



EPISÓDIOS DE RECARGA NO SISTEMA AQUÍFERO QUELO – LUANDA

Gabriel LUIS MIGUEL¹, Luis F. REBOLLO FERREIRO², Miguel MARTIN - LOECHES³

1. Universidade Agostinho Neto- Faculdade de Ciências – Departamento de Geologia, Avenida 4 de Fevereiro 74- Luanda
gabriel.luismiguel@uan.co.ao

2. Universidade de Alcalá de Henares – Faculdade de Ciências Ambientais, Campus Universitário- Alcalá de Henares
Luis.rebollo@uah.es

3. Universidade de Alcalá de Henares – Faculdade de Ciências Ambientais, Campus Universitário- Alcalá de Henares,
martin-loeches@uah.es

RESUMO

Os estudos realizados no sistema aquífero Quelo – Luanda, permitiram entender as questões relacionadas com as recargas no referido sistema aquífero e facilitar informações técnico-científicas importantes no que tangue a gestão sustentável dos recursos hídricos de Luanda e Arredores.

Para realização dos estudos acima referenciados, os dados de precipitação utilizados correspondem a uma série de observações meteorológicas de quarenta e dois anos, entre 1961/1962 e 2002/2003.

Nos histogramas de precipitação da série de 42 anos, pode ser observada uma expressiva irregularidade na distribuição interanual das precipitações, que, juntamente com a forte sazonalidade das mesmas - de natureza intra-anual, torna a gestão dos recursos hídricos mais complicada do que em outros lugares.

A precipitação média da série completa é de 367,3 mm / ano, embora a representatividade desses dados seja limitada, uma vez que, como acabamos de mencionar, há uma grande irregularidade no regime das precipitações que prevalece na região. Assim, os dados analisados mostram que o ano hidrológico com maior precipitação registado corresponde a 1983/1984, com 898,1 mm (cerca de 2,5 vezes maior que o valor médio da série), enquanto o ano hidrológico mais seco, a de 1977/1978, a precipitação registrada foi de 49,1 mm (7,5 vezes menor que a média pluviométrica da série considerada).

Tão extremamente irregular é a precipitação da região que, nos 42 anos considerados, encontramos doze deles que superam a precipitação média da série em mais de 25%, e quatro deles (os anos hidrológicos 1968/1969, 1983/1984, 1994/1995 e 1995/1996) com valores de precipitação próximos ou superiores ao dobro da média da série ($P_a > P_m + 75\%$; isto é, $P_a > 642,7$ mm / ano). Além disso, outros catorze anos registraram chuvas significativamente abaixo da média; três deles (os anos hidrológicos 1963/1964, 1977/1978 e 1991/1992) mostram valores de precipitação abaixo de 25% da média da série ($P_a < P_m - 75\%$; isto é, $P_a < 91,8$ mm / ano).

Apenas 16 dos 42 anos (38% destes) que incluem o período para o qual temos dados meteorológicos podem ser considerados normais ou “regulares”, aceitando para esta qualificação uma dispersão de 25% da precipitação média anual ($P_m + 25\% > P_a > P_m - 25\%$) tendo em conta esta notável irregularidade, é lógico esperar uma disponibilidade variável de água para a potencial recarga do sistema aquífero através da infiltração natural no solo, como será discutido mais adiante.

O Balço hídrico do solo, permitiu diferenciar da série dos 42 anos estudada, a produção de excedentes apenas para os meses de Março e Abril do ano “húmido”, com valores de 134,2 mm e 201mm respectivamente, totalizando 335,2mm para os dois meses.

A infiltração eficaz calculada corresponde a 249,0mm e a recarga no sistema aquífero Quelo-Luanda em anos especialmente húmidos, como o mencionado, é de cerca de 475 hm³ / ano, fenómeno que acontece em cada cada 10 anos.

Palavras-Chave: episódio; recarga; sistema-aquífer; Quelo-Luanda



1. INTRODUÇÃO

Luanda não tinha uma grande tradição no uso das águas subterrâneas, apesar das primeiras captações de águas subterrâneas na área possuírem registo entre 1641 e 1648, como os poços da "Maianga do Rey" e "Maianga do Povo" (Lobo Cardoso, 1950), mas é efectivamente na década dos 80 que as águas subterrâneas de Luanda e Arredores começam a ter uma grande expressão no complemento de águas a cidade de Luanda e Arredores, devido a insuficiência na cobertura destes serviços para os diferentes usos.

A prospecção e captação de águas subterrâneas começa a atingir magnitudes consideráveis nos anos 90 e com a agravante de naquele momento não existirem estudos hidrogeológicos da área.

Questões referentes a caracterização do referido aquífero, desafiaram-nos a desenvolver uma linha de investigação para dar resposta a problemática hidrogeológica de Luanda e Arredores.

Com o apoio da então Agência Espanhola de Cooperação Internacional, actual Agência Espanhola de Cooperação Internacional e Desenvolvimento, foi possível a obtenção de uma Bolsa a nível de Doutoramento que permitiu a Caracterização Hidrogeológica e Ambiental de Luanda e Arredores, tendo desde então sido atribuído ao referido aquífero, o nome de Sistema aquífero Quelo- Luanda, meio hidrogeológico limitado entre o rio Kwanza e Bengo e constituído essencialmente pelas formações geológicas detríticas denominados por Quelo, Luanda e Cacuaco e tendo como base impermeável a formação Quifangondo.

Esta comunicação apresenta de forma resumida as metodologias utilizadas e os principais resultados obtidos durante o trabalho referente a "Caracterização Hidrogeológica e Ambiental de Luanda e Arredores", centraremos nossa abordagem nos resultados concernentes a análise estatística simples de alguns parâmetros que constituem o clima (precipitação e a temperatura), da área estudada, série hidrológica de 42 anos (1961/1962 a 2002/2003) e através destes discutiremos sobre os episódios de recarga no sistema aquífero Quelo- Luanda, fenómenos identificados ao longo dos trabalhos realizados.

2. ENQUADRAMENTO

A área de estudo localiza-se em Luanda e arredores (Angola) e está limitada entre os paralelos 8° 45' S e 9° 21' S, e entre os meridianos 13° 00' E e 13° 38' E. O valor de precipitação média é de 360 - 380 mm/ano, com temperaturas médias anuais de 26-27°C e humidade relativa entre 80-82%. O clima da região é tropical quente e seco.

As recargas provenientes das precipitações em aquíferos situados em regiões áridas e semi-áridas têm sido objecto de estudos em diferentes latitudes do planeta, por formas a conhecer as dinâmicas dos fluxos subterrâneos nestas regiões e facilitar informações técnico-científicas que permitam uma gestão mais sustentável das águas subterrâneas. Para o sistema aquífero Quelo - Luanda, o estudo reveste de capital importância devido a lacuna de informação no que tange a hidrogeologia da referida área.

3. HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO QUELO-LUANDA

O sistema aquífero Quelo-Luanda é constituído pelas formações Quelo, Luanda e Cacuaço. A grande extensão da formação Quelo e a considerável magnitude da espessura da formação Luanda, comparados com a formação Cacuaço, são os factores pelos quais atribuímos ao sistema aquífero investigado o nome de Quelo-Luanda. Situadas na bacia sedimentar do Kwanza, estas formações possuem um marcado carácter detrítico; apesar da presença recorrente de argilas na formação Luanda, os sedimentos arenosos são os que mais predominam. A formação Cacuaço está representada por calcarenitos bioclásticos, constituindo corpos lenticulares essencialmente maciços, embora estejam presentes também níveis descontínuos de calcários. Os resultados das análises granulométricas realizadas em amostras representativas da formação Quelo recolhidas na zona do Lukembo (Quenguela Norte), indicam que 72,5% dos clastos são de tamanho areia, 19% argilas e os restantes 8,5% limos. Valores semelhantes obteve Soares de Carvalho (1957), em amostragem realizada em dez pontos da formação Quelo, onde descreve para as areias percentagens superiores a 80%, de 8 a 15% são argilas e finalmente de 1 a 5% limos. Torcuato & Rocha (1969) numa amostra do Quelo recolhida no Morro da Samba, descreve simplesmente o valor de 71,8% como correspondente a fração arenosa. Os valores de permeabilidade, que obtivemos nos ensaios de laboratório situam para o Quelo intervalos entre 0,04 a 6,3 m/d, entretanto nos ensaios de laboratório e de bombeamento “in situ” as formações Luanda e Cacuaço estão em intervalos de 0,02 a 50 m/d (correspondentes a profundidades máximas de cerca de 180 metros). O sistema aquífero Quelo-Luanda é limitado em profundidade pela formação Quifangondo, constituída litologicamente por argilas e margas, intercaladas por níveis centimétricos de calcários, pelo menos na sua parte superior. Os valores de permeabilidade obtidos em ensaios de laboratório variam entre 0,0008 a 0,002 m/d. Eles demonstram claramente que o Quifangondo constitui um nível de base de baixíssima permeabilidade em relação às águas subterrâneas, que ficariam armazenadas e em circulação no seio das formações superiores. A espessura do sistema varia de 0-500 metros (Figura 1, perfil geológico) e o intervalo de idades atribuídas ao sistema é de Miocénico inferior ao Pleistocénico (Miguel, 2006).

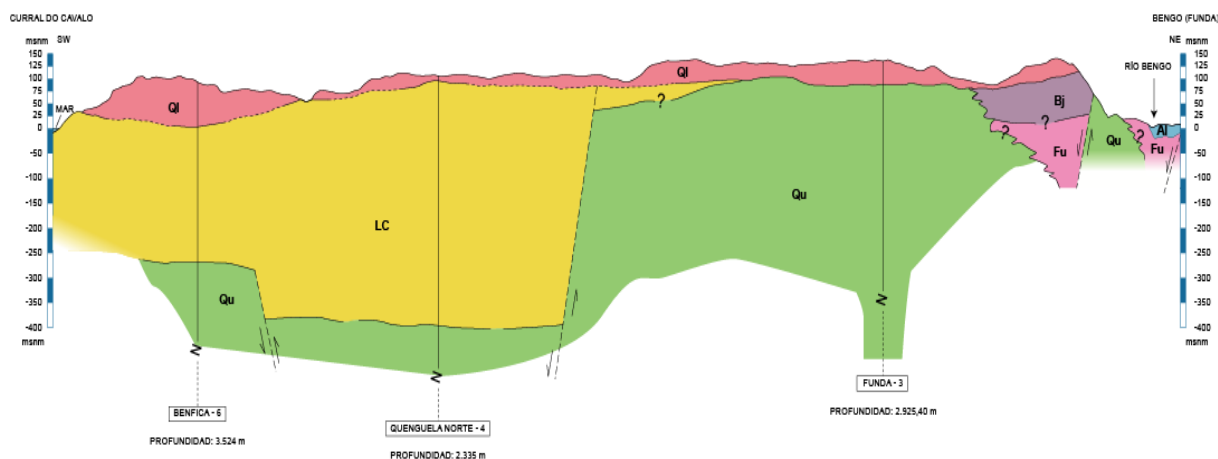


Fig. 1. Perfil geológico com a espessura máxima (500 metros) do sistema aquífero Quelo-Luanda.

O valor médio da profundidade dos níveis piezométricos é de 60 metros, superando em alguns casos os 100 metros. Paralelamente aos níveis regionais de piezometria, existem níveis suspensos, que se localizam nas formações Quelo e Luanda, (observar perfil hidrogeológico da Figura 2A e no respectivo mapa hidrogeológico da Figura 2). Os fluxos subterrâneos são em geral de sentido E-W, excluindo as zonas de recarga do Quenguela Norte e do Curral do Cavalo, onde os mesmos são radiais e centrífugos, correspondendo principalmente a dois sentidos (E-W e W-E) a partir da linha divisória de águas subterrâneas nestas zonas. Os valores dos gradientes hidráulicos calculados em quatro zonas mais representativas na área de estudo, suas respectivas velocidades reais e tempos de chegadas, são descritas na Tabela 1. Foram utilizadas para os cálculos valores de Porosidade Eficaz (me) de 36% a 10%, Variação da altura piezométrica (ΔH) de 7,5 m, e de Permeabilidade (K) de 2 m/d.

4. AVALIAÇÃO DA RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO QUELO-LUANDA

Após uma breve revisão dos principais componentes do ciclo hidrológico na área de estudo, é feita uma estimativa da recarga do sistema aquífero a partir da infiltração de água da chuva.

4.1. O ciclo da água

Como é bem sabido, o ciclo da água é uma sequência de fenômenos de circulação e transferência contínua de água na natureza, mantida pela energia do sol e pela força da gravidade da Terra. Sua esquematização facilita a compreensão da dinâmica e dos processos que a compõem.

Nos modelos genéricos que descrevem o ciclo da água, observam-se que uma parte da água precipitada sobre a superfície da Terra se evapotranspira (ou evapora), outra escorre superficialmente (nos rios, mares e lagos), enquanto a outra parte se infiltra recargando os aquíferos.

Na área de estudo, realizamos vários cálculos para estabelecer o balanço hídrico do solo e, através dele, conhecer as quantidades que participam dos diferentes processos do ciclo hidrológico.

4.2. Precipitação

Quando a água, em estado líquido ou sólido, atinge a superfície do solo proveniente da atmosfera, diz-se que precipitou.

Um dos principais componentes do ciclo hidrológico é a precipitação. Sua distribuição, tanto no espaço como no tempo, é altamente variável. De acordo com os fenômenos meteorológicos que os originam, ou os acompanham, existem três tipos básicos de precipitação: as convectivas (causados pelo aquecimento das massas de ar próximas à superfície de um solo que recebeu uma forte insolação), a frontal ou ciclônicas (originário da superfície de contato de massas de ar – frente- com diferentes temperaturas e humidade) e chuvas orográficas ou de relevo (típicas de áreas montanhosas, devido ao resfriamento e conseqüente condensação de vapor de água nas massas de ar que ao embaterem num declive ascendem por ela). A precipitação em geral será causada por combinações de dois dos tipos anteriores ou dos três (Custodio & Llamas, 1983).

Para a área de estudo, os dados de precipitação utilizados correspondem a uma série de observações meteorológicas de quarenta e dois anos, entre 1961/1962 e 2002/2003.

No histograma de precipitação preparado para as séries estudadas (Figura 2), pode ser observada uma expressiva irregularidade na distribuição interanual das chuvas, que, juntamente com a forte sazonalidade das chuvas - de natureza intra-anual dos arredores de Luanda, torna a gestão dos recursos hídricos mais complicada do que em outros lugares.

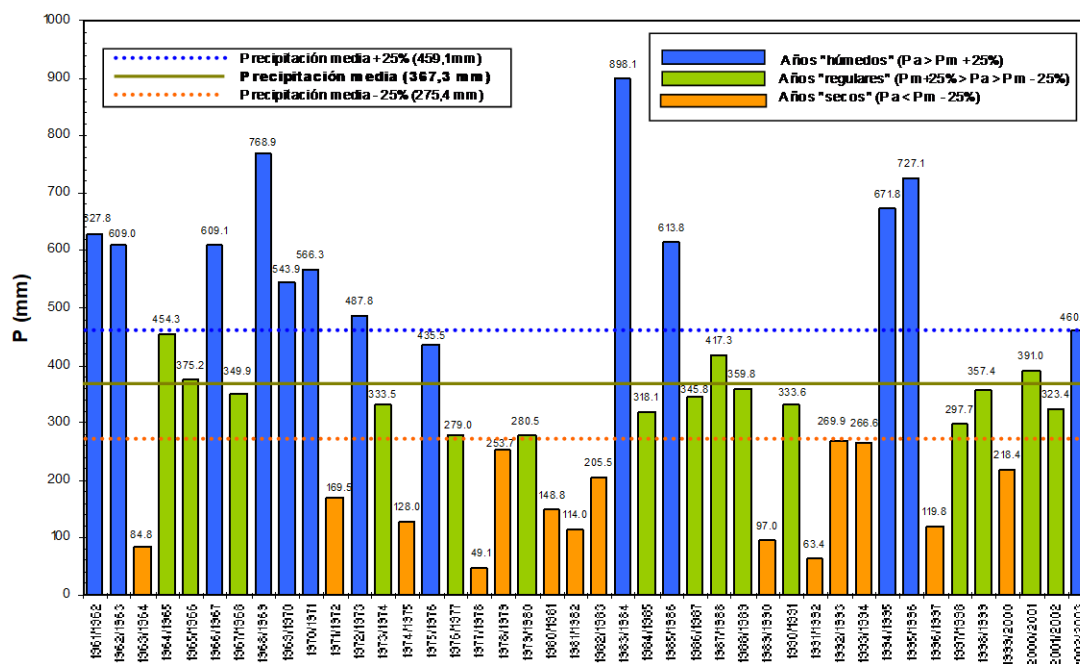


Fig. 2. Histograma de precipitações anuais registradas na estação termopluviométrica “Cidade Alta” de Luanda (anos 1961/1962 a 2002/2003)

A precipitação média da série completa é de 367,3 mm / ano, embora a representatividade desses dados seja limitada, uma vez que, como acabamos de mencionar, há uma grande irregularidade no regime de chuvas que prevalece na região. Assim, os dados analisados mostram que o ano hidrológico com maior precipitação corresponde a 1983/1984, com 898,1 mm registrados (cerca de 2,5 vezes maior que o valor médio da série), enquanto o ano hidrológico mais seco, a de 1977/1978, a precipitação registrada foi de 49,1 mm (7,5 vezes menor que a média pluviométrica da série considerada) (Figura 2).

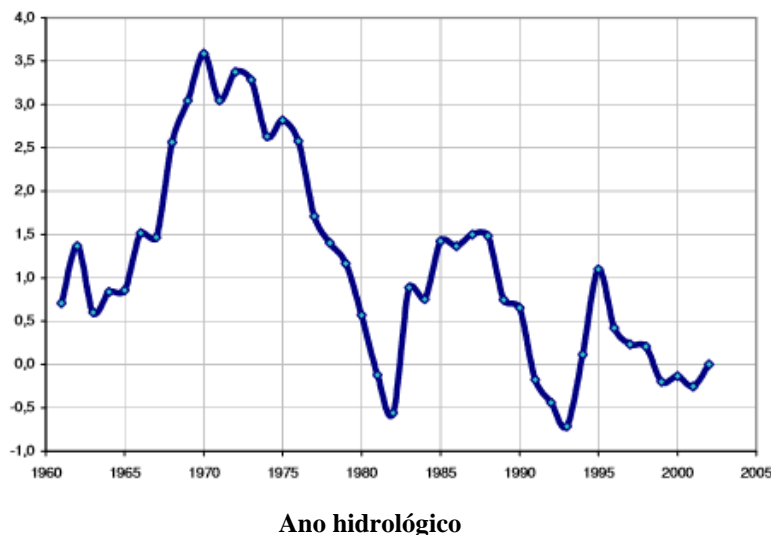
Tão extremamente irregular é a precipitação da região que, nos 42 anos considerados, encontramos doze deles que superam a precipitação média da série em mais de 25%, e quatro deles (os anos hidrológicos 1968/1969, 1983/1984, 1994/1995 e 1995/1996) com valores de precipitação próximos ou superiores ao dobro da média da série ($P_a > P_m + 75\%$; isto é, $P_a > 642,7$ mm / ano). Além disso, outros catorze anos registraram precipitações significativamente abaixo da média; três deles (os anos hidrológicos 1963/1964, 1977/1978 e 1991/1992) mostram valores de precipitação abaixo de 25% da média da série ($P_a < P_m - 75\%$; isto é, $P_a < 91,8$ mm / ano).

Apenas 16 dos 42 anos (38% destes) que incluem o período para o qual temos dados meteorológicos podem ser considerados normais ou “regulares”, aceitando para esta qualificação uma dispersão de 25% da precipitação média anual ($P_m + 25\% > P_a > P_m - 25\%$). Consoante esta irregularidade notável, é lógico esperar uma disponibilidade variável de água para a potencial recarga do sistema aquífero através da infiltração natural no solo, como será discutido mais adiante.

Das medidas de dispersão para variáveis, usadas na estatística descritiva, o desvio padrão (uma medida de heterogeneidade, que nos diz quanto os dados médios tendem a afastar-se da média) é geralmente muito útil. Para a série estudada, a grande variação entre os valores medidos descritos acima fornece, como esperado, um valor de desvio padrão altíssimo (206,3 mm).

A fim de estabelecer sequências climáticas húmidas e secas, calculamos o desvio cumulativo da precipitação anual em relação à média das séries consideradas (Figura 3), o que nos permitiu reconhecer três ciclos de seca (o mais longo entre 1970) / 1971 e 1982/1983) e muitos outros de humidade notável nesse período (Miguel,2003).

Fig. 3. Curva de desviação unitária acumulada das precipitações anuais registadas na estação termopluviométrica “Cidade Alta” de Luanda (anos 1961/1962 a 2002/2003)



Estas sequências observadas e os valores absolutos de precipitação registrados a cada ano foram muito úteis para o estabelecimento do balanço hídrico no solo, o qual analisaremos no ponto 3.4, uma vez que nos permitiram selecionar o chamado “ano húmido”, “ano seco” e “ano regular” como representativo das situações muito variáveis de precipitação que ocorrem em Luanda e arredores. Estes foram 1968/1969 (ano “húmido” característico, com 768,9 mm), 1991/1992 (ano “seco” característico, com 63,4 mm) e 1988/1989 (ano tipicamente “regular” da série, com 359,8 mm, valor semelhante à média do período considerado).

4.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração é um fenómeno microclimático e, conseqüentemente, os métodos utilizados para sua avaliação serão ainda mais válidos, quanto mais eles consideram essas questões. A necessidade de saber, pelo menos, a ordem de grandeza do volume de água evapotranspirada faz com que muitas vezes aceitem os valores deduzidos a partir de fórmulas empíricas que são suportadas pelos dados meteorológicos atualmente disponíveis. Essas fórmulas são usadas especialmente para fazer previsões futuras. Sem incluir os métodos de equilíbrio químico, segundo Custodio & Llamas (1983), os mais aplicados são os métodos baseados na física teórica do microclima (balanço energético, perfis de humidade e velocidade do vento, fluxo turbulento de humidade e fórmulas semi-empíricas ou combinados) ou medições diretas (lisímetros, evapotranspirômetros, parcelas e bacias experimentais, perfis de humidade do solo)

Para a quantificação da evapotranspiração na área de estudo, utilizamos métodos empíricos, como a fórmula de García Benavides e López Díaz (1970) e a mais clássica de Thornthwaite (1948), cujos resultados referentes aos anos “húmido” 1968/1969, “regular” 1988/1989 e “seco” da série de dados de 42 anos, são representados na tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre os valores de ETP, calculdos com as formulas de García Benavides e López Díaz e de Thornthwaite

correspondente	García Benavides & López Díaz		Thornthwaite ETP (mensal) (mm/mês)
	ETP (diária) (mm/día)	ETP (Σ mensal) (mm/mês)	
1968/1969 (ano “húmido”)	Mínimo	Máximo	Valor mensal
Março	3,3	6,7	161,9
Abril	3,1	5,6	141,1
1988/1989 (ano “regular”)	Mínimo	Máximo	
Março	3,9	6,2	162,4
Abril	4,3	6,0	155,8
1991/1992 (ano “seco”)	Mínimo	Máximo	
Março	3,9	6,0	168,0
Abril	4,1	5,7	149,8

4.4. Balanço hídrico do solo

Os balanços hídricos são realizados com o objectivo de quantificar entradas e saídas de água num meio estabelecido, para este caso concreto o solo. Os elementos de partida que configuram o resultado do balanço hídrico do solo são a precipitação, a evapotranspiração e a reserva de humidade no solo, cujas quantidades determinam para essas condições climáticas e edáficas o valor do défice hídrico (diferença entre a evapotranspiração potencial e real) e os excedentes (a água não evapotranspirada). No nosso caso, realizamos diversos cálculos para conhecer de forma aproximada os valores destes excedentes (supondo que se geram), como parte da precipitação responsável pela geração de escorrência superficial e/o da infiltração que se produz na zona.

Os métodos elegidos para realização dos balanços são os estabelecidos por Thornthwaite e Matter (Martínez de Azagra & Navarro, 1996) e por García Benavides & López Díaz (op.cit.). N realidade este último método esta

desenhado originalmente para o cálculo da evapotranspiração potencial; ao ser utilizado para o cálculo do balanço hídrico do solo, a determinação do valor da evapotranspiração real pode ser efectuada a partir da mesma aplicando o mesmo pressuposto que outros métodos clássicos para este tipo de balanços.

Thornthwaite e Matter permitem estimar a quantidade da evapotranspiração real (ETR) a partir dos dados da evapotranspiração potencial (ETP) e da precipitação (P). Considerando a quantidade de água que o solo é capaz de reter nos seus poros, pode-se calcular que parte das precipitações são excedentes ou que quantidade de água é demandada pela vegetação uma vez esgotadas as reservas, em função da quantidade da evapotranspiração potencial.

Os valores da ETP calculam-se mediante algumas fórmulas empíricas (Thornthwaite, Blaney-Cridde, Turc, Penman ou outras disponíveis); no nosso caso aplicamos as fórmulas de Thornthwaite (Custodio & Llamas, 1983), assumindo o erro que pode derivar-se da sua aplicação no hemisfério sul (já que a região de estudo localiza-se em torno dos 9º de latitude sul) e , a modo comparativo, a de García Benavides e López Díaz (fórmula adaptada a faixa intertropical de latitude 15º N a 15º S). Tona-se necessário assinalar, não obstante, que alguns autores discutem a aplicabilidade do método de Thornthwaite para o cálculo da ETP em regiões tropicais (por exemplo García Benavides & López Díaz, op.cit), já que os valores dele resultante não casam com a humidade medida nos solos.



14. SILUSBA

Os balanços elaborados pelo método de Thornthwaite realizam-se mensalmente e os elaborados por García Benavides e López Díaz, são diariamente. Para ambos casos consideraram-se a mesma selecção de anos hidrológicos representativos: 1968/1969 (ano “húmido”), 1988/1989 (ano “regular”) e 1991/ 1992 (ano “seco”). Teve-se em consideração o valor da capacidade máxima de retenção de água no solo de 90 mm. Este valor obteve-se a partir da constatação de que são as gramíneas típicas de clima tropical seco as plantas herbáceas que mais abundam na região e determinam a espessura média dos solos, segundo a sua profundidade radicular, e os imbondeiros (baobabs) – *Adansonia digitata*, as árvores mais características da zona, embora cobrindo uma superfície muito menor do que a do estrato herbáceo. Segundo Clavero & Urdaneta (1997), os 75% da massa radicular das gramíneas de tipo *Pennisetum purpureum* CV Mott), muito frequentes no trópico seco da Venezuela, se concentra nos primeiros 30 cm do solo (assemelhando-se as existentes em Luanda e arredores), alcançando os sistemas radiculares dos imbondeiros adultos uma profundidade média de 2 m (ICUC, 2002). Assim, um valor intermédio de espessura da franja submetida a evapotranspiração de 60 cm parece ser razoavelmente representativo das condições médias da maior parte da zona de estudo. O cálculo em mm de água utilizável pelas plantas realiza-se sobretudo considerando que os solos que se desenvolvem nas formações Quelo - a mais extensa na área de estudo- e Luanda possuem uma densidade aparente média de 1,5 g/cm³ (conforme indicam os dados médios obtidos no laboratório para as amostras de ambas unidades) e que sua capacidade de campo é de 14% e seu ponto de murcha permanente de 4%, conforme aos dados tabulados em função da textura (por exemplo, em Altadex Land, 2006); estes valores encaixam perfeitamente com as estimações de Sanders (1998) sobre porosidade total e eficaz para este tipo de materiais. Dito cálculo se expressa no quadro abaixo:

<p>Volume de 1 m² deste solo = 1 m² x 0,6m = 0,6 m³ = 600 dm³ Massa do solo de 1m² = volume x densidade = 600 dm³ x 1,5 kg/dm³ = 900 kg Água utilizável pelas plantas = 14% - 4% = 10% = 0,1 Água útil para as plantas em 1m² do solo = 900 kg x 0,1 = 90 litros/m²= 90 mm</p>
--

Utilizando o valor de 90 mm de retenção máxima de água no solo, obtido no cálculo anterior, para os anos hidrológicos “seco” (1991/1992) e “regular” (1988/1989), e considerando as unidades de tempo mensalmente, o montante da ETP é maior em todos os momentos do que a precipitação, pelo que não há excedentes. O regime de água para qualquer mês do ano é, portanto, deficiente, com um défice máximo em Fevereiro de 1991/1992 de 139,9 mm, com valores de precipitação de 0,8 mm - meses com temperaturas médias de 27,4 °. C- e mínimo em Novembro de 1988/1989 e igual a 31,7 mm - coincidindo com os valores de precipitação de 82,8 mm. Para o ano hidrológico “húmido” 1968/1969, a precipitação nos meses de Março e Abril (361,4 e 319,2 mm, respectivamente) é claramente maior do que o valor do ETP (137,2 e 117,8 mm), gerando para estes meses superávits de 134,2 e 201,4 mm, respectivamente. (Tabela 2). A conclusão mais clara que podemos obter destes resultados é que apenas em anos húmidos ou muito húmidos podem ser dados meses excedentários e a recarga do sistema Quelo-Luanda seria possível devido à infiltração da água da chuva. Uma conclusão semelhante é obtida a partir do cálculo da ETP utilizando a fórmula de García Benavides e López Díaz, para os três anos-padrão. De facto, para os anos “regular” e “seco”, nenhum excedente é registado em nenhum dos dias. Apenas no ano “húmido” de 1968/1969, há alguns dias com excedentes. A existência de excedentes não nos fornece qualquer informação quantitativa sobre a infiltração de água em aquíferos, excepto que este volume representa a máxima recarga subterrânea potencial da chuva. Precisamos saber a quantidade de escoamento superficial, por diferença com os excedentes no solo. Um método muito frequente para obter esses dados é a análise dos hidrogramas dos rios que drenam as bacias que estão sendo estudadas, mas em Luanda não há rede de estações de capacidade nos córregos próximos; Não existem ainda estações nos principais campos, o Bengo e o Kwanza. Isto implica que é necessário recorrer a outros métodos, entre os quais o chamado “número de curva”, cujos resultados permitem relacionar diretamente a precipitação líquida gerada com o evento de precipitação ocorrido. Este tópico é desenvolvido na próxima secção.

Tabela 2. Dados do balanço hídrico do solo para o ano hidrológico “húmido” 1968/1969 (expressado em mm) para um valor de retenção máxima de água no solo de 90mm. ETP calculada segundo Thornthwaite.

Reserva Máxima do solo: 90 mm
a = 3,004

Mês	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago	Total
T (°C)	21,8	23,7	25,2	25	26,2	27,3	27	26,1	25,4	21,4	19,7	19,9	
i	9,29	10,55	11,57	11,44	12,28	13,07	12,85	12,21	11,71	9,04	7,97	8,10	
ETP sem corrig.	75,5	97,0	116,7	113,9	131,2	148,4	143,6	129,7	119,5	71,4	55,7	57,4	
nº dias/mês	30	31	30	31	31	28,3	31	30	31	30	31	31	130,06
nº horas luz	10,9	10,2	11,1	11,5	11	11	11,1	10,9	10,7	10	9,9	10,5	
ETP corrig.	68,6	85,2	107,9	112,8	124,2	128,1	137,2	117,8	110,1	59,5	47,5	51,9	1150,9
P	0,9	1,1	10,9	2,5	5,6	34,9	361,4	319,2	31,4	0,0	0,6	0,4	766,9
ETR	0,9	1,1	10,9	2,5	5,6	34,9	137,2	117,8	110,1	11,3	0,6	0,4	433,3
Défice	67,7	84,1	97,0	110,3	118,6	93,2	0,0	0,0	0,0	48,2	46,9	51,5	717,6
Reser	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	90,0	90,0	11,3	0,0	0,0	0,0	
Excedentes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	134,2	201,4	0,0	0,0	0,0	0,0	335,6

4.5. Escorrência directa e infiltração

Em relação à infiltração da água no solo - e, conseqüentemente, ao escoamento subterrâneo -, o resultado da diferença observada diariamente entre os excedentes obtidos do balanço hídrico e a precipitação efectiva (equivalente ao escoamento superficial será considerado como tal) determinada com o método “número da curva”, proposto pela SCS (Serviço de Conservação do Solo) (em Martínez de Azagra e Navarro, 1996) para cada ocorrência de precipitação registrada. No nosso caso, devemos afirmar que, como não há mais do que registros diários de precipitação, atribuímos a cada aguaceiro uma duração empiricamente estimada em horas, a qual assumimos não distorce a aplicação do dito método. A parte da precipitação que ocorre numa precipitação que gera o escoamento direto é a chamada precipitação líquida (também chamada de precipitação efectiva e excesso de precipitação); o resto, que não gera escoamento superficial, é chamado de abstração (Sánchez San Román, 2005). Para o cálculo da precipitação efectiva, duas fórmulas muito semelhantes podem ser aplicadas, com base nos valores da precipitação total e do limiar de escoamento (P_0). O segundo difere do primeiro no facto de que o escoamento inicial ou limiar de abstração (P_0) é sempre 20% da abstração máxima (S):

[Eq. 1 e 2] Utilizada no cálculo da precipitação efectiva

$$\sum P_{ni} = \frac{(\sum P_i - P_0)^2}{\sum P_i + 4P_0} \quad \sum P_{ni} = \frac{(\sum P_i - 0,2S)^2}{\sum P_i + 0,8S}$$

14.º SILUSBA

onde P_{nt} é a precipitação efectiva a ser calculada e P_t é a precipitação total registado no evento de um aguaceiro ou chuva considerada.

Os valores de abstração inicial (P_0) e a capacidade máxima de abstração do solo (S) são tabulados. Para este trabalho utilizamos as tabelas contidas na Instrução 5.2-IC (MOPU, 1990), preparada para este método. Nestas tabelas é obtido o valor de P_0 , que é uma função das características da bacia ou área em estudo. Observamos, para a superfície do sistema Quelo-Luanda, o seguinte:

- Declive médio inferior a 3%
- Uso da terra “prados, prados e pastagens”.
- 90% de cobertura do solo.
- Tipo de solo predominante tipo "A" (areias finas e médias).

Essas tabelas também consideram a condição inicial de humidade do solo; O método diferencia três condições:

- Condição I: solo seco.
- Condição II: condições de humidade média.
- Condição III: Solo húmido.

Obtém-se assim um valor de P_0 para cada condição de humidade, a qual é introduzida nas fórmulas apresentadas acima para o cálculo da precipitação efectiva com base na precipitação registada em cada aguaceiro. Com esses valores, criamos os gráficos da Figura 4.

Os resultados obtidos na nossa região de estudo mostram que em solos praticamente secos, nenhum escoamento superficial ocorrerá se o evento de precipitação considerado não exceder 119 mm (isto significa que se a precipitação que ocorreu é menor que esse valor, toda a água recebida se infiltrará no solo para compensar o défice de humidade do solo).

Da mesma forma, no caso de solos muito húmidos, a precipitação deve exceder 21 mm e, se estiverem em condições de humidade média, devem exceder 54 mm.

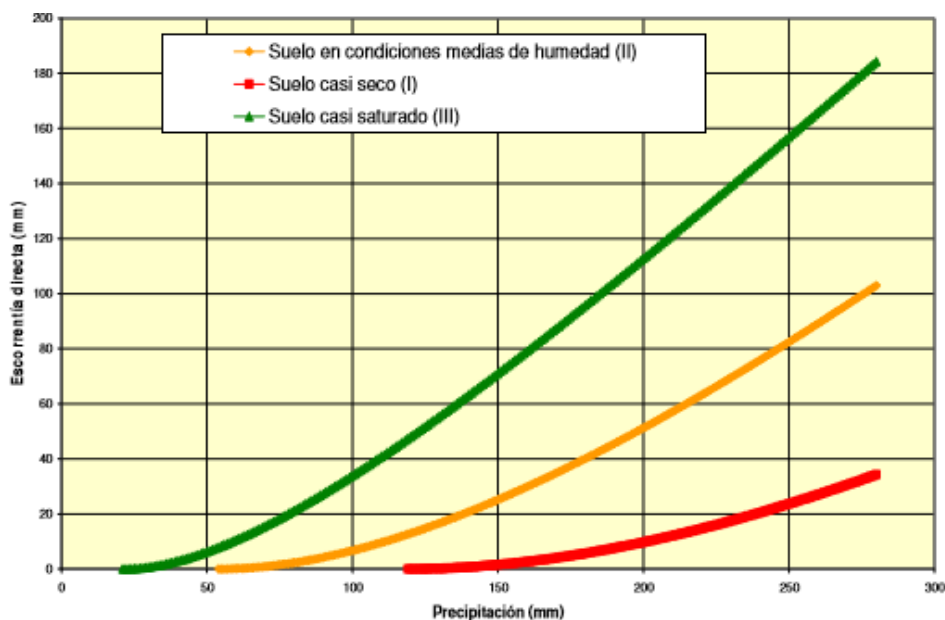


Fig. 4. Gráfico que relaciona a precipitação – escoência para região de Luanda

4.5.1 Cálculo da infiltração

Como observado nos parágrafos anteriores, a parte da precipitação que não gera escoamento direto permanece como retenção de superfície e / ou infiltração; mais tarde, essa água acabará evapotranspirando ou gerando escoamento subterrâneo. Assim, com os valores de precipitação efectiva calculados, podemos estimar a infiltração por diferença destes com os excedentes de água produzidos a cada dia, uma vez que estes resultam quando a evapotranspiração potencial foi totalmente satisfeita e a reserva de água do solo foi completada.

Nos balanços hídricos diários dos anos analisados -1968/1969, 1988/1989 e 1991/1992, mostra-se que apenas no ano "húmido" 1968/1969 existe um dia em que se produz água em excesso, já que nos demais, a baixa precipitação registada, a evapotranspiração de alto potencial e o significativo défice de humidade do solo impedem que "uma gota de água" seja deixada.

Nesse ano excepcionalmente húmido (o segundo mais chuvoso da série de 42 anos considerado, com um total de chuvas registadas de 768,9 mm, que excede o dobro da média anual de chuvas), somente o excedente de água ocorreu em doze dias (14, 15, 16, 17, 20, 21 e 22 de Março e 17, 20, 21, 22 e 30 de Abril), reflectidos no balanço hídrico diário. Para calcular a quantidade de infiltração produzida, é o suficiente subtrair o valor de precipitação efectiva correspondente à precipitação registada em cada dia a partir de cada excedente.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos considerando as três condições de humidade do solo contempladas pelo método. No entanto, para determinar qual dos três valores de precipitação efectiva está correto para cada dia, devemos avaliar as condições de humidade do solo com base na precipitação registada nos dias imediatamente anteriores (Sánchez San Román, 2005). Na Tabela 3 acima mencionada, os valores mais prováveis de precipitação efectiva são destacados com base nessa circunstância observada, tendo em conta que, com excepção do primeiro dia daqueles que tinham excedente hídrico (14 de março de 1969) - no qual a reserva estava vazia -, nos outros dias o solo apresentava condições de alta humidade devido às chuvas ocorridas nos dias anteriores.

Tabela 3. Dados de precipitação efectiva calculados com o método do número de curvas (SCS) para os dias com excedente hídrico do ano hidrológico 1968/1969

Ano "húmido" 1968/1969 Dia	Precipitação registada (mm)	Precipitação Efectiva (mm)		
		Para solo seco ($P_0 = 119$ mm)	Para solo com humidade média ($P_0 = 54$ mm)	Para solo húmido ($P_0 = 54$ mm)
14/03/69	102,4	0,0	7,3	35,5
15/03/69	20	0,0	0,0	0,0
16/03/69	44	0,0	0,0	4,1
17/03/69	19,5	0,0	0,0	0,0
20/03/69	82	0,0	2,6	22,4
21/03/69	13,7	0,0	0,0	0,0
22/03/69	19,4	0,0	0,0	0,0
17/04/69	35,4	0,0	0,0	1,7
20/04/69	58,7	0,0	0,1	10
21/04/69	23,9	0,0	0,0	0,1
22/04/69	5,1	0,0	0,0	0,0
30/04/69	73,2	0,0	1,3	17,3

Estes valores são aqueles que são finalmente subtraídos dos excedentes de água dos dias anteriores. Assim, obtém-se um valor de infiltração efectiva total para o ano de 1968/1969 de cerca de 250 mm, como pode ser observado em detalhe na Tabela 4 e deve ser entendido que este valor só é aplicável a esse ano, excepcionalmente “húmido”

Tabela 4. Dados de infiltração eficaz calculado para área de estudo no ano “húmido” 1968/1969

Dias do mês de Março 1969	14	15	16	17	20	21	22
Precipitação (mm)	102,4	20,0	44,0	19,5	82,0	13,7	19,4
Excedente (mm)	9,1	15,2	40,3	14,9	72,9	9,4	13,9
Precipitação Efectiva (mm)	0	0	4,1	0	22,4	0	0
Excedente - Precipitação Efectiva (mm)	9,1	15,2	36,2	14,9	50,5	9,4	13,9
Infiltração eficaz total no mês de Março	149,2 mm						
Dias do mês de Abril 1969	17	20	21	22	30		
Precipitação (mm)	35,4	58,7	23,9	5,1	73,2		
Excedente (mm)	18,6	45,2	20,3	1,0	43,8		
Precipitação Efectiva (mm)	1,7	10,0	0,1	0	17,3		
Excedente - Precipitação Efectiva (mm)	16,9	35,2	20,2	1,0	26,5		
Infiltração eficaz total no mês de Abril	99,8 mm						
<hr/>							
Infiltração eficaz total no ano hidrológico 1968/1969	249,0 mm						

Em suma, o valor obtido pode ser considerado excepcional - como o registo de chuvas daquele ano - e, portanto, próximo da máxima infiltração ou recarga anual esperada para o sistema aquífero Quelo-Luanda. Não podemos considerá-lo como representativo da infiltração média anual que, pelo contrário, acreditamos, que o mesmo ocorra apenas muito ocasionalmente, em virtude da frequência de ocorrência destes anos chuvosos e tendo em conta o período estudado (1961/1962 a 2002/ 2003) este episódio acontece em cada 5 ou 10 anos (considerando que os referidos dados anuais de precipitação do ano “humido” encontram-se acima da precipitação média da série em mais de 75% ou 50%, respectivamente).

Os cálculos dos recursos renováveis que apresentamos abaixo são realizados com a infiltração calculada de tal forma que eles expressam valores máximos, tal como explicamos nas secções correspondente.

4.5.2 Cálculo dos recursos renováveis

As recargas subterrâneas provêm principalmente da infiltração das precipitações, mas também podem ocorrer a partir de escoamento superficial (especialmente em climas áridos), de aquíferos próximos ou de retornos de irrigação. Recargas de vazamentos na rede de abastecimento urbano ou estruturas de saneamento também são incluídas para áreas urbanas ou contíguas.

Neste trabalho apresentamos os resultados dos cálculos efectuados para conhecer as recargas subterrâneas por precipitação, sem incluir de forma exaustiva a temática referente aos vazamentos da rede de abastecimento da cidade de Luanda, calculados na ordem de 2 a 3hm³/ano, (Miguel, 2016). Os reabastecimentos relacionados aos retornos de irrigação não foram estudados nesta investigação, devido à falta de dados referentes às áreas irrigadas e suas respectivas dotações. Mesmo assim, achamos que os retornos da irrigação devem ser insignificantes, uma vez que a irrigação por gotejamento é usada principalmente na área limitada de culturas irrigadas na região. Os recursos renováveis (Rc) da precipitação são estimados a partir da superfície através da qual ocorre a infiltração (Sp) e a taxa de infiltração efectiva (Ie) em si, de acordo com a expressão:

$$Rc = Ie \times Sp \quad [\text{Eq. 3}]$$



14. SILUSBA

No sistema aquífero Quelo-Luanda, a infiltração efectiva calculada é de praticamente 250 mm no ano chuvoso 1968/1969, conforme descrito na secção anterior; a superfície do sistema útil para infiltração é de aproximadamente 1900 km², descontando a superfície do afloramento correspondente às Formações Quindabele, Bom Jesus e Funda, das quais temos pouca informação.

Assim, o valor calculado para recarga em anos especialmente húmidos, como o mencionado, é de cerca de 475 hm³ / ano. Os cálculos são os seguintes:

$$\begin{aligned} I_e &= 250 \text{ mm/ano} = \mathbf{0,25 \text{ m/ano}} \\ S_p &= 1900 \text{ Km}^2 = \mathbf{1.900.10^6 \text{ m}^2} \\ R_c &= I_e \times S_p = 0,25 \text{ m/año} \times 1.900.10^6 \text{ m}^2 = 475.10^6 \text{ m}^3 = \mathbf{475 \text{ hm}^3/\text{ano}} \end{aligned}$$

Considerando que um ano húmido semelhante ao utilizado para realizar os cálculos ocorre aproximadamente a cada 10 anos, e sabendo que no resto dos anos a infiltração é muito limitada ou praticamente insignificante, podemos considerar que eles são aproximadamente recarregados no sistema, em valor médio, em torno de 45-50 hm³, embora seja mais correto dizer que aproximadamente a cada década o sistema é recarregado com cerca de 475 hm³ da precipitação.

5. CONCLUSÕES

Os resultados das análises dos dados estatísticos referentes ao clima (precipitação e temperatura) de Luanda e Arredores, tendo como base uma série hidrológica de 42 anos (1961/1962 a 2002/2003), permite observar nos histogramas de precipitação das séries estudadas uma expressiva irregularidade na distribuição interanual das precipitações que, juntamente com a forte sazonalidade das mesmas - de natureza intra-anual, torna a gestão dos recursos hídricos mais complicada do que em outros lugares.

O Altíssimo valor de desviação típica de 206,3mm correspondente as irregularidades na distribuição temporal da precipitação afecta a recarga no sistema aquífero Quelo-Luanda, ocorrendo o fenómeno de forma episódica e em período correspondente a cada 10 anos (475hm³).

Considerando que um ano húmido semelhante ao utilizado para realizar os cálculos ocorre aproximadamente a cada 10 anos, e sabendo que no resto dos anos a infiltração é muito limitada ou praticamente insignificante, podemos considerar que eles são aproximadamente recarregados no sistema, em valor médio, em torno de 45-50 hm³, embora seja mais correto dizer que aproximadamente a cada década o sistema é recarregado com cerca de 475 hm³ de chuva.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos a Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID) por ter financiado através de uma das suas Bolsas de Doutoramento os trabalhos referentes a “ Caracterização Hidrogeológica e Ambiental de Luanda e Arredores” no âmbito do doutoramento em Ciências Ambientais desenvolvida por um dos autores desta comunicação na Universidade de Alcalá de Henares, Reino de Espanha, cuja defesa pública realizou-se em junho de 2006. São extensivos os agradecimentos a Universidade de Alcalá de Henares (Reino de Espanha) e a Universidade Agostinho Neto (Angola) pelo apoio técnico – científico prestado no âmbito dos trabalhos que culminaram com a apresentação da referida Tese de Doutoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Custodio, E. & Llamas, M.R. (1983). Hidrología Subterránea. 2ª edición. 2 tomos. Omega, Barcelona: 2.359 pp.



García Benavides, J. & López Díaz, J. (1970). Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N - 15° S). VIII Reunión Latinoamericana de Fitotecnia, Bogotá, Colombia, Nov. 1970. *Agronomía Tropical*, 20 (5): 335-345

Lobo Cardoso, M.C. (1950). O abastecimento de águas a Luanda (Apontamentos para a sua história). En: São Paulo de Assunção de Luanda, Edição do Museu de Angola.

Martínez de Azagra, A. & Navarro, J. (1996). Hidrología forestal. El ciclo hidrológico. Ed. Universidad de Valladolid, Valladolid: 286 pp.

Miguel, G.L; Rebollo, L.F. & Martín-Loeches, M. (2003). Caracterização hidrogeológica preliminar de Luanda e arredores (Angola). VI Congresso Nacional de Geologia. Junho de 2003, Lisboa. Ciências da Terra (UNL Lisboa), nº esp. V, CD-ROM: E38-E41

Miguel, G.L; Rebollo, L.F. & Martín-Loeches, M. (2006). Hidrogeologia do Sistema Aquífero Quelo-Luanda (Luanda, Angola) VII Congresso Nacional de Geologia de Portugal Estremoz

Sanders, L. (1998). A Manual of Field Hydrogeology. Prentice-Hall: 381 pp.

Thornthwaite (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev.*, Vol. 38: 55-94.

LEGISLAÇÃO

MOPU (1990). Instrucción de carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. B.O.E. nº 123, de 23/mayo/1990.

REFERÊNCIAS INTERNET

Altadex Land, S.L. (2006). Humedad en el suelo. Ábacos y Tablas. Disponível em:
<http://www.elriego.com/informa_te/abacos/humedad_en_el_suelo.htm> Acesso em 12 de maio de 2005

Sánchez San Román, F.J. (2005). Cálculo de la Precipitación Neta mediante el método del S.C.S. Prácticas, P110. Disponível em : En: <http://web.usal.es/javisan/hidro>. Universidad de Salamanca Acesso em 12 de maio de 2005.