos de observação utilizados foram de 18 anos (1984 a 2001), na estação de São Domingos, e 21 anos (1981 a 2001) na de São Jorge. Em face da ausência de observações da radiação, procedeu-se à estimativa desse parâmetro a partir das diferenças entre temperaturas máximas e mínimas, conforme descrito por Popova *et al.* (2006a).

Os resultados obtidos mostraram que os valores mais elevados de ET_o ocorrem durante o mês mais seco do ano, o de maio (118 a 160 e 93 a 122 mm mensais, em São Domingos e em São Jorge, respetivamente). Valores mais baixos têm lugar nos meses de novembro e dezembro, oscilando entre 80 – 106 mm mensais, em São Domingos, e entre 83-112 mm mensais, em São Jorge.

A ET_o em São Domingos é superior a ET_o em São Jorge durante todo o ano, como mostra a Figura 4.7. Os correspondentes valores médios, mensais e anuais de evapotranspiração de referência são apresentados nos Quadros 12.A2 e 13.A2 do Anexo II, relativos a São Domingos e São Jorge, respetivamente.

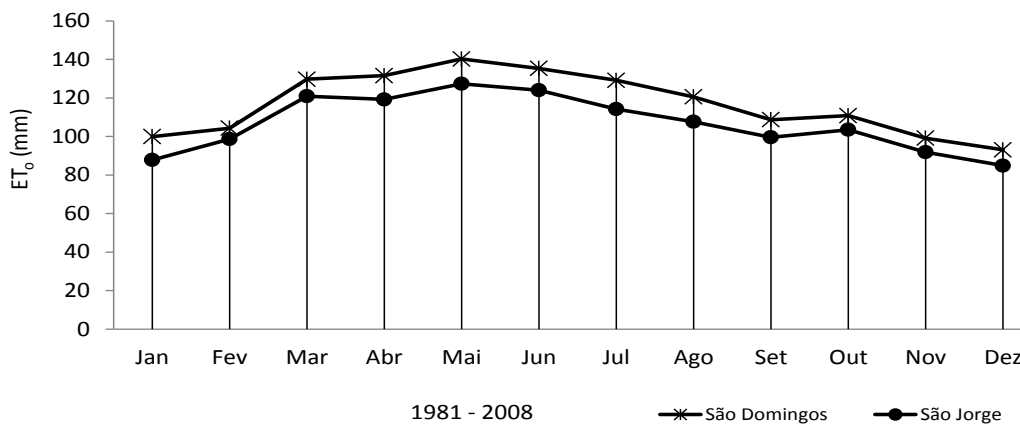


Figura 4.7: Evapotranspiração de referência, ET_o , em São Domingos (bacia hidrográfica de São Domingos) e em São Jorge (bacia hidrográfica da Ribeira Seca).

Durante a estação seca (outubro a julho), o “balanço” entre a precipitação e a ET_o é negativo ($P < ET_o$), fato que torna a rega indispensável nessa época, de modo a obter-se boa produção agrícola (Figuras 4.8 a) e b)).

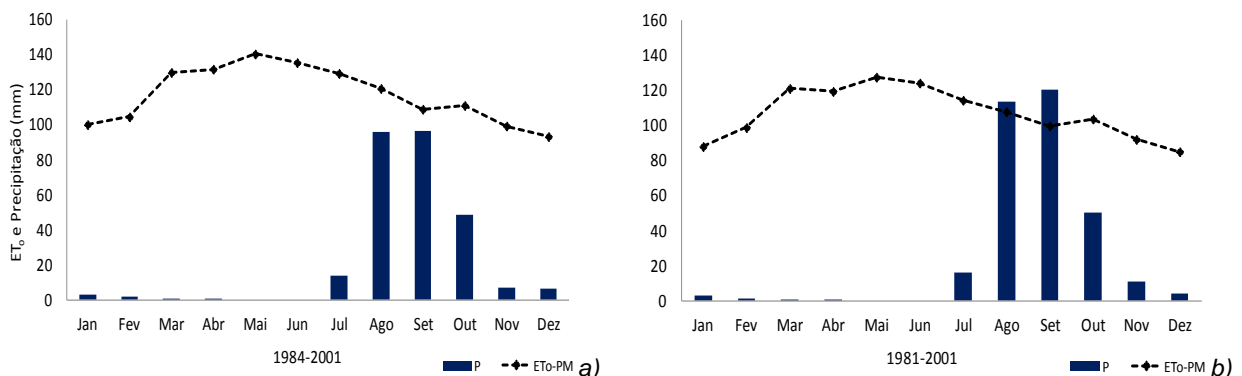


Figura 4.8: Valores mensais da ET_o e da precipitação. a) São Domingos; b) São Jorge (Ribeira Seca).

De uma forma global, os valores anuais de ET_o em São Domingos e em São Jorge são da mesma ordem de grandeza. As evapotranspirações mensais de referência nos meses de fevereiro a setembro que compreendem as épocas secas e pluviosas diferem dos das

épocas frescas (novembro a janeiro). Verifica-se que nos meses frescos a ET_o é baixa, sendo superior nos restantes meses e nos meses chuvosos (julho a agosto).

4.3. Propriedades hidráulicas dos solos e funções de pedo-transferência

4.3.1. Localização e identificação dos perfis e horizontes dos solos

Os perfis de solo foram identificados na rede hidrográfica de São Domingos e Ribeira Seca, de modo a representarem as principais famílias de solos encontradas nas cinco zonas agroecológicas (AEZ) da Ilha de Santiago. Na Figura 4.9 apresenta-se a localização da rede hidrográfica de São Domingos e Ribeira Seca e a localização dos trinta e um (31) perfis estudados no âmbito deste trabalho. Estes trinta e um perfis eram compostos por setenta e dois (72) horizontes/camadas.

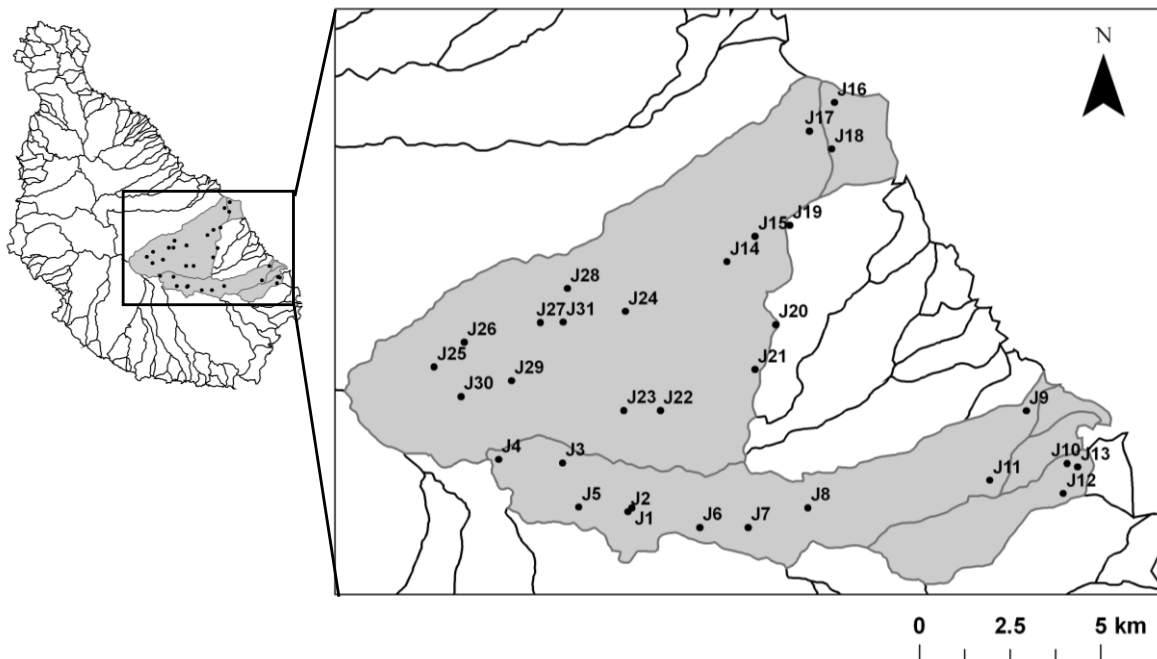


Figura 4.9: Localização dos perfis estudados e da colheita de amostras nas bacias hidrográficas de São Domingos e de Ribeira Seca - Ilha de Santiago.

Os 31 perfis selecionados foram considerados como representativos de áreas de intensa atividade agrícola, sequeiro e regadio, onde predominam os seguintes tipos de solos: cambissolos líticos (Bt); cambissolos êutricos (Be); litossolos (L); colúvissolos de vertentes (Cv); cambissolos vérticos (Bv); fluvisolos êutricos (Je). Esses solos estão associados essencialmente ao Complexo Eruptivo Antigo (CA). As famílias dos solos estudados e as respetivas localizações geográficas constam do Quadro 14.A2 em Anexo II.

4.3.2. Análise textural das amostras

A granulometria das amostras constitui uma das propriedades mais importantes no estudo de solos. As texturas das 72 amostras de solos analisadas são apresentadas no triângulo textural (Figura 4.10), verificando-se uma maior representação das classes com textura mediana e grosseira.

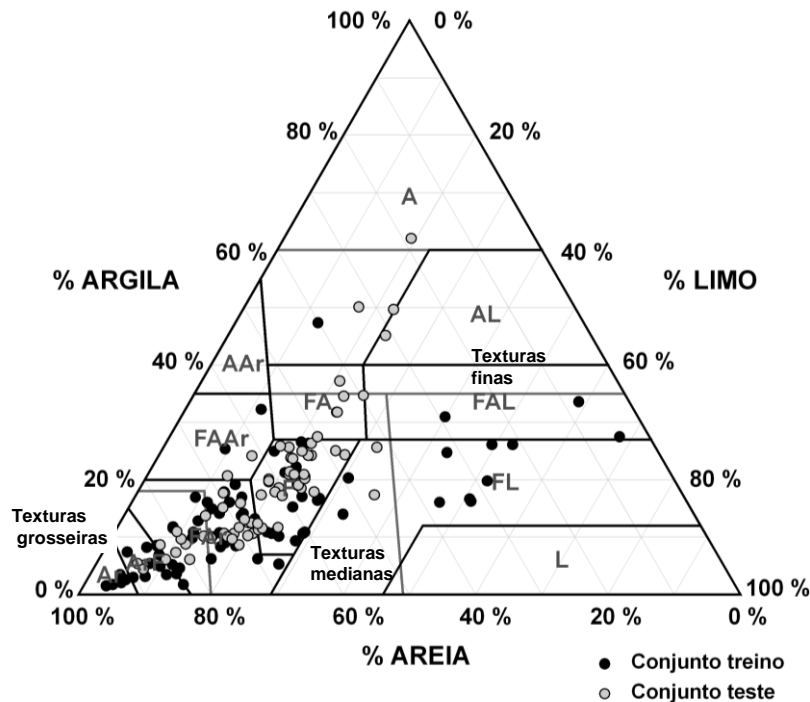


Figure 4.10 - Distribuição textural das 85 amostras utilizadas para desenvolver funções de pedo-transferência (PTFs), para estimar valores de pontos específicos das curvas características de retenção de água nos solos da Ilha de Santiago (conjunto de teste) e as 72 amostras utilizadas para validar as PTFs (conjunto treino).

Os solos com textura fina têm maior ocorrência nas achadas, campos de pastagem e áreas florestais, daí a sua menor representatividade nas áreas de intensa atividade agrícola como as estudadas. Os resultados da análise físico-química dos solos estudados resumem-se no Quadro 15.A2 do Anexo II. As profundidades dos perfis desses solos variam entre 7.5 (J9) e 315 (J5) cm. Nesses perfis foram identificadas oito (8) classes de textura com teores de matéria orgânica variando entre 3.3 e 95.4 (g kg⁻¹) no horizonte A.

4.3.3. Curvas de retenção de água

A porosidade total (ϕ) e os teores de água retidos no solo a -0.25, -1, -3, -10, -33, -100, e -1500 kPa foram determinados laboratorialmente. As caixas de areia foram usadas nas determinações dos teores de água entre -0.25 e -10 kPa. As painéis de pressão foram usadas nas determinações dos teores de água entre -33 e -1500 kPa.

Os dados laboratoriais foram, em seguida, ajustados ao modelo de van Genuchten (1980) com o programa RETC (van Genuchten *et al.*, 1991) Figuras 4.11 a) a h). Nestas figuras apresentam-se os valores obtidos para porosidade total (ϕ), e teor de água no solo retido às sucções de -0.25 ($\theta_{0.4}$), -1 ($\theta_{1.0}$), -3 ($\theta_{1.5}$), -10 ($\theta_{2.0}$), -33 ($\theta_{2.5}$), -100 ($\theta_{3.0}$) e -1500 ($\theta_{4.2}$) kPa.

Os valores médios e desvio-padrão dos teores de água no solo retidos às sucções referidas e os respetivos parâmetros do modelo de van Genuchten são apresentados no Quadro 4.5. Os dados foram agrupados por classes texturais: areno-franca (3), franco-argilosa (5), franco-arenosa (25), franca (31), franco-argilo-arenosa (2), argilosa (3), argilo-limosa (1) e franco-limosa (2). Dos 72 horizontes estudados foram identificados principalmente solos de textura Franca (n=31) e franco-arenosa (n=25) (Figure 4.11).

Quadro 4.5: Valores médios e desvio-padrão (valores entre parênteses) para a curva de retenção de água no solo a -0.25 ($\theta_{0.4}$), -1 ($\theta_{1.0}$), -3 ($\theta_{1.5}$), -10 ($\theta_{2.0}$), -33 ($\theta_{2.5}$), -100 ($\theta_{3.0}$) e -1500 ($\theta_{4.2}$) kPa, e dos parâmetros do modelo de van Genuchten para solos da Ilha de Santiago - Cabo Verde.

Textura	N	Teor de água volumétrico						Parâmetros de van Genuchten				
		$\theta_{-0.25 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1 \text{ kPa}}$	$\theta_{-3.2 \text{ kPa}}$	$\theta_{-10 \text{ kPa}}$	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-100 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	θ_r	θ_s	α	η
		(cm ³ cm ⁻³)						(cm ³ cm ⁻³)		(cm ⁻¹)	(-)	
ArF	3	0.518 (0.060)	0.450 (0.122)	0.414 (0.145)	0.307 (0.074)	0.250 (0.048)	0.224 (0.046)	0.175 (0.034)	0.174 (0.046)	0.531 (0.050)	0.138 (0.194)	1.614 (0.172)
FAr	25	0.516 (0.068)	0.479 (0.075)	0.429 (0.075)	0.358 (0.065)	0.296 (0.054)	0.261 (0.050)	0.191 (0.046)	0.128 (0.075)	0.529 (0.070)	0.115 (0.128)	1.354 (0.188)
FAAr	2	0.569 (0.058)	0.553 (0.053)	0.513 (0.074)	0.446 (0.111)	0.399 (0.128)	0.370 (0.114)	0.309 (0.098)	0.164 (0.102)	0.576 (0.060)	0.066 (0.038)	1.315 (0.327)
A	3	0.545 (0.031)	0.518 (0.031)	0.478 (0.019)	0.452 (0.030)	0.405 (0.049)	0.360 (0.057)	0.251 (0.018)	0.017 (0.019)	0.550 (0.046)	0.087 (0.078)	1.140 (0.028)
FA	5	0.540 (0.063)	0.521 (0.065)	0.466 (0.063)	0.418 (0.064)	0.361 (0.054)	0.320 (0.048)	0.239 (0.045)	0.110 (0.056)	0.554 (0.064)	0.100 (0.053)	1.179 (0.050)
F	31	0.536 (0.044)	0.508 (0.048)	0.447 (0.052)	0.381 (0.053)	0.329 (0.045)	0.295 (0.042)	0.217 (0.043)	0.128 (0.071)	0.553 (0.047)	0.127 (0.123)	1.276 (0.159)
FL	2	0.544 (0.006)	0.515 (0.012)	0.459 (0.024)	0.417 (0.029)	0.372 (0.011)	0.330 (0.014)	0.252 (0.011)	0.131 (0.081)	0.561 (0.015)	0.136 (0.087)	1.170 (0.033)
AL	1	0.557 (-)	0.544 (-)	0.485 (-)	0.391 (-)	0.342 (-)	0.301 (-)	0.198 (-)	0.078 (-)	0.576 (-)	0.078 (-)	1.200 (-)

N - número de observações; Os números entre parênteses correspondem ao desvio-padrão; θ_r - teores de água residual e θ_s - teores de água na saturação; α (L⁻¹) e η (-) são fatores empíricos da fórmula.

Os valores de retenção de água no solo apresentaram grande variabilidade em cada valor de sucção com desvio-padrão variando ente 0.006 e 0.145 cm³ cm⁻³. Esta variabilidade teve maior expressão nos solos de texturas franco-arenosa e areno-franca. Os valores de retenção de água no solo nas sucções mais baixas (-1500 kPa) revelaram-se normalmente mais altos quando comparados com os solos de Portugal.

Na Ilha de Santiago, os teores médios de água no solo nas sucções de -1500 kPa foram 0.1750, 0.1910, 0.2170 cm³ cm⁻³ nos solos de texturas franco-arenosa, areno-franca e franca, respetivamente. Em Portugal, os valores médios correspondentes de retenção de água são 0.0576, 0.1179 e 0.1418 cm³ cm⁻³ (Ramos *et al.*, 2011).

Os teores de água nos solos nas sucções mais elevadas (-0.25 kPa) foram também superiores aos valores característicos de retenção de água para diferentes tipos de solo relatados por Allen *et al.* (1998). Portanto, os comportamentos desviantes dos solos de Santiago em relação aos observados nos solos de regiões temperadas, principalmente para as sucções mais baixas apontam para a existência de um comportamento hidrológico diferente desses solos, sendo atribuído sobretudo a fatores mineralógicos e pedogenéticos.

Os parâmetros hidráulicos dos solos da Ilha de Santiago mostram as mesmas tendências descritas em Schaap *et al.* (1998) e Ramos *et al.* (2010) para o teor de água na saturação (θ_s) e para o parâmetro de ajustamento η . Os valores médios de θ_s aumentam das texturas grosseiras para as medianas, enquanto η diminui na mesma direção. Em relação ao parâmetro α , nos trabalhos de Schaap *et al.* (1998) e Ramos *et al.* (2011) não se observa qualquer tendência de variação daquele parâmetro. No entanto, Carsel & Parish (1988) descreveram uma tendência decrescente de α a partir de classes de textura grosseiras para as texturas pesadas tal como a observada aqui nos solos de Cabo Verde.

Nos solos de Cabo Verde, os valores médios de α parecem diminuir das texturas grosseiras para as medianas, apesar do valor de α nos solos de textura argilosa ser superior ao dos solos de textura franco-arenosa.

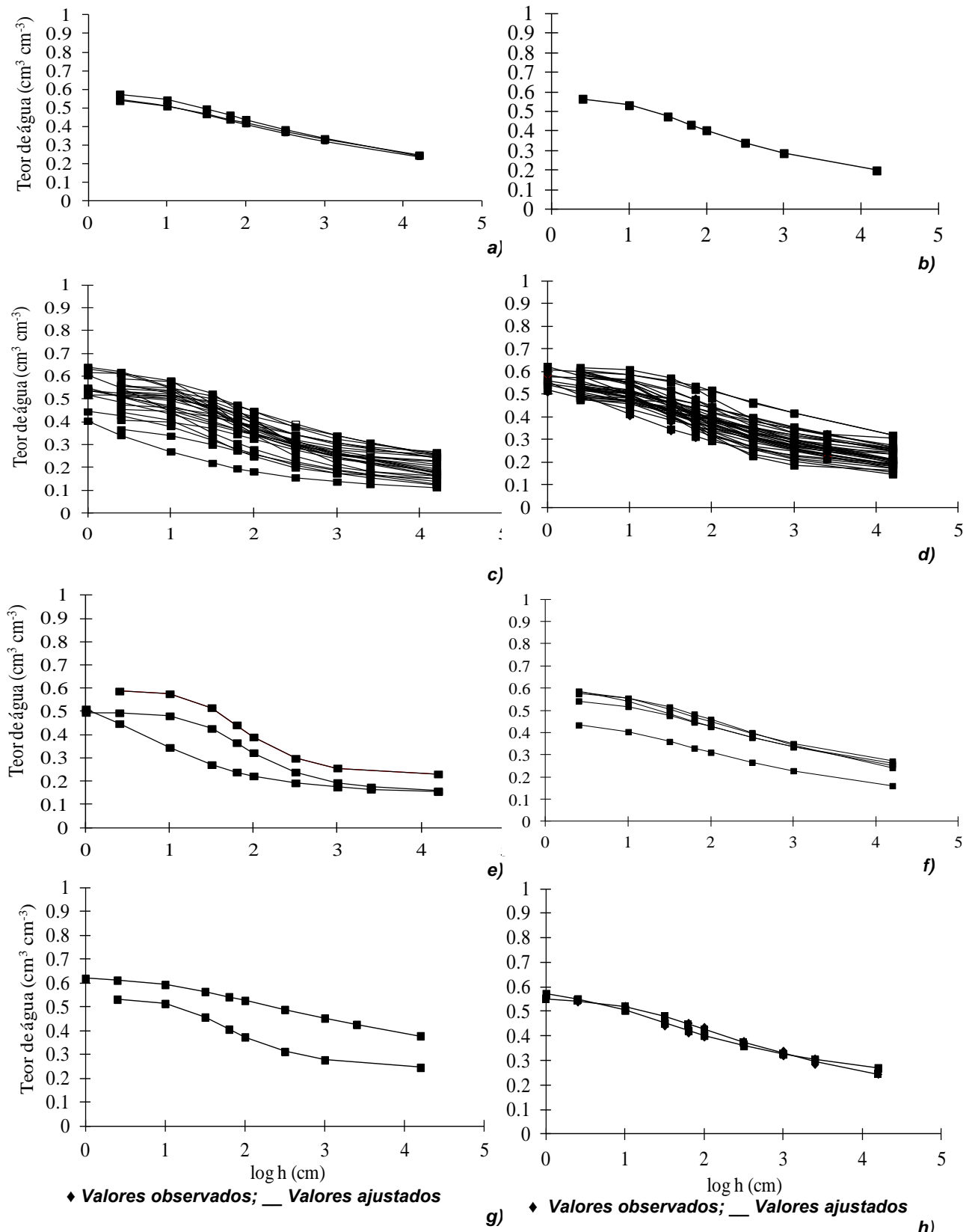


Figura 4.11: Curvas de retenção de água no solo para oito classes de textura (Ajustados ao modelo de van Genuchten) - Texturas: a) argilosa; b) argilo-limosa; c) franco-arenosa; d) franca; e) areno-franca; f) franco-argilosa; g) franco-argilo-arenosa; h) franco-limosa.

Quanto ao teor de água residual (θ_r), tendo em conta que para sucções mais baixas os solos da Ilha de Santiago apresentaram valores de teores de água relativamente superiores aos

observados nos solos de regiões temperadas, o θ_r também mostrou valores médios mais elevados do que os relatados na bibliografia (Carsel & Parish, 1988; Schaap *et al.*, 1998; Ramos *et al.*, 2011).

Os últimos estudos relativos aos solos de Cabo Verde indicam que a geologia da Ilha de Santiago é principalmente caracterizada pelas rochas basálticas alcalinas e os respetivos produtos piroclásticos. Ocorrem também sedimentos quaternários e rochas calcárias. (Faria, 1970; Pinto, 2010; Marques *et al.*, 2012). Magnetites/magmmites, hematites, piroxenas e filossilicatos são os minerais mais comumente encontrados nesses solos.

Os solos em estudo estão associados ao Complexo Eruptivo Antigo (CA) que segundo Marques *et al.*(2012) são constituídos essencialmente por plagioclase e feldspato potássico, sendo bastante enriquecidos em feldspatos, quando comparados com os solos desenvolvidos nas restantes formações vulcânicas. Esses dados foram confirmados de acordo com o observado na geoquímica em que as rochas do CA são as mais ricas em alcalis (Na_2O e K_2O). No Complexo Eruptivo Interno Antigo (CA) os solos contêm maior proporção relativa de feldspatos, olivina, calcite e “outros minerais” (zeólitos, esfena, zircão, larnite, siderite, magnetite, cromite, dolomite sendo ainda raras leucite, apatite, opala) e menor proporção relativa de quartzo e piroxena relativamente aos sedimentos de corrente desta formação.

Marques *et al.* (2012) compararam as proporções relativas dos minerais dos solos e sedimentos de corrente que ocorrem nas várias formações e verificaram que os solos de todas elas são sempre mais pobres em piroxena e feldspato e mais ricos em quartzo do que os sedimentos de corrente com exceção dos solos ocorrentes no CA, que são mais ricos em feldspato do que os sedimentos de corrente que ocorrem nesta formação. Concluíram que esta diferença de CA em relação a todas as outras formações pode dever-se ao fato de nesta formação ocorrerem rochas granulares sieníticas e gabróicas, enquanto as rochas das outras formações são afaníticas e nas quais a alteração relativa dos feldspatos é maior. No entanto, esses minerais são comuns e não justificam o comportamento hidráulico observado nos solos de Cabo Verde. Então, uma outra explicação possível poderá ser o arranjo espacial dos constituintes sólidos desses solos e as reações químicas entre alcalis e outros minerais observados nas rochas do CA.

4.3.4. Funções de pedo-transferência para solos da Ilha de Santiago

As funções de pedo-transferência (*PTFs*) foram desenvolvidas para estimar, indiretamente, diferentes pontos da curva de retenção de água nos solos da Ilha de Santiago. Uma função de pedo-transferência tem como argumentos as propriedades básicas do solo (e.g., a percentagem de areia, de limo e de argila, o teor de carbono, etc.), e gera, como resultado, pontos específicos da curva de retenção de água no solo ou parâmetros hidráulicos que descrevem de forma contínua a curva característica da humidade do solo.

Para a determinação das referidas *PTFs* selecionaram-se 85 dos 733 horizontes do solo disponíveis na base de dados de Portugal, PROPSOLO, uma vez que até então não havia em Cabo Verde informações que permitissem tal determinação. PROPSOLO foi criado em 1997 e presentemente conta com 733 curvas características de retenção de água no solo e 306 curvas de condutividade hidráulica determinadas nos perfis do solo de Portugal (Gonçalves *et al.*, 1997, 1999; Ramos *et al.*, 2011).

No Quadro 4.6 apresentam-se os valores médios, máximos, mínimos e o desvio-padrão das principais propriedades físicas e químicas dos solos de Portugal e da Ilha de Santiago. Estes valores permitem verificar a diversidade das amostras utilizadas para o desenvolvimento das *PTFs* para Cabo Verde.

Quadro 4.6: Valores médios, máximos, mínimos e desvio-padrão das principais propriedades físicas e químicas dos solos de Portugal selecionados para obtenção das funções de pedo-transferência para Cabo Verde - PROPSOLO (para o conjunto de treino) e dos solos de Cabo Verde recolhidos na Ilha de Santiago (conjunto teste).

Parâmetros	Conjunto de treino (Dados de Portugal data)				Conjunto teste (Dados de Cabo Verde)			
	Média	Desvio- -padrão	Mínimo	Máximo	Média	Desvio- -padrão	Mínimo	Máximo
AG (%)	27.1	18.3	0.1	91.2	30.2	12.1	5.5	65.9
AF (%)	38.8	15.5	3.9	69.1	31.5	10.4	12.0	63.9
L (%)	20.4	13.6	3.4	68.1	19.1	5.7	6.1	36.1
A (%)	13.8	8.9	1.5	47.4	19.1	11.0	4.4	62.0
GPD	0.101	0.105	0.006	0.774	0.077	0.062	0.004	0.337
GSD	8.42	3.04	3.46	17.02	11.30	2.62	5.47	18.10
ρ_b (g cm ⁻³)	1.41	0.17	1.00	1.73	1.25	0.15	0.97	1.75
CO (%)	0.78	0.53	0.03	2.83	1.28	0.90	0.19	5.53
Z (cm)	34.2	26.1	5.0	110.0	48.9	53.0	7.5	110.0
ϕ (cm ³ cm ⁻³)	0.477	0.063	0.350	0.631	0.545	0.056	0.379	0.640
$\theta_{0.4}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.458	0.063	0.313	0.594	0.531	0.054	0.360	0.622
$\theta_{1.0}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.421	0.064	0.253	0.538	0.499	0.064	0.251	0.601
$\theta_{1.5}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.379	0.071	0.114	0.525	0.445	0.066	0.211	0.586
$\theta_{2.0}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.331	0.083	0.075	0.505	0.378	0.064	0.185	0.525
$\theta_{2.5}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.264	0.091	0.064	0.465	0.323	0.059	0.165	0.489
$\theta_{3.0}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.214	0.084	0.044	0.432	0.288	0.055	0.151	0.450
$\theta_{4.2}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.127	0.067	0.012	0.360	0.213	0.049	0.109	0.378

AG – Areia grossa, AF – Areia Fina, L – Limo, A – Argila, GPD – Diâmetro médio das partículas, GSD – Média geométrica do diâmetro das partículas, ρ_b – massa volúmica ou densidade aparente, CO – Carbono orgânico, Z – profundidade média do solo, ϕ – porosidade total, $\theta_{0.4}$, $\theta_{1.0}$, $\theta_{1.5}$, $\theta_{2.0}$, $\theta_{2.5}$, $\theta_{3.0}$, e $\theta_{4.2}$ – retenção de água no solo a -0.25, -1, -3, -10, -33, -100 e -1500 kPa, respetivamente.

Como referido no Capítulo 2, durante o desenvolvimento das *PTFs* para solos de Cabo Verde surgiram dois obstáculos importantes: i) a falta de informação sobre as propriedades hidráulicas dos solos, nomeadamente as curvas características de retenção de água nos solos da Ilha de Santiago e de outras ilhas de Cabo Verde; ii) o facto já estabelecido de que as *PTFs* não deveriam ser utilizadas para fazer previsões para solos que se encontram fora de cadeia de solos utilizada para derivar as *PTFs* (Wosten *et al.*, 2001), pois as bases de dados com informações de solo recolhidas em regiões temperadas utilizadas noutras áreas do mundo com solos e climas diferentes revelaram geralmente resultados não satisfatórios (van den Berg *et al.*, 1997; Tomasella e Hodnett, 1998; Wösten *et al.*, 2001). Pelas razões acima mencionadas, o uso da base de dados do solo português para desenvolver as *PTFs* para Cabo Verde podia levar a erros bastantes significantes. Porém, isso não se verificou tendo em conta que PROPSOLO contém maior variedade de informação do que a normalmente encontrada nos bancos de dados provenientes de outras regiões temperadas, por incluir também dados sobre as propriedades hidráulicas de solos vulcânicos, nomeadamente, dos arquipélagos da Madeira e dos Açores. No entanto, a fim de minimizar o erro, apenas as informações relativas aos horizontes com classes de textura correspondentes às encontradas nos perfis estudados (Figura 4.10), e tendo curvas de retenção semelhantes (Figura 4.12) às determinadas nos horizontes dos perfis de solo da Ilha de Santiago (conjunto teste) foram selecionados da PROPSOLO (para o conjunto de treino).

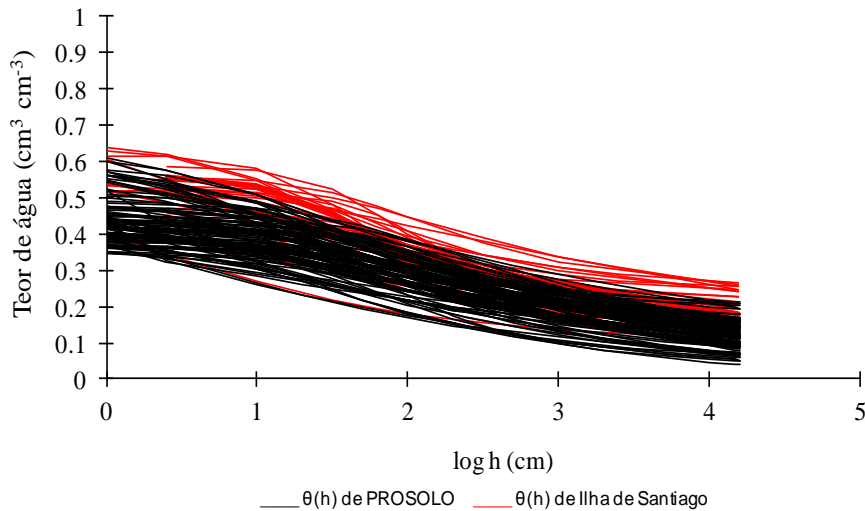


Figura 4.12: Exemplo de seleção de curvas de retenção de água do solo (textura franco-arenosa) do banco de dados PROPSOLO (linhas pretas) com comportamento hidráulico semelhante ao dos solos da Ilha de Santiago (linhas vermelho).

O método de análise utilizado na construção das *PTFs* foi a regressão linear múltipla, passo a passo, a qual permite incluir no modelo apenas as variáveis independentes que contribuem de forma mais significativa para a descrição dos dados e excluir aquelas que não aumentam significativamente o coeficiente de determinação, tornando assim os modelos mais simples. As *PTFs* para determinar φ , $\theta_{0.4}$, $\theta_{1.0}$, $\theta_{1.5}$, $\theta_{2.0}$, $\theta_{2.5}$, $\theta_{3.0}$ e $\theta_{4.2}$ foram desenvolvidas a partir de propriedades básicas dos solos (*AG*, *AF*, *A*, *L*, *GPD*, *GSD*, ρ_b , *Z*, *CO*).

As equações 4-4 a 4-11 apresentam os pontos das funções de pedo-transferência, desenvolvidas para estimativa da porosidade total (φ) e retenção de água do solo a ($\theta_{0.4}$), -1 ($\theta_{1.0}$), -3 ($\theta_{1.5}$), -10 ($\theta_{2.0}$), -33 ($\theta_{2.5}$), -100 ($\theta_{3.0}$) e -1500 ($\theta_{4.2}$) kPa na Ilha de Santiago. *AG*, *AF*, *L*, são as percentagens de areia grossa, areia fina e limo, respetivamente.

$$\varphi = 0.920 - 0.00067 AF - 0.128 GPD - 0.281 \rho_b - 0.00022 Z \quad (R^2 = 83.2\%) \quad (4-4)$$

$$\theta_{0.4} = 0.901 - 0.00081 AF - 0.165 GPD - 0.276 \rho_b - 0.00020 Z \quad (R^2 = 87.0\%) \quad (4-5)$$

$$\theta_{1.0} = 0.748 + 0.001 L - 0.180 GPD - 0.233 \rho_b \quad (R^2 = 76.8\%) \quad (4-6)$$

$$\theta_{1.5} = 0.702 - 0.0016 AG - 0.00077 AF - 0.201 GPD - 0.163 \rho_b \quad (R^2 = 69.1\%) \quad (4-7)$$

$$\theta_{2.0} = 0.697 - 0.0025 AG - 0.00151 AF - 0.192 GPD - 0.156 \rho_b \quad (R^2 = 75.8\%) \quad (4-8)$$

$$\theta_{2.5} = 0.140 + 0.0013 AF + 0.0047 L + 0.0032 A + 0.0066 GSD - 0.086 \rho_b \quad (R^2 = 79.6\%) \quad (4-9)$$

$$\theta_{3.0} = 0.108 + 0.00077 AF + 0.0041 L + 0.003 A + 0.0065 GSD - 0.074 \rho_b \quad (R^2 = 82.0\%) \quad (4.10)$$

$$\theta_{4.2} = -560.9 + 5.61 AG + 5.61 AF + 5.61 L + 5.61 A - 0.0095 GSD - 0.071 \rho_b \quad (R^2 = 80.9\%) \quad (4-11)$$

As *PTFs* obtidas para a porosidade total, capacidade de campo, coeficiente de emurchecimento e para outros pontos da curva de retenção de água no solo, foram bem definidas através das equações de regressão linear múltipla, resultando num R^2 entre 0.691 e 0.870, o que significa que é possível modelar a relação entre as propriedades básicas do solo e os pontos da curva de retenção de água do solo através de regressão linear múltipla.

As *PTFs* para φ e $\theta_{0.4}$ foram semelhantes, com ambas as funções apresentando os mesmos quatro argumentos (*AF*, ρb , *GPD* e *Z*). A principal diferença nestas *PTFs* foi o menor valor da constante observado com o aumento da pressão efetiva.

As *PTFs* desenvolvidas para $\theta_{1.5}$ e $\theta_{2.0}$ e para $\theta_{2.5}$ e $\theta_{3.0}$ foram também similares, sendo que as duas primeiras requereram os mesmo quatro (4) argumentos (*AG*, *AF*, *GPD* e ρb), e as duas últimas os mesmos cinco (5) argumentos (*AF*, *L*, *A*, *GSD* e ρb), enquanto que a *PTF* desenvolvida para $\theta_{4.2}$ precisou de seis (6) argumentos (*AG*, *AF*, *L*, *A*, *GSD* e ρb). O carbono orgânico não foi considerado uma variável estatisticamente significativa e foi por isso excluído de todas as funções de regressão. No Quadro 4.7 apresentam-se as estatísticas R^2 , *ME*, *MAE*, *RMSE*, e *MRE* para avaliar a precisão das *PTFs* desenvolvidas para Ilha de Santiago.

A análise dos valores de *ME* revelou que as *PTFs* subestimaram a φ , $\theta_{0.4}$ e $\theta_{4.2}$ para os solos da Ilha de Santiago. Para $\theta_{2.0}$, as previsões *PTF* foram boas com o *ME* muito próximo de zero (-0.001). A Figura 4.13 apresenta os desvios entre os valores de *PTFs* medidos e estimados que ajudam a compreender os erros associados às *PTFs* desenvolvidas para a Ilha de Santiago.

A capacidade de campo ($\theta_{2.0}$ ou $\theta_{2.5}$) e o coeficiente de emurchecimento ($\theta_{4.2}$) estimados para Cabo Verde a partir das *PTFs* são similares em termos de desvios.

Em termos de *MAE*, os resultados mostraram um aumento sistemático de erro médio com o aumento da pressão efetiva, isto é, φ , $\theta_{2.0}$, $\theta_{2.5}$, e $\theta_{4.2}$ produziram um erro sistemático crescente, respetivamente de 0.030, 0.045, 0.047 e 0.052 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. *RMSE* também aumenta de 0.038 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para 0.065 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. O erro médio relativo (*MRE*) também aumentou consideravelmente na previsão das *PTFs* de pressão efetiva mais baixas (*MRE* $\varphi=5.8\%$) para as mais altas (*MRE* $\theta_{4.2}=37.0\%$).

O maior valor de *MRE* registado nas pressões efetivas mais altas resultou normalmente a partir do viés observado entre as curvas de retenção de água nos solos de Portugal e Cabo Verde (Figura 4.13) uma vez que esta foi maior do que os observados nos solos portugueses.

As *PTFs* de Cabo Verde forneceram melhores previsões de todos os oito (8) pontos de retenção da água do que as *PTFs* publicadas por Paz *et al.* (2009), Batjes (1996) e Schaap *et al.* (2001). Estas três *PTFs* também subestimaram a retenção de água no solo de Cabo Verde em toda a gama de pressão efetiva (Figura 4.13), com viés maior de que as *PTFs* de Cabo Verde.

As *PTFs* ISRIC (Batjes, 1996) forneceram, de uma forma geral, os piores resultados de todos os pontos de retenção da água com *ME* variando entre -0.086 e -0.185 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, e o *RMSE* entre 0.099 e 0.206 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. As funções incluídas no software ROSETTA forneceram também previsões não satisfatórias para $\theta_{4.2}$ (*RMSE* = 0.129 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; *MRE* = 0.119 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). No entanto, tal como observado na Figura 4.13, o problema principal com essas duas *PTFs* foi a sua incapacidade de, razoavelmente, prever a retenção da água dos solos de Cabo Verde nas pressões efetivas mais baixas.

Quadro 4.7. Precisão de PTFs desenvolvidas para estimação de retenção de água no solo da Ilha de Santiago.

PTFs	φ	$\theta_{0.4}$	$\theta_{1.0}$	$\theta_{1.5}$	$\theta_{2.0}$	$\theta_{2.5}$	$\theta_{3.0}$	$\theta_{4.2}$
Cabo Verde								
R ²	0.659	0.682	0.577	0.363	0.357	0.356	0.342	0.214
ME	-0.018	-0.021	-0.075	-0.034	-0.014	-0.024	-0.037	-0.038
MAE	0.030	0.031	0.079	0.050	0.045	0.047	0.052	0.052
RMSE	0.038	0.038	0.086	0.063	0.056	0.060	0.065	0.065
MRE	0.058	0.061	0.188	0.127	0.131	0.176	0.241	0.370
Portugal								
R ²	...	0.754	...	...	0.303	...	...	0.177
ME	...	-0.049	...	...	-0.024	...	...	-0.073
MAE	...	0.050	...	...	0.049	...	...	0.076
RMSE	...	0.057	...	...	0.059	...	...	0.088
MRE	...	0.106	...	...	0.142	...	...	0.626
ISRIC								
R ²	0.166	...	0.210	0.154	0.281	0.331	...	0.186
ME	-0.185	...	-0.155	-0.164	-0.110	-0.112	...	-0.086
MAE	0.188	...	0.159	0.165	0.112	0.113	...	0.087
RMSE	0.206	...	0.177	0.184	0.129	0.125	...	0.099
MRE	0.616	...	0.538	0.689	0.487	0.609	...	0.813
ROSETTA								
R ²	0.445	0.486	0.418	0.304	0.305	0.275	0.219	0.154
ME	-0.098	-0.085	-0.060	-0.032	-0.034	-0.073	-0.112	-0.119
MAE	0.099	0.086	0.070	0.054	0.056	0.081	0.116	0.119
RMSE	0.108	0.094	0.078	0.067	0.070	0.093	0.125	0.129
MRE	0.227	0.197	0.162	0.138	0.177	0.354	0.720	1.427

Coefficiente de determinação R²; ME erro médio; erro médio absoluto MAE; desvio quadrático médio, RMSE; e erro médio relativo MRE ; PTF – função de pedo-transferência. O ME, permite indicar se pode existir algum erro sistemático relacionado com a medição (Williams & Ahuja, 1992). O RMSE representa a média do erro na estimativa.

As PTFs de Portugal (Paz *et al.*, 2009) e PTFs de ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001) resultaram também em piores avaliações dos teores de água nas diferentes pressões efetivas estudadas relativamente às PTFs de Cabo Verde.

Em Cabo Verde, as áreas agrícolas, principalmente na Ilha de Santiago, estão localizadas quase sempre em solos de textura média e grosseira. A retenção de água nesses solos apresenta grande variabilidade e para pressões efetivas mais elevadas apresenta valores anormalmente elevados comparativamente a solos de regiões temperadas. A retenção de água no solo observada no ponto de emurchecimento atingiu valores superiores a 0.300 cm³ cm⁻³ nos solos de textura franco-arenosa.

As diferenças de comportamento hidrológico entre solos de regiões temperadas e solos da região tropical seca, como seja o caso da Ilha de Santiago, apontam para a influência de fatores mineralógicos e pedogenéticos nestes últimos.

Concluindo, as funções de pedo-transferência (PTFs) foram desenvolvidas para estimar a porosidade total (φ) e pontos específicos da curva de retenção de água no solo (-0.25, -1, -3, -10, -33, -100 e -1500 kPa) a partir das propriedades básicas do solo (textura e densidade aparente).

As estatísticas mostram um desempenho relativamente bom das PTFs desenvolvidas para Cabo Verde, com RMSE variando entre 0.030 (φ) e 0.079 ($\theta_{1.0}$) cm³ cm⁻³). Como o teor de água no solo é menor nas pressões efetivas mais altas (-1500 kPa; $\theta_{0.4}$), deve-se ter algum cuidado no uso das funções aqui desenvolvidas para a previsão de valores de ponto específicos de retenção de água no ponto de emurchecimento, uma vez que parecem estar fora do intervalo de dados da base de dados original utilizada para desenvolver as PTFs.

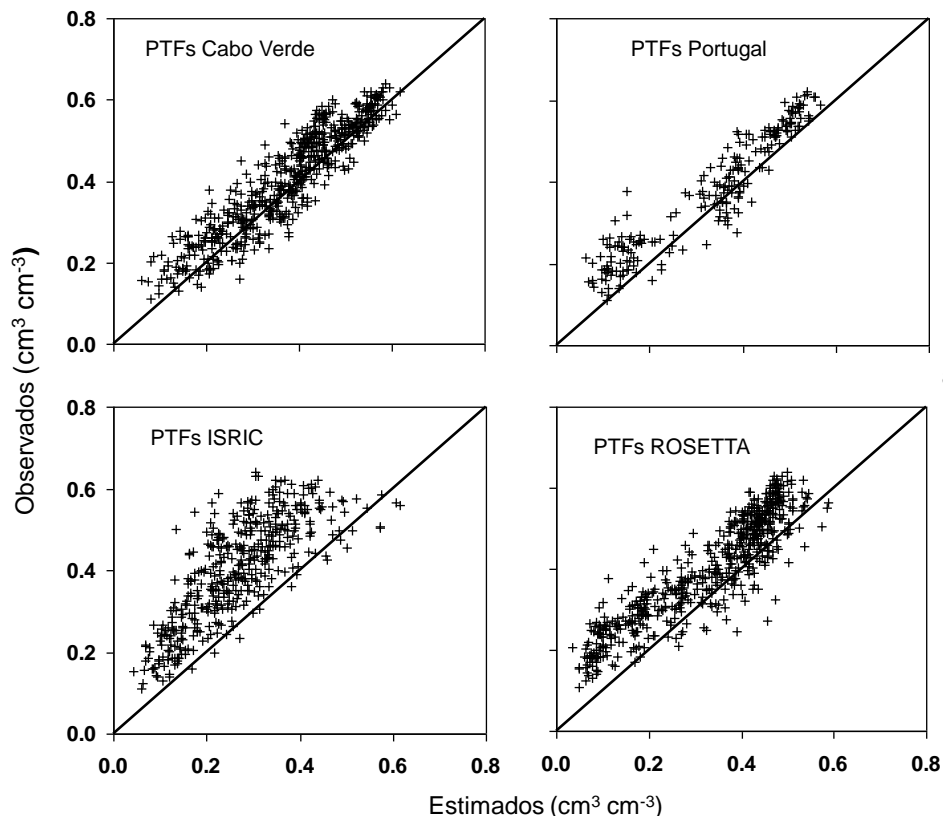


Figura 4.13: Valores de funções pedo-transferência (de Cabo Verde) observados (medidos), a partir das propriedades básicas dos solos de Cabo Verde, versus os estimados com PTFs de Cabo Verde, PTFs Portugal (Paz et al., 2009), PTFs ISRIC (Batjes, 1996), e PTFs ROSETTA (Schaap et al., 2001).

No entanto, as PTFs aqui apresentadas, constituem uma base importante para apoiar o uso de modelos que visam melhorar as práticas de gestão de água de rega na Ilha de Santiago, uma vez que fornecem melhores estimativas do que as outras três PTFs publicadas, anteriormente identificadas

4.4. Dados hidrológicos e balanço hídrico – modelo Temez

4.4.1. Nota prévia

Visto as áreas suscetíveis de serem regadas se inserirem a jusante das secções das estações hidrométricas de Achada Baleia (na bacia hidrográfica de São Domingos) e Poilão (na bacia hidrográfica de Ribeira Seca) optou-se por proceder à avaliação de escoamentos apenas para as secções daquelas estações.

Para a seleção das estações referidas contribuiu decisivamente o facto de nas bacias casos de estudo existirem registos de caudal, embora em número reduzido. Observa-se que na bacia hidrográfica de Ribeira Seca existem outras duas estações hidrométricas (Ponte Ferro e São Jorge), contudo, localizadas consideravelmente a montante da área suscetível de ser regada. Nas aplicações efetuadas, considerou-se que a evapotranspiração nas bacias hidrográficas em menção era igual à estimada para os casos de estudo, até porque a informação climatológica disponível não permite maior detalhe espacial.

4.4.2. Localização e caracterização das estações hidrométricas

A localização esquemática das estações hidrométricas de Achada Baleia e de Poilão é apresentada na Figura 4.14 a) e b). A bacia hidrográfica da primeira estação hidrométrica está inserida na AEZ I (zona agroecológica árida). A maior parte de escoamento é oriunda da AEZ III (zona agroecológica semiárida), embora com alguma influência da AEZ IV (zona agroecológica sub-húmida). A bacia hidrográfica da segunda estação hidrométrica é fortemente beneficiada pelos escoamentos provenientes das zonas de altitude. Tais inserções permitem retratar diferentes situações de escassez e de disponibilidade hídrica.

As características pertinentes relativas às estações hidrométricas são indicadas no Quadro 4.8 que contém ainda a identificação dos postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas daquelas estações, as coordenadas de localização de tais postos e os respetivos pesos.

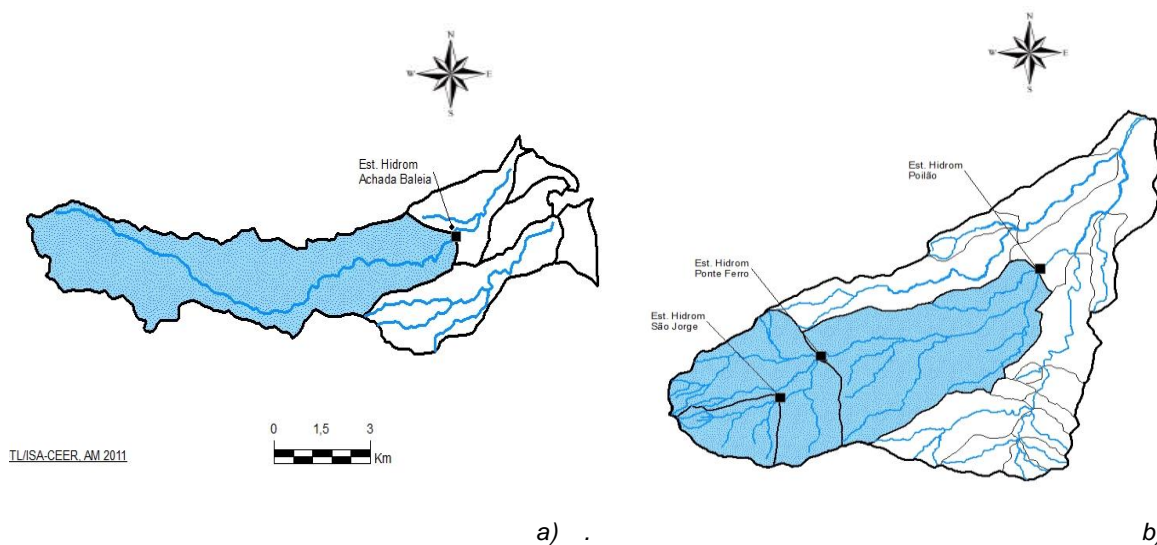


Figura 4.14: Representação esquemática das bacias hidrográficas das estações hidrométricas de Achada Baleia e Poilão: a) sub-bacia de Achada Baleia na bacia de São Domingos b) sub-bacia de Poilão na bacia de Ribeira Seca.

4.4.3. Aplicação do modelo Temez para determinação da disponibilidade hídrica das bacias casos de estudo

No que respeita à aplicação do modelo de Temez, e uma vez que as estações hidrométricas de Achada Baleia e de Poilão apenas possuem registos de caudal médio diário entre julho de 1984 e julho de 1988, utilizou-se tal período para calibrar os parâmetros, a que se seguiu a aplicação do modelo para estimar os escoamentos em falta para o período de 1981/82 a 1983/1984 e de 1988/89 a 2007/08 (anos hidrológicos), com obtenção de uma série contínua de escoamentos mensais entre 1981 e 2008. Como anteriormente referido, em face da escassa informação hidrométrica disponível não se procedeu à fase de validação do modelo.

4.4.3.1. Intervalos de variação dos parâmetros. Calibração dos parâmetros do modelo Temez

Em Cabo Verde, devido às características geográficas e à própria erosão, a capacidade máxima de armazenamento de água nos solos (capacidade utilizável), ou seja, a água

disponível total no solo, TAW , varia bastante conforme o solo se insira no litoral, num vale ou numa encosta mais ou menos erodida, não sendo possível atender à variabilidade espacial de tal parâmetro nos cálculos de balanço hídrico ao nível de bacia hidrográfica. Torna-se, portanto, necessário definir um valor único aplicável a uma dada área que, de algum modo, seja representativo das condições médias aí ocorrentes e que permita a comparação dos resultados que assim se obtenham com os referentes a outras áreas.

Quadro 4.8: Características gerais das estações hidrométricas utilizadas no estudo.

Estação hidrométrica							Postos pluviométricos com influencia na sub-bacia hidrográfica da estação hidrométrica						
Código de Estação	Designação	Coordenadas			Bacia	Curso de água (sub-bacia)	Área (km ²)	Código de Estação	Designação	Coordenadas			Peso
		Lat. N	Long. W	Alt. (m)						Lat. N	Long. W	Alt. (m)	
1829930130-1	Achada Baleia	15°01'37"	-23°28'53"	20	São Domingos	Achada Baleia	28.4	806106	Alto Figueirinha	15	-23.3	325	0.05
								806249	Capela Garcia	15	-23.3	290	0.22
								806107	Rib. Chiqueiro	15	-23.3	280	0.38
								806079	Rui Vaz	15	-23.4	798	0.10
								806080	S. Domingos	15	-23.3	235	0.20
								806009	S. Francisco	14.6	-23.3	89	0.05
1829930120-1	Poilão	15°04'28"	-23°33'52"	89	Ribeira Seca	Poilão	28.2	806103	Currálinho	15	-23.4	818	0.10
								806078	Esc. Agro-Pecuária	15	-23.4	369	0.08
								806079	Rui Vaz	15	-23.4	798	0.06
								808268	S. Jorge	15	-23.4	310	0.07
								806105	Var de Santana	15	-23.4	320	0.06
								806097	Alto Casanaia	15	-23.4	543	0.06
								806075	João Goto	15	-23.4	404	0.04
								806074	Ponte Ferro	15	-23.3	230	0.11
								806072	Vale de Mesa	15	-23.3	242	0.07
								806070	Ribeirinha	15	-23.4	194	0.08
								806106	Alto Figueirinha	15	-23.3	325	0.04
								806063	Poilão	15	-23.3	100	0.21

Para intervenções incidindo sobre locais muito específicos, nomeadamente para planeamento de rega, é evidente que será considerada a capacidade real, como se abordará no Capítulo 5.

Segundo estudos realizados por Fernandopullé (1987), do ponto de vista hidrológico, os diferentes solos vulcânicos que cobrem a Ilha de Santiago apresentam valores de TAW compreendidos entre 50 a 200 mm e taxas de infiltração médias de 40 m h⁻¹, no caso de solos aluvionares, e de 40-80 m h⁻¹, para solos basálticos (BURGEAP, 1974). Em conformidade com tais indicações, nas simulações efetuadas adotaram-se valores de TAW compreendidos entre 50 a 200 mm, e de Q_m (infiltração máxima), entre 620 e 1289 mm, na Achada Baleia, e entre 720 e 1440 mm, em Poilão. Estes dois últimos pares de valores decorreram do pressuposto de que a duração média de chuva (em cada mês chuvoso) seria cerca de 16 h, em São Domingos, e 18 h, na Ribeira Seca. Os valores dos parâmetros C (coeficiente de escoamento) e α (coeficiente de descarga do aquífero) foram considerados variáveis entre 0 e 1.

Na fase de calibração (de julho de 1984 a julho de 1988) procedeu-se à aplicação sucessiva do modelo para vários conjuntos possíveis de valores dos parâmetros, tendo-se optado pelo conjunto de parâmetros a que corresponderam os melhores resultados das medidas de ajustamento e de erro. Nesta fase foram consideradas as restrições como a não negatividade dos parâmetros e dados limites de variação para os mesmos. Tendo por base uma dada função objetivo F_o , procedeu-se à aplicação do modelo de simulação por diversas vezes, para vários conjuntos possíveis de parâmetros, tendo-se selecionado o conjunto destes que otimizou aquela função objetivo. Dentro das várias funções objetivo possíveis, a mais conhecida consiste na minimização do somatório do quadrado dos erros entre caudais:

$$F_o = \sum_i (Q_{t_i} - \hat{Q}_{t_i})^2 \quad (4-12)$$

em que Q_t se refere a caudais observados e \hat{Q}_t a caudais estimados pelo modelo.

Nas aplicações efetuadas, o modelo foi implementado num ambiente de Excel sendo que a otimização recorreu à função Solver desse programa. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.15 e no Quadro 4.9 que incluem a indicação dos valores adotados para os parâmetros. Tais resultados evidenciam bons ajustamentos entre escoamentos observados e simulados para qualquer uma das estações hidrométricas.

O bom ajustamento entre os escoamentos observados e simulados está expresso pelos mais elevados valores do coeficiente de correlação, r , e pelos mais baixos valores de $RMSE$ e de MAE . Em São Domingos (Achada Baleia) os valores de $E2$ e de ARV sugerem que o modelo é capaz de reproduzir a variância dos registos. Face aos valores de $RMSE$ e MAE , o valor de IOA está mais relacionado com a variabilidade natural dos escoamentos, reforçando, deste modo, os resultados de $E2$ e ARV . O $BIAS$ indica uma tendência muito ligeira do modelo para sobrestimar, em média, os escoamentos mensais.

Quadro 4.9: Modelo de Temez, parâmetros do modelo. Características estatísticas dos escoamentos mensais observados e simulados e medidas de ajustamento/erro do modelo.

Período: 1984/85 a 1987/8 (calibração)	Características estatísticas			Medidas de ajustamento / erro							
	Média (mm)	Desvio- padrão (mm)	Coefficiente de variação (-)	r	$RMSE$ (mm)	MRE (mm)	MAE (mm)	$BIAS$ (mm)	$E2$ (-)	ARV (-)	IOA (-)
Caso1: Achada Baleia (São. Domingos) Escoamentos mensais simulados pelo modelo de Temez: $C=0.33$; $TAW=185$ mm; $Q_m=960$ mm; $\alpha=0.03$	7.063	12.704	0.847	0.847	8.393	3.611	4.020	-3.526	0.484	0.516	0.901
Caso 2: Pilão - Ribeira Seca Escoamentos mensais simulados pelo modelo de Temez: $C=0.30$; $TAW=160$ mm; $Q_m=975$ mm; $\alpha=0.05$	11.230	21.098	0.906	0.906	9.971	0.985	4.998	-2.596	0.777	0.223	0.953

Em Ribeira Seca (Poilão) o valor relativamente baixo de ARV e o valor relativamente elevado de $E2$ sugerem boa capacidade do modelo para reproduzir a variância dos registos, ou seja, há um bom ajustamento do modelo aos escoamentos observados. O $BIAS$ indica uma tendência pouco significativa do modelo para sobrestimar, em média, os escoamentos mensais. Nesse caso, também o valor de IOA está mais relacionado com a variabilidade natural dos escoamentos como se pode verificar pelos valores de $RMSE$ e MAE .

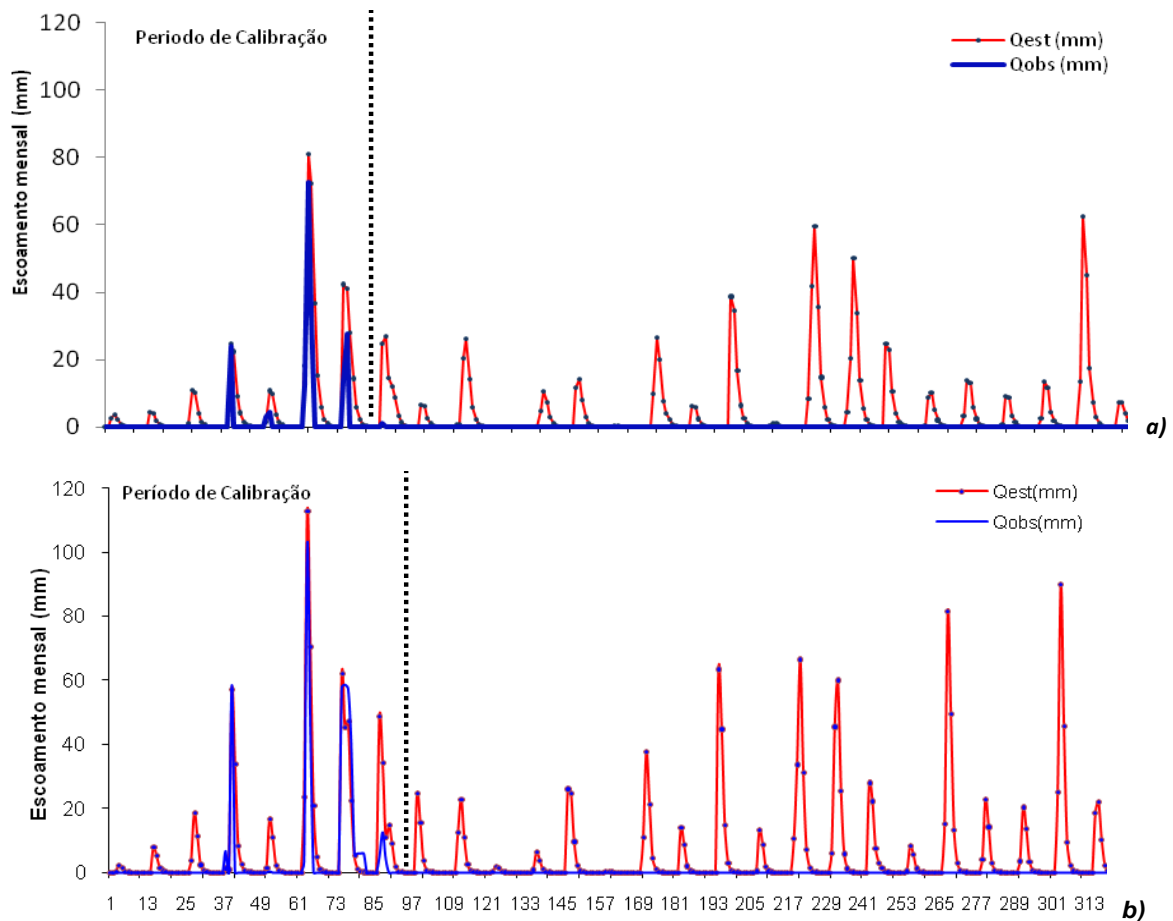


Figura 4.15: Modelo de Temez. Escoamentos mensais observados e simulados entre 1981/82 e 2007/2008: a) estação hidrométrica de Achada Baleia – bacia de São Domingos; b) estação hidrométrica de Poilão – bacia de Ribeira Seca.

4.4.3.2. Avaliação das disponibilidades hídricas nas bacias hidrográficas de São Domingos e da Ribeira Seca

Tendo por base o modelo de Temez com os parâmetros anteriormente apresentados, pretende-se avaliar as disponibilidades hídricas existentes nas bacias hidrográficas de São Domingos e da Ribeira Seca que constituem os casos de estudo. Em tais bacias, a aridez acentua-se com a proximidade do litoral. Com efeito, nas regiões de interior existe alguma disponibilidade de água entre agosto e outubro, não obstante tal disponibilidade ser muito irregular e reduzida mesmo nos anos mais chuvosos. Em anos secos, a escassez e aridez afetam ambas as bacias e, de modo geral, toda a Ilha de Santiago, com excedentes de água mínimos ou mesmo nulos. A Figura 4.16 evidencia que a evapotranspiração de referência, ET_o , é muito elevada e que só é superada pela precipitação nos meses de agosto e de setembro e, por vezes, de outubro, se o ano não for seco.

A evapotranspiração real, ET_r , é muito variável, estando diretamente relacionada com a distribuição da precipitação e dependendo também da reserva de água facilmente utilizável, RAW . A maior parte da precipitação perde-se por escoamento e devido à evapotranspiração. Os valores de TAW , de 185 e 160 mm, obtidos na fase de calibração do modelo de Temez, respetivamente para São Domingos e para Ribeira Seca, proporcionam alguma reserva disponível para satisfazer a evapotranspiração de referência, cujos montantes rondam 90 a 150 mm mensais, naquela primeira bacia, e 80 a 140 mm mensais, na segunda bacia.

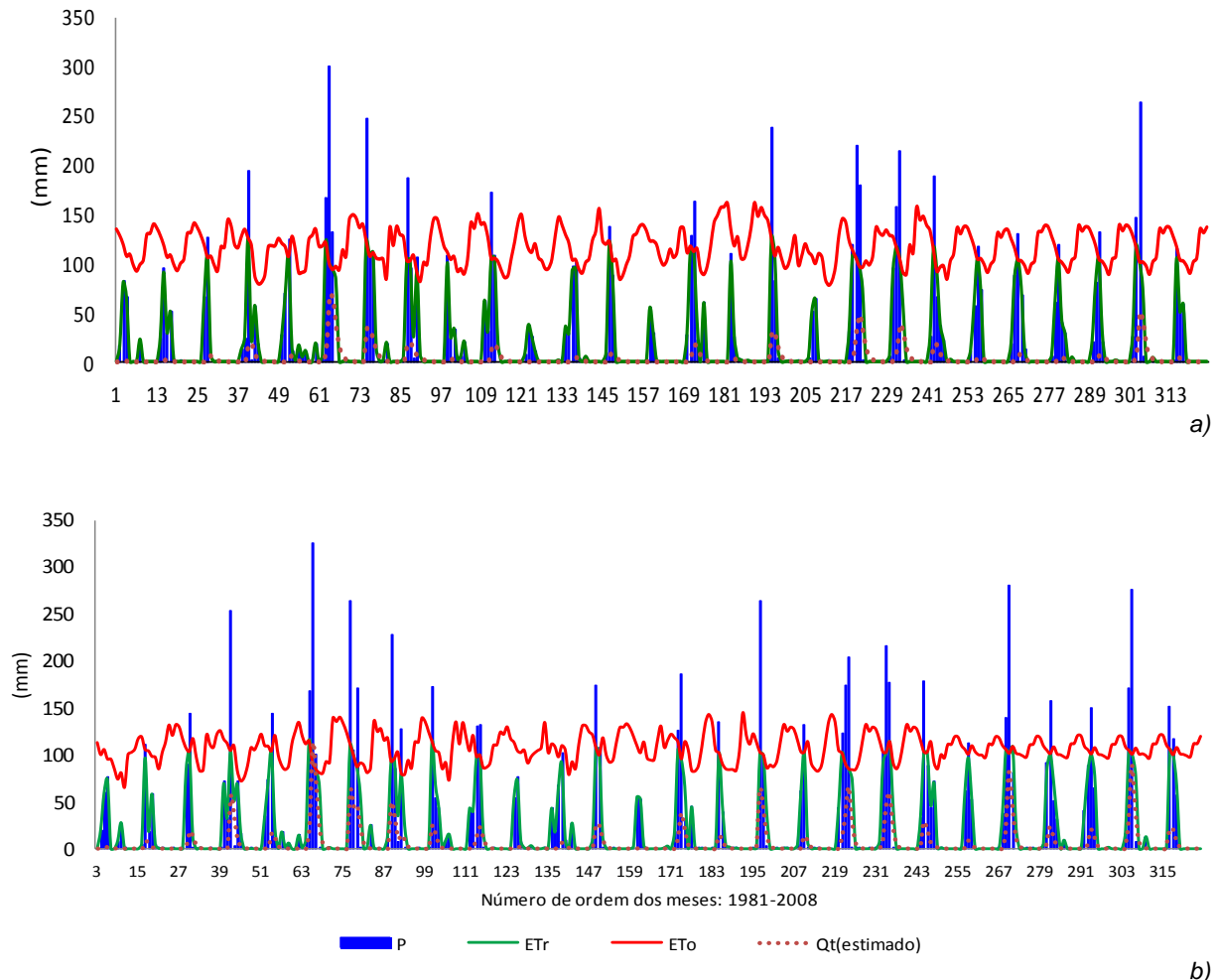


Figura 4.16: Balanço hídrico mensal nas bacias hidrográficas casos de estudo entre 1981 e 2008: a) bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Achada Baleia; b) bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Poilão.

Os valores calibrados, já especificados, de TAW correspondem à morfologia e às características dos horizontes superficiais das bacias hidrográficas. Dos setenta e dois (72) horizontes estudados nas bacias casos de estudo identificaram-se horizontes profundos com mais de 300 cm, com capacidade de armazenamento bastante elevada, sendo que a maior parte desses horizontes é originária de rochas basálticas e/ou de solos de aluviões de base de montanhas e vales. Em termos médios, TAW “perde” para ET_o 3.5 mm dia^{-1} , em São Domingos, e 3.2 mm dia^{-1} , em Ribeira Seca, satisfazendo, assim, a evapotranspiração em cerca de 50 dias, caso não ocorra precipitação. O escoamento subterrâneo (Q_{sub}) contribui em maior proporção para o escoamento superficial total (Q_t) do que o escoamento superficial direto (Q_s) (Figura 4.17). Enquanto Q_s se escoar em cerca de 2 a 3 h, Q_{sub} pode continuar a contribuir para o escoamento durante 5 a 6 meses dependendo se o ano for médio ou chuvoso. Este facto é confirmado durante os meses de setembro a fevereiro em que o escoamento de base é o único a alimentar os cursos de água principais das bacias em estudo, dando lugar ao aparecimento de agricultura de regadio, temporário, nas margens desses cursos de água. De modo a melhor entender o efeito da grande variabilidade de precipitação e da evapotranspiração sazonal, optou-se por detalhar a análise tendo por base um ano chuvoso (1986/87), um ano médio (1987/88) e um ano seco (1993/1994), com obtenção dos resultados representados na Figura 4.18.

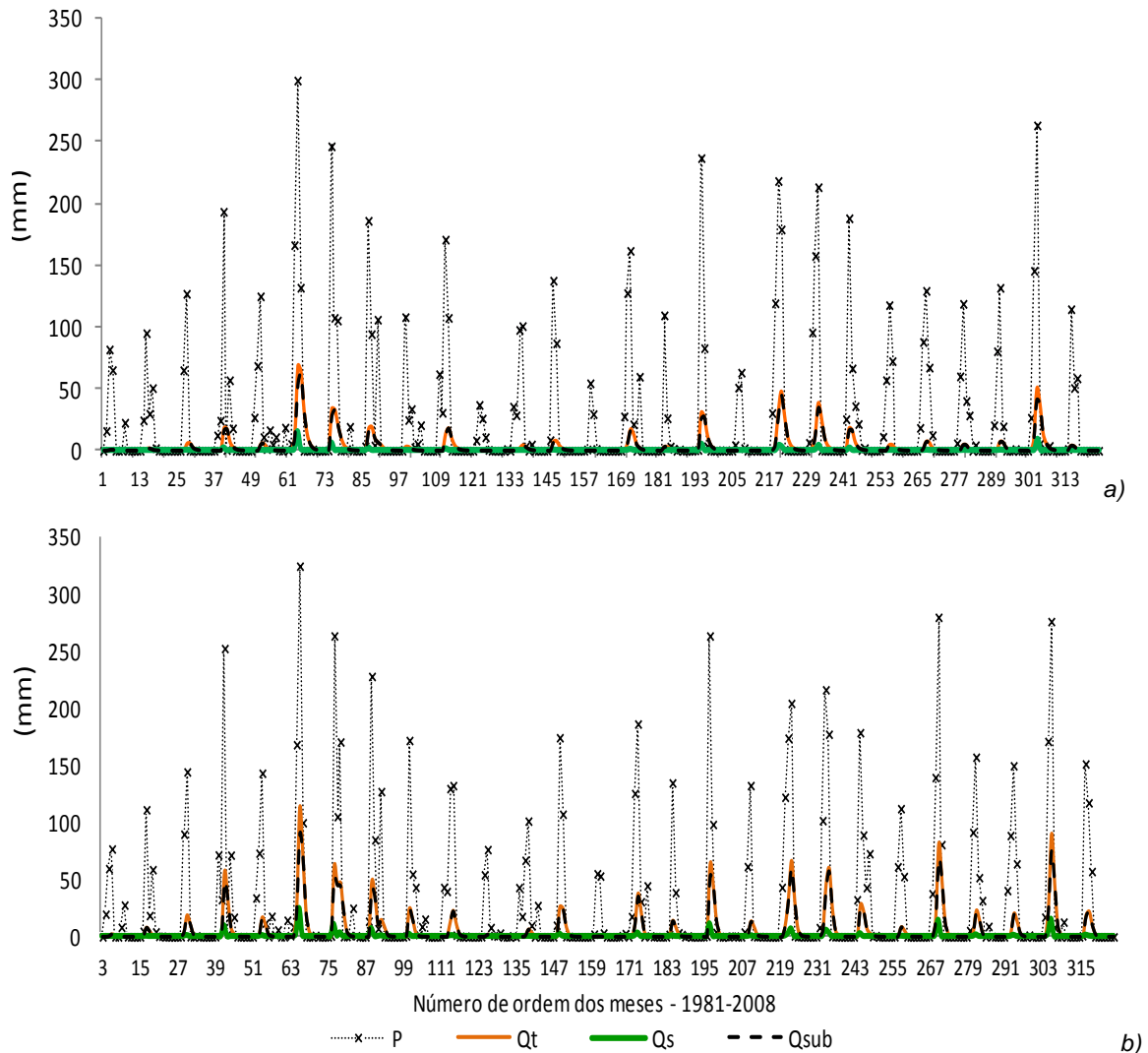
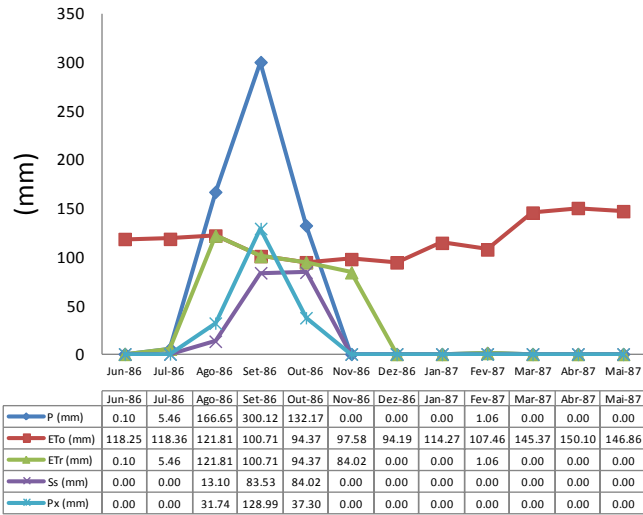
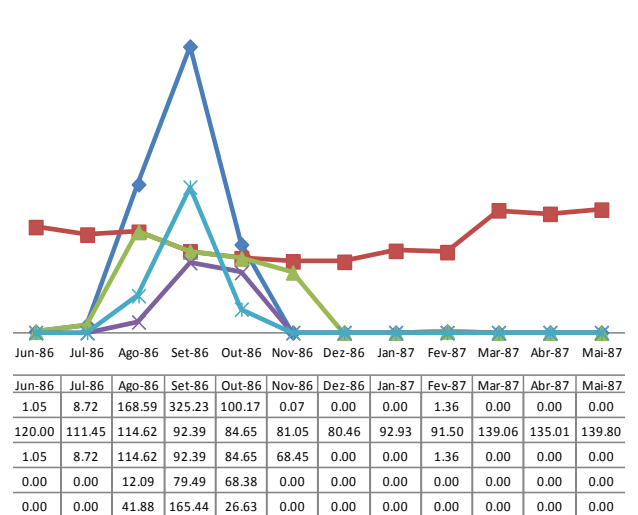


Figura 4.17: Repartição da precipitação mensal entre escoamento superficial e subterrâneo: a) bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Achada Baleia; b) bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Poilão.

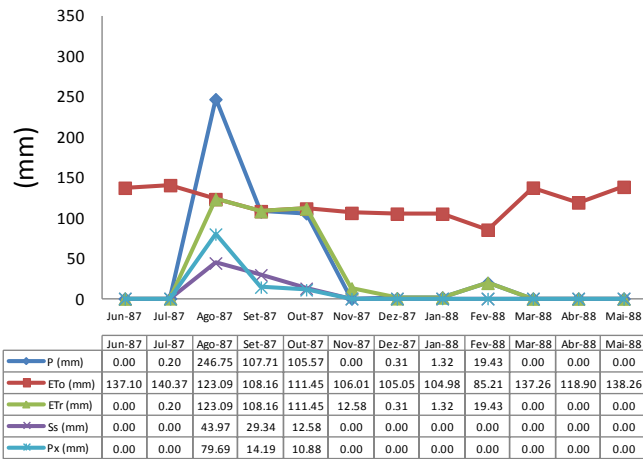
Verifica-se, assim, que, na Ribeira Seca, no ano chuvoso (1986/87) – Figura 4.18 b1) – há um excesso de água, P_x , significativo durante a época das chuvas, de agosto a outubro: 81.88, 165.44 e 26.63 mm, respetivamente. Em São Domingos – Figura 4.18 a1) –, para o mesmo período de tempo, os valores de excesso de água são inferiores: 31.74, 128.99 e 37.30 mm, respetivamente.



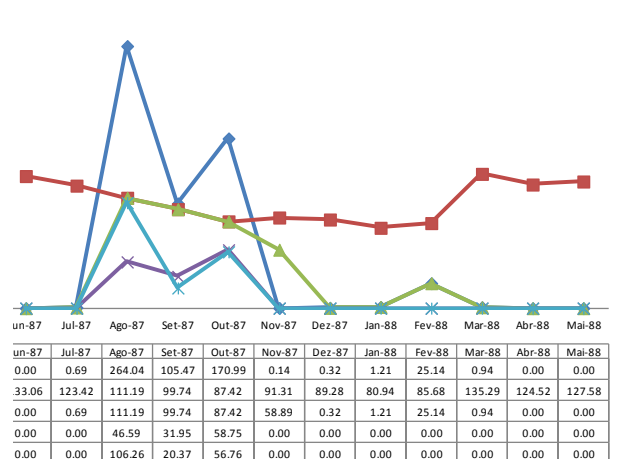
a1) Bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Achada Baleia.



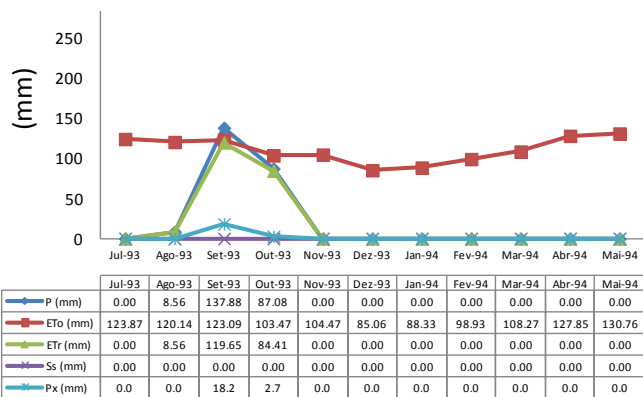
b1) Bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Poilão.



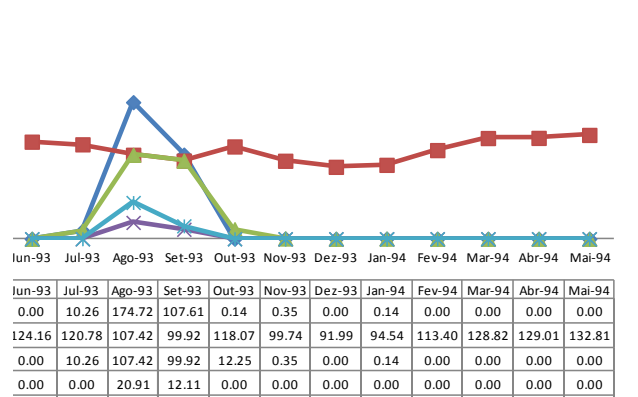
a2) Bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Achada Baleia.



b2) Bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Poilão.



a3) Bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Achada Baleia.



b3) Bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Poilão.

Figura 4.18: Balanço hídrico na bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Achada baleia -São Domingos (a) e de Poilão - Ribeira Seca (b), em ano chuvoso (1986/87), médio (1987/88) e seco (1993/1994). P- precipitação mensal; ETo - evapotranspiração de referência de Penman-Montheith; ETr- evapotranspiração real ; Ss- armazenamento no solo não saturado; Px- Excesso de precipitação.

Em ambas as bacias, o maior P_x ocorre em setembro, diminuindo no mês de outubro. Esse comportamento hidrológico é típico das regiões áridas da Ilha de Santiago, onde mesmo em anos chuvosos e nos meses pluviosos, pode haver déficit de água. Os nove meses para além do período de agosto a outubro correspondem ao período de déficit hídrico crítico. A precipitação e evapotranspiração real são nulas e a evapotranspiração de referência elevada.

No ano médio (1987/88) – Figura 4.18 a2) e b2) – em agosto verifica-se um ligeiro excesso de água em São Domingos (78.69 mm) e na Ribeira Seca (106.26 mm). Nos meses de setembro e outubro tal excesso reduz-se significativamente para menos de 21 mm. Em outubro, a precipitação volta a ser superior à evapotranspiração em Ribeira Seca, gerando um excedente de 56.76 mm. Nesses meses, em São Domingos, toda a chuva é consumida pela evapotranspiração real que iguala a evapotranspiração de referência. Tanto em setembro como em agosto, os excessos de água são inferiores aos dos anos chuvosos.

Em relação ao ano seco (1993/94) – Figura 4.18 a3) e b3) – por norma não há excesso ou mesmo armazenamento da água no solo nas bacias casos de estudo. A evapotranspiração de referência é normalmente superior à precipitação, sendo, portanto, a evapotranspiração real igual à precipitação na maioria dos anos. Porém, na bacia de Ribeira Seca pode haver algum excesso nos anos secos, um pouco mais expressivo que em São Domingos, embora sempre pouco significativo.

Nas bacias em estudo a situação de aridez gera, a nível anual, escassez de água independentemente do ano ser chuvoso, médio ou seco, embora tal escassez se acentue ou progredir-se de um tipo de ano para o seguinte. Com efeito, a época chuvosa é muito curta (3 meses) e a evapotranspiração muito elevada durante todo o ano.

Na bacia hidrográfica de São Domingos, o déficit hídrico chega a ser cerca de 1000 mm em anos chuvosos, de 1040 mm em anos médios e de 1140 mm em anos secos. Na bacia de Ribeira Seca, é de cerca de 900 mm em anos chuvosos e médios, e é superior a 1130 mm em anos secos.

Na Figura 4.19 apresenta-se o gráfico das disponibilidades hídricas mensais para ano chuvoso, médio e seco, nas bacias analisadas. Nota-se que o solo está seco na maior parte do ano. *TAW* só é atendido nos meses de agosto a outubro, esgotando-se ao longo dos restantes meses do ano até maio. Não sendo expectável qualquer chuva nos nove meses de grande déficit hídrico, a única forma de desenvolvimento agrícola passa pela rega, que, contudo, é quase integralmente (90%) dependente da exploração das reservas subterrâneas. O controlo de exploração (ação antrópica) dos recursos subterrâneos constitui hoje um dos principais desafios de luta contra a desertificação e escassez hídrica na Ilha de Santiago.

Apesar da escassez acima referida, é importante observar que a descarga, durante a época das chuvas, é significativa em termos de volume, conforme se caracteriza no Quadro 4.10. Atualmente esse volume é perdido totalmente em Achada Baleia e uma boa parte em Poilão. Com efeito, Poilão já conta com uma barragem criando uma albufeira capaz de armazenar 1.20 hm³, destinada fundamentalmente à rega de 774 ha localizados no vale, a jusante da obra. Tal capacidade que representa cerca de 34 % do volume de escoamento em ano médio e 27%, em anos chuvosos, foi estimada tendo por base um ano relativamente seco. Nos demais tipos de anos, os anos mais chuvosos (e.g.,2009/2010), ocorrem descargas da albufeira.

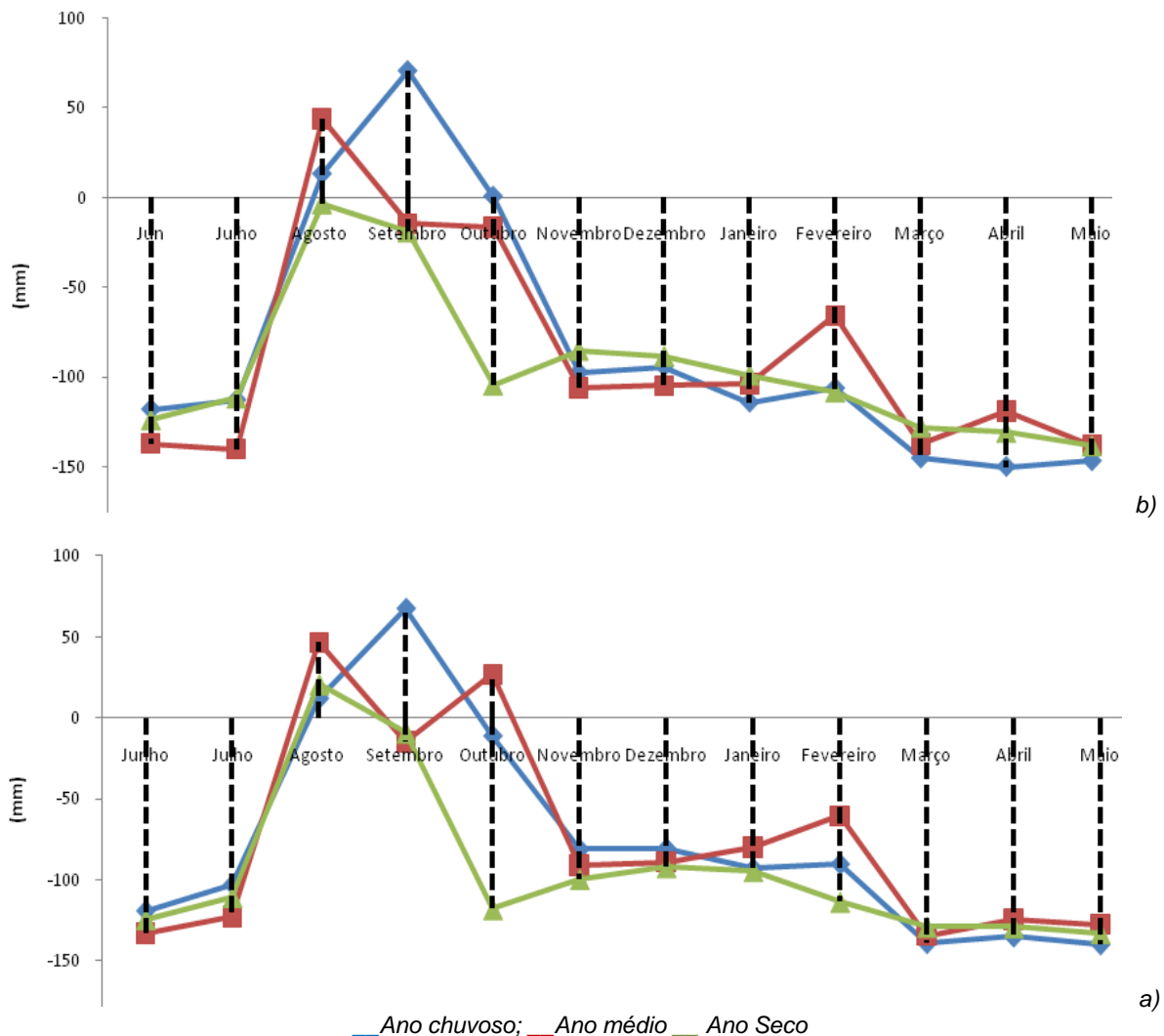


Figura 4.19: Balanço hídrico anual em ano chuvoso, ano médio e ano seco nas bacias hidrográficas das estações hidrométricas de Achada Baleia a) e de Poilão b).

Quadro 4.10: Disponibilidades hídricas nas bacias hidrográficas de Achada Baleia (em São Domingos) e Poilão (em Ribeira Seca) – Descarga anual total.

Ano	Q_t – Descarga total São Domingos em Achada Baleia		Q_t – Descarga total Ribeira Seca em Poilão	
	(mm)	hm ³	(mm)	hm ³
Chuvoso	197.94	5.62	233.95	6.60
Médio	104.82	2.98	183.40	5.17
Seco	20.90	0.59	62.88	1.77

No Quadro 4.11 apresentam-se os valores anuais de Q_t , Q_r e de ET_o em percentagem da precipitação, P . Verifica-se, assim, que, nos anos chuvosos, médios ou secos e excetuando uma situação, a componente que representa a maior parcela da precipitação é a evapotranspiração, ET_o , sendo essa parcela tanto maior quanto mais seco for o ano. A segunda parcela mais importante é, na generalidade dos casos, a correspondente ao

escoamento total, Q_t , a qual é, contudo, relativamente próxima ou mesmo igual (nos anos secos) à parcela referente à infiltração, Q_r .

Quadro 4.11: *Repartição da precipitação nas bacias hidrográficas de Achada Baleia (em São Domingos) e Poilão (em Ribeira Seca).*

Ano	Bacia de São Domingos em Achada Baleia				Bacia de Ribeira Seca em Poilão			
	P (mm)	Q_r (mm)	Q_t (mm)	ET_o (mm)	P (mm)	Q_r (mm)	Q_t (mm)	ET_o (mm)
Chuvoso	606	180	198	227	605	208	234	164
		30%	32%	38%		34%	39%	27%
Médio	481	98	105	278	569	169	183	216
		20%	22%	58%		30%	32%	38%
Seco	234	21	21	192	293	61	63	170
		9%	9%	82%		21%	21%	58%

Na perspetiva de uma população e de necessidades de produção agrícola ambas crescentes, e em face dos valores e dos padrões de variação temporal da procura de água e da sua disponibilidade, é fundamental averiguar se tais disponibilidades permitem suprir aquelas necessidades de forma a assegurar a sustentabilidade hidroagrícola e alguma atividade socioeconómica.

Contudo, os resultados obtidos apontam para a possibilidade de, através de aproveitamentos hidráulicos, criar capacidade de armazenamento de água que possibilite um maior aproveitamento dos escoamentos afluentes compatível com o aumento da procura, com conseqüente aumento da capacidade de produção agrícola.

A coleta e armazenamento de água das chuvas e do escoamento podem ser a solução para superar os défices hídricos das culturas, sobretudo nos meses secos, viabilizando a produção onde ela não tem sido possível sob as condições ambientais prevalecentes.

4.5. Avaliação da quantidade e qualidade da água empregue na rega

4.5.1. Nota prévia

A baixa qualidade de água usada na rega, as elevadas taxas de evaporação anual e as técnicas culturais praticadas constituem as principais causas de salinização dos solos regados na Ilha de Santiago. A sobre-exploração dos pontos de água, a escassez e irregularidade da precipitação, aliadas à ação atópica têm agravado o processo de intrusão salina em quase toda a área costeira da região Leste da Ilha de Santiago. Como conseqüência, o desenvolvimento hidroagrícola nesta região e, particularmente, nas bacias de São Domingos e Ribeira Seca, está comprometido em virtude da deterioração da qualidade, quer dos solos agrícolas, quer da água mobilizada pela sua beneficiação.

Com o objetivo de caracterizar com mais detalhe a quantidade e qualidade de água nas bacias de São Domingos e Ribeira Seca, procedeu-se, numa primeira fase ao inventário dos principais pontos de água existentes nas bacias casos de estudo, junto do INGRH (Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos) e no campo. Posteriormente, fez-se a avaliação da qualidade dos pontos de água inventariados. Numa fase posterior, selecionou-se a bacia de São Domingos para detalhes das condições sob as quais se desenvolve a agricultura regada. Na bacia, fez-se a recolha de solos e água usados na rega. Nessa seleção pesou a similaridade ambiental e hidroagrícola desta bacia e as demais bacias da região Leste da ilha.

4.5.2. Inventário dos principais pontos de água existentes nas bacias casos de estudo

Com base nos dados de pontos de água de 2007 a 2009 fornecidos pelo INGRH, verificou-se que a bacia hidrográfica de São Domingos conta com 12 nascentes, 31 poços profundos e 115 poços rasos. Destes, apenas 13 poços rasos e 4 nascentes são controlados ou monitorizados pelo INGRH. O potencial bruto dos recursos hídricos subterrâneos, tecnicamente explorável, foi estimado, em média, em $3.2 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, e o volume médio anual explorado atualmente foi avaliado em $1.76 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, sendo que $1.51 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$ provêm de poços profundos (inclusive poços de Ribeirão Chiqueiro e Praia Baixo) e poços rasos, e $0.25 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$ das nascentes. Não existe qualquer barragem, apesar de o volume do escoamento superficial estar estimado em 5.62 hm^3 em anos chuvosos, como indicado no Quadro 4.10.

Relativamente à bacia hidrográfica de Ribeira Seca, a mesma base de dados evidenciou que existem 115 nascentes, 41 poços profundos e 114 poços rasos. Destes apenas 12 poços rasos e 19 poços profundos são monitorizados pelo INGRH. O potencial bruto médio anual dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais tecnicamente exploráveis nesta bacia, foi estimado em $7.8 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, e o volume médio anual explorado atualmente está avaliado em $6.4 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, sendo que $2.3 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$ provêm de poços profundos e poços rasos, $3.4 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, das nascentes e $0.7 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, da barragem de Poilão (com a capacidade de armazenamento de 1.2 hm^3 dimensionada para satisfazer a procura para rega com a garantia de 85%). Como indicado no Quadro 4.10, em anos chuvosos estima-se que o escoamento na bacia de Poilão ronde 6.6 hm^3 .

4.5.3. Avaliação da qualidade dos pontos de água inventariados

A condutividade elétrica quantifica a capacidade de um meio para conduzir uma corrente elétrica, sendo expressa em miliohms por centímetro (mho cm^{-1}) ou deciSiemens por metro (dS m^{-1}), unidades numericamente equivalentes.

A condutividade elétrica é comumente usada como uma medida da concentração total de sais dissolvidos de uma amostra aquosa, embora também seja afetada pela temperatura da amostra e pela mobilidade, valência e concentração relativa dos iões contidos na solução. A temperatura padrão para medição é de 25°C .

Nos casos de estudo, os maiores valores de *EC* ocorrem nas *AEZ V* (zona de intensa atividade agrícola – regadio) e os menores valores nas zonas *AEZ IV* e *III*.

Do total dos pontos de água existentes nessas duas bacias foram selecionados para a investigação por nós levado a cabo apenas os constantes no Quadro 16.A2 do Anexo II. O caudal total mensal explorado é de 58 t mês^{-1} (São Domingos) e de 65 t mês^{-1} (Ribeira Seca).

Verifica-se ainda que nem todos os pontos de água localizados na *AEZ V* estão salinizados. Alguns pontos de água sujeitos a maior exploração, atualmente, têm *EC_w* baixos. No entanto, os poços profundos, por produzirem água de melhor qualidade, estão em risco devido à sua sobre-exploração. Os poços profundos menos explorados ou abandonados, são aqueles que agora produzem água salobra, com elevados teores salinos ($7.0\text{-}10.0 \text{ dS m}^{-1}$). São estes os casos de Jarracunda I, Ribeira Seca e Praia Baixo.

4.5.4. Análise das condições ambientais sob as quais se desenvolve a agricultura regada em São Domingos

Tendo em conta os constrangimentos ambientais nas bacias da zona Leste da Ilha de Santiago e desejando maior rigor na compreensão da situação hidroagrícola das bacias casos de estudo, fez-se na região hidrográfica de São Domingos a análise dos principais pontos de água e dos solos regados.

As amostras de água foram recolhidas em frascos de 1 litro, tendo-se obtido duas amostras por cada ponto de água. A Figura 4.20 contém a localização esquemática desses pontos.

Considerando os riscos de salinidades dos solos regados, procedeu-se também à análise dos solos nas três zonas mais próximas do litoral (Praia Formosa, Achada Baleia e Baía) onde na rega se utiliza água de má qualidade (Figura 4.20).

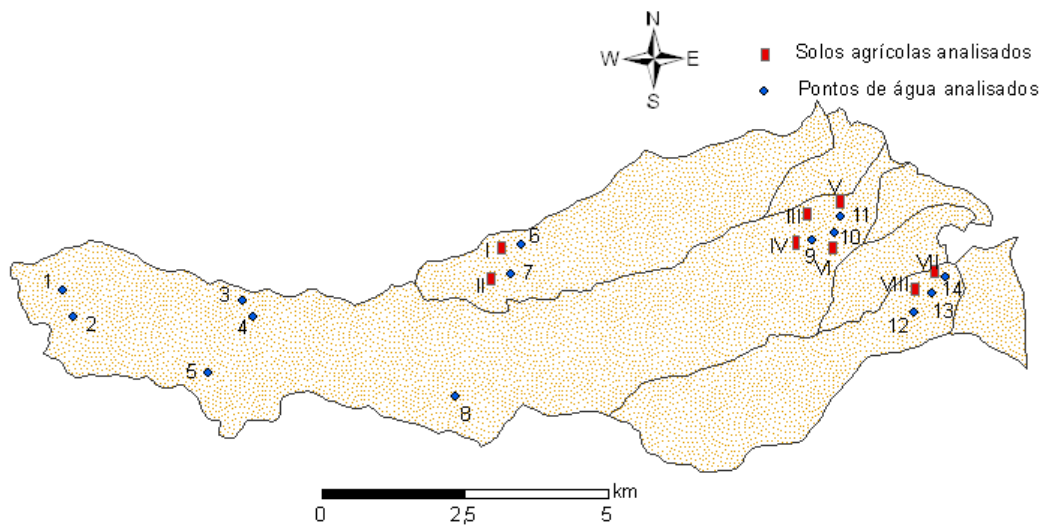


Figura 4.20: Distribuição espacial dos principais pontos de água e de solos analisados na região hidrográfica de São Domingos.

As amostras de solos foram obtidas em parcelas de regadio, tendo-se recolhido duas amostras por ponto, às profundidades de 20 e de 40 cm. A massa de cada amostra perturbada foi de aproximadamente 500 g. Tais amostras foram acondicionadas em sacos de plásticos, etiquetadas e encaminhadas para fins de análise química. Tanto as amostras de solos, como as de águas foram analisadas na DGASP/DSER. A análise constituiu essencialmente na determinação da condutividade elétrica (EC) e pH .

Recorrendo ainda aos dados do INGRH, relativos à condutividade elétrica, EC_w , ao volume/caudal explorado e ao número de horas de bombagem ($h\ dia^{-1}$), determinaram-se os valores médios apresentados no Quadro 4.12, bem como as classes de salinidade e respetivas classificações. Confirma-se, de facto, que com o aproximar da zona costeira, I/IV, a EC_w relativo a água subterrânea aumenta. Maiores valores de EC_w verificam-se nas áreas onde a agricultura regada é mais intensa (Achada baleia e Baía).

Quadro 4.12: Resultado das análises dos principais pontos de água usados na rega da bacia de São Domingos – pH e EC.

Zona	Rui Vaz	Rui Vaz	Água de Gato	Água de Gato	Lagoa	Praia Formosa	Praia Formosa	Portal	Achada Baleia	Achada Baleia	Achada Baleia	Baía	Baía	Baía
Pontos de água	Poço profundo	Água reservatório de dique	Nascente	Galeria	Nascente	Poço 1	Água reservatório de dique	Poço 2	Poço profundo FT 26, 25,40 ,42	Poço 3	Poço 4	Poço profundo (FT44)	Poço 5	Poço 6
AEZ	IV	IV	III	III	III/IV	II	II	II	IV	IV	IV	IV	IV	IV
Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
EC _w ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	405	716	515	449	439	1277	961	1190	1454	5200	13070	4485	6160	7260
pH	8.45	8.81	7.18	8.25	8.26	7.03	8.84	7.6	8.09	7.61	7.61	8.18	7.23	7.2
Classe de salinidade	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₂	C ₂	C ₂	C ₂	C ₄	C ₄	C ₃	C ₄	C ₄

Classificação da água de irrigação quanto ao risco de salinidade. Frenkel (1984) e Pizarro (1985). C₁ - Baixo risco de salinidade <750; C₂ - Baixo risco de salinidade, Médio: 750 – 1500; C₃ - Baixo risco de salinidade, Alto: 1500 – 3000; C₄ - Baixo risco de salinidade, Muito alto >3000.

O Quadro 4.12 mostra que a qualidade da água usada na rega implica alto a muito alto risco em termos de salinidade de solos. Verifica-se ainda que a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo é mais elevada nos terrenos baldios, ou seja terrenos que foram abandonados por causa da salinização (Quadro 4.13).

Para avaliar e classificar os solos agrícolas salinizados, considerou-se o método proposto por Frenkel (1984) e Pizarro (1985). Os resultados de tais análises resumem-se no Quadro 4.13.

Quadro 4.13: Resultado das análises dos solos das AEZ I/IV da bacia de São Domingos – pH e EC.

Nº	I	II	III	IV		V	VI	VII					VIII	
	Praia Formosa	Praia Formosa	Achada Baleia	Achada Baleia	Achada Baleia	Achada Baleia	Achada Baleia	Baía	Baía	Baía	Baía	Baía	Baía	
Cultura	Milho e feijão	Quiabo	Pimentão	Várias culturas	Várias culturas	Tomate	Baldio	Baldio	Cebola	Pepino	Baldio	Tomate	Canas-de-açúcar	
Solo analisado (0-20 cm)	EC _e ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	111	109	1034	233	247	246	827	2067	615	996	3365	631	710
	pH	7.21	8.23	8.01	8.04	8.48	8.42	7.81	7.12	7.42	8.57	8.07	8.21	7.97
Solo analisado (20-40 cm)	EC _e ($\mu\text{s/cm}$)	185	56	742	175	753	547	1801	2920	487	677	5863	665	286
	pH	7.14	8.11	8.12	8.45	8.48	8.2	7.74	8.62	8.65	8.97	8.19	8.45	8.19

Obs: o sistema de rega praticado é gota-a-gota com exceção da praia formosa em que não se faz rega

Alguns solos regados e pontos de água na AEZ V estão em bom estado, em termos de qualidade, enquanto outros vão sendo salinizados e abandonados, progressivamente. Os pontos de água situados nas AEZ V, próximas da zona costeira, são vulneráveis à intrusão salina por estarem: i) implantados na parte terminal dos vales aluvionares de elevada transmissibilidade; ii) sujeitos a cada vez mais horas de bombagem, superiores aos valores correspondentes aos volumes de recarga dos aquíferos; iii) sujeitos à pressão de uma população crescente e uma agricultura ainda muito tradicional. Tais circunstâncias conduzem ao incremento da intrusão salina, contaminando progressivamente as reservas

subterrâneas e comprometendo o desenvolvimento hidroagrícola da região Leste, a mais produtiva da Ilha de Santiago. Portanto, nota-se que nem todos os solos e água analisados proporcionam condições ideais para produção agrícola.

4.6. Prosseguimento do estudo. Breve justificação

Até ao Capítulo 4 todos os estudos relativos à análise e ao tratamento de dados, climáticos, pedológicos e físico-ambientais das bacias casos de estudo (São Domingos e da Ribeira Reça) foram desenvolvidos no sentido de uma mais ampla caracterização de duas das mais importantes bacias agrícolas da Ilha de Santiago.

Constatou-se que em termos ambientais as bacias têm muitas características comuns, tanto em termos de vulnerabilidades (intrusão salina, sobre-exploração dos recursos, limitação de áreas agrícolas, escassez de precipitação, secas agrícolas e secas de gestão, etc.), como em termos de potencialidades (vocação agrícola, água subterrânea e vales férteis no litoral, benefícios dos ventos alísios favoráveis ao desenvolvimento de agricultura, presença de microclimas favoráveis na zona de altitude, boa potencialidade para agricultura de sequeiro.).

Apesar de tais similaridades, verifica-se que as consequências da seca agrícola na zona de jusante da bacia de Ribeira Seca têm sido minoradas dado o aumento do armazenamento de água proporcionado pela barragem de Poilão, situação que, contudo, constitui a exceção e não a regra em Cabo Verde. Com efeito, a maioria das restantes bacias hidrográficas da ilha enfrentam constrangimentos hidroagrícolas similares aos que ocorrem em São Domingos e nas zonas do interior montanhoso da bacia de Ribeira Seca.

Por tal motivo a bacia de São Domingos é, de facto, mais representativa das condições hidroagrícolas ocorrentes, razão pelo qual foi a adotada para desenvolver os estudos objeto dos capítulos subsequentes, referentes à rega (Capítulo 5), à produtividade da água nas condições de seca severa e extrema (Capítulo 6) e aos riscos associados à produção naquelas condições de escassez hídrica (Capítulo 7). Os resultados dos estudos na bacia hidrográfica de São Domingos e as recomendações que suscitam darão respostas e eventualmente propostas de intervenção (modelo-GRHA) aplicáveis a outras bacias em ambientes similares.

Para efetivar os estudos na bacia de São Domingos foi necessário realizar de 2009 a 2011 um amplo conjunto de trabalhos de campo que compreenderam a aquisição de dados de cultura e de solos, a avaliação dos sistemas de microrrega e dos calendários de rega implementados, inventários dos pontos de água (caudais que proporcionam e qualidade da água), reconhecimento das produções agrícolas e dos preços praticados, entrevistas aos agricultores, etc. Os resultados assim obtidos foram essenciais ao desenvolvimento da investigação objectos dos restantes capítulos desta tese.