

Indicadores de desempenho em resposta a seca hidrológica nos aquíferos do Algarve Performance indicators in response to hydrological drought in the Algarve's aquifers

Neves, Maria C. ^(1,2)

⁽¹⁾ Universidade do Algarve, FCT, Campus de Gambelas, Faro, Portugal, mcneves@ualg.pt

⁽²⁾ IDL, Instituto Dom Luiz, FCUL, Lisboa, Portugal

SUMMARY

Aquifers in semi-arid coastal regions such as the Algarve are severely affected by droughts. Excessive groundwater abstraction exacerbates the situation, leading to the degradation of water quality and the risk of saline intrusion. Thoroughly monitoring using various indicators is crucial to predicting and mitigating the consequences of drought. This study proposes a methodology that involves calculating performance indicators based on the Standardized Groundwater Index (SGI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Atmospheric reanalysis data and in situ groundwater level observations are used to determine the aquifers' memory and to find optimal accumulation times for the SPEI at each well. The inverse of the memory calculated from the SGI's autocorrelation provides the best estimate of each well's recovery capacity under drought conditions, offering a reliable indication of resilience and sustainability. The SPEI calculated for an accumulation time of 12 months (SPEI-12) best captures the average regional variability of groundwater levels. However, aquifer memories and optimal SPEI accumulation times vary greatly spatially, ranging from SPEI-5 to SPEI-48. Wells with shorter memories (< 6 months) demonstrate greater sustainability, while those with longer memories (> 16 months), inland or along the coast, exhibit lower resilience and sustainability. This work identifies the wells with the least resilience that require intensified monitoring to adapt water management strategies.

PALAVRAS-CHAVE

Drought, Aquifer, Performance, SPEI, SGI, Sustainability, Water Resources, Algarve. Seca, Aquífero, Desempenho, SPEI, SGI, Recursos Hídricos, Algarve.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel vital na sustentação dos ecossistemas e na segurança alimentar durante as secas. As alterações climáticas, nomeadamente o aumento das temperaturas e a redução da precipitação, estão a agravar as situações de escassez de água em zonas semiáridas e a colocar em risco a sustentabilidade dos aquíferos costeiros. Apesar da necessidade urgente de monitorizar e gerir os recursos hídricos, a natureza heterogénea dos aquíferos torna difícil avaliar e prever o estado quantitativo das águas subterrâneas. O Índice Padronizado de Níveis de Água Subterrânea ou *Standardized Groundwater Index* (SGI) emergiu como um índice comparável com outros índices meteorológicos de seca (Bloomfield and Marchant, 2013) e oferece uma alternativa ao limiar do percentil 20 da série histórica do nível piezométrico, tradicionalmente usado pela Agência Portuguesa do Ambiente para classificar o estado quantitativo das massas de água subterrânea. Este estudo foca-se no Algarve, uma região mediterrânica semiárida com aquíferos costeiros fortemente impactados pela seca. Ao comparar diferentes índices de seca, como o SGI, o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) e indicadores de desempenho, a investigação procura fornecer melhores ferramentas para a gestão das águas subterrâneas. O objetivo é melhorar a capacidade de antecipar secas e implementar estratégias de mitigação, contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

DADOS E MÉTODOS

A região do Algarve (Figura 1) está atualmente a enfrentar uma seca sem precedentes, com os níveis de águas subterrâneas na maioria dos locais a permanecerem abaixo do 20.º percentil desde 2018. Isto tem levado à elaboração de planos para restrições

de consumo, tanto a nível doméstico como na agricultura. Os aquíferos considerados na região, designados de M1 a M17, são essencialmente sistemas cársticos semi-confinados ou mistos cástico-porosos (Tabela 1). Os registos dos níveis de águas subterrâneas estão disponíveis através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH, 2024). Este estudo baseia-se numa seleção de 16 piezómetros distribuídos por 12 aquíferos (Figura 1), com registos mensais desde janeiro de 1990 até dezembro de 2022. A seleção foi feita com base na duração, continuidade e consistência das séries temporais, amostrando o maior número possível de aquíferos. Apenas metade dos registos abrange todo o período de análise, mas todos têm pelo menos 10 anos de observações e lacunas inferiores a 6 meses. Antes da análise, os passos de pré-processamento incluíram o uso de interpolação para estimar valores em falta. Todos os cálculos foram feitos utilizando Python.

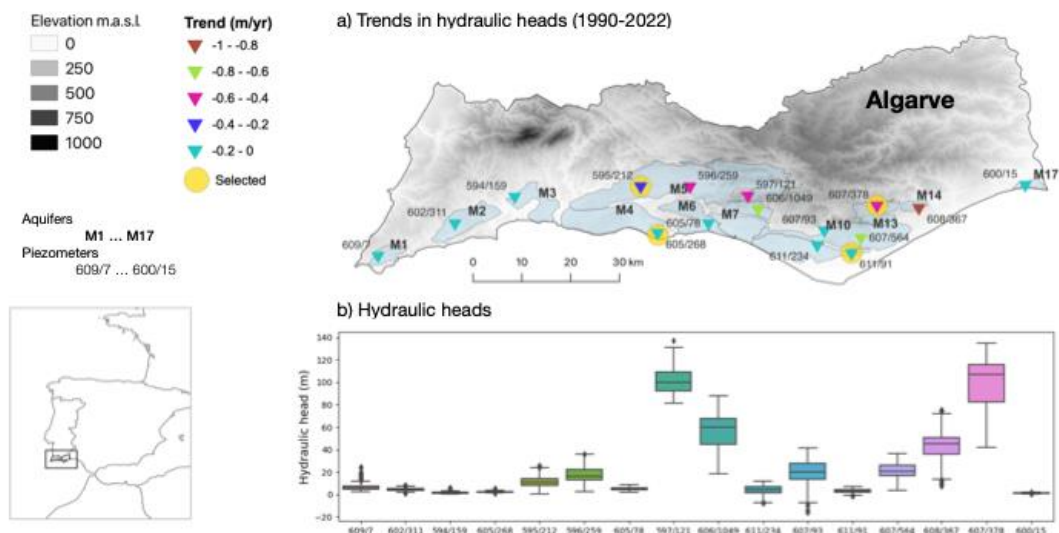


Figura 1: Localização da área de estudo mostrando os aquíferos estudados (M1 a M17). (a) Os triângulos invertidos representam a localização dos 16 piezómetros selecionados para análise e a tendência dos níveis de águas subterrâneas em cada local. (b) Gráfico de caixa e bigodes dos dados de nível piezométrico (m.a.s.l.) entre 1990 e 2022. As extremidades das caixas correspondem aos percentis 25 e 75, e os bigodes estendem-se aos valores mínimos e máximos dos níveis hidráulicos observados.

A primeira etapa da metodologia incluiu a análise da tendência dos níveis de águas subterrâneas (GWL), o cálculo de diferentes índices de seca e a comparação das memórias. A tendência dos níveis hidráulicos foi calculada utilizando o teste de Mann-Kendall (MK). Os índices de seca podem, em geral, ser classificados em índices padronizados e índices baseados em limiares. Uma vez que a escolha do limiar é sempre uma decisão subjetiva, por razões práticas, os limiares são frequentemente derivados de percentis. Este estudo adota o percentil 20 da série temporal dos níveis de águas subterrâneas como o valor de limiar em cada local, referido a partir de agora como P20. Os índices de seca padronizados representam anomalias em relação a uma situação normal de forma padronizada, como o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). Embora o SPI tenha sido calculado para fins comparativos, este estudo opta pelo Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), que é mais adequado para regiões semiáridas onde a temperatura desempenha um papel fundamental (Vicente-Serrano et al., 2010). O SPEI considera, geralmente, as anomalias acumuladas do balanço hídrico climático (precipitação menos evapotranspiração potencial, ou P-E) ao longo de várias escalas temporais (por exemplo, 1, 3, 6, 12 meses ou mais). O método utilizado para estimar as séries temporais do SGI e do SPEI difere do método tradicional usado para o cálculo do SPI. Muitos estudos recentes sobre secas adotaram abordagens não paramétricas, onde, em vez do ajuste convencional de uma função de distribuição paramétrica à precipitação, as probabilidades de precipitação observada (ou de outras variáveis hidrológicas) são calculadas empiricamente. Para o SGI, por exemplo, Bloomfield e Marchant (2013) descobriram que não era possível encontrar uma única função de distribuição ótima que se ajustasse a todos os registos de águas subterrâneas em diferentes locais. Além disso, a função de distribuição ajustada variava de mês para mês em um local específico. Neste estudo, adotamos a sua abordagem e estimamos o SGI utilizando a *normal score transform* (Neves, 2024).

Tabela 1 Tipo de aquífero, tendência dos níveis de águas subterrâneas (GWL), memória, período de acumulação ótimo do SPEI e Duração Média da Seca (MDD) calculada utilizando o percentil 20 e o SGI como limiares. SCK: cárstico semi-confinado, SCKP: cárstico semi-confinado e poroso; SCC: carbonato semi-confinado, SCM: multicamadas semi-confinado, UP: poroso não confinado.

Aquífero	Tipo	Código do Piezómetro	GWL Desvio padrão (m)	GWL Tendência Mann-Kendall (m/yr)	GWL memória (meses)	SGI memória (meses)	SPEI_time	SGI-SPEI Pearson's coef.	GWL MDD (meses)	SGI MDD (meses)
M1	SCK	609/7	3.6	-0.140	5	5	SPEI_5	0.697	13	4
M2	SCK	602/311	1.2	-0.030	16	15	SPEI_18	0.792	12	13
M3	SCKP	594/159	0.9	-0.018	4	5	SPEI_4	0.82	6	4
M4	SCKP	605/268	0.5	0.000	14	10	SPEI_10	0.713	6	5
M5	SCK	595/212	4.8	-0.25	18	17	SPEI_24	0.79	11	16
M5	SCK	597/121	11.5	-0.515	6	7	SPEI_7	0.721	6	7
M5	SCK	596/259	6.9	-0.393	18	16	SPEI_22	0.822	13	20
M6	SCC	605/78	1.4	-0.029	15	13	SPEI_15	0.711	5	8
M7	SCK	606/1049	16.5	-0.621	9	8	SPEI_12	0.829	6	6
M10	SCC	607/93	10.3	0.12	15	11	SPEI_13	0.778	6	5
M10	SCC	607/564	7.3	-0.723	15	11	SPEI_11	0.861	6	6
M12	SM	611/234	4.1	-0.065	17	19	SPEI_36	0.828	6	20
M12	SM	611/91	1.6	-0.018	26	21	SPEI_48	0.752	10	7
M13	SCK	607/378	22.3	-0.406	5	6	SPEI_11	0.679	5	5
M14	SCK	608/367	15.2	-0.951	16	13	SPEI_16	0.864	12	12
M17	UP	600/15	0.3	-0.020	4	9	SPEI_10	0.685	4	4

As funções de autocorrelação representam a dependência linear de um evento nos valores subsequentes da série temporal e são usadas para quantificar o efeito de memória dos sistemas hidrológicos, um parâmetro que tem implicações para a persistência das secas. Este estudo avalia a memória tanto dos registos de níveis hidráulicos (memória do GWL) quanto das séries temporais do SGI (memória do SGI) para explorar e comparar a sua relação com o SPEI. O auto-correlograma é o gráfico da correlação de uma série temporal consigo mesma após ser deslocada por intervalos de tempo (lags) cada vez maiores. A capacidade do SPEI de captar a seca nas águas subterrâneas foi avaliada ao calcular o coeficiente de correlação de Pearson entre as séries temporais do SPEI e do SGI. O objetivo era determinar as acumulações e lags do SPEI necessários para alinhar os sinais meteorológicos com os níveis de águas subterrâneas. Para encontrar o melhor período de acumulação, o SPEI foi calculado em cada local de piezómetro com

períodos de acumulação variando entre 1 e 48 meses, com passos de 1 mês. O coeficiente de correlação de Pearson, o valor p correspondente e o lag de correlação máxima foram determinados entre o SGI e cada uma das 48 séries temporais de SPEI em cada local de piezómetro. Os melhores períodos de acumulação do SPEI, designados aqui como SPEI_time, são aqueles que proporcionam a máxima correlação em cada local.

A terceira e última etapa da metodologia foi a avaliação de indicadores de desempenho, nomeadamente, fiabilidade, resiliência, vulnerabilidade e sustentabilidade, que são comumente utilizados para caracterizar o desempenho estocástico dos sistemas de recursos hídricos (Peters et al., 2005). Estes indicadores são formulados em termos de medidas estatísticas e descrevem quão provável é que um sistema falhe (fiabilidade), quão rapidamente ele recupera da falha (resiliência), quão severas podem ser as consequências da falha (vulnerabilidade) e, por último, quão sustentável é o sistema de acordo com a definição de sustentabilidade de Loucks: “Sistemas de recursos hídricos sustentáveis são aqueles projetados e geridos para contribuir plenamente para os objetivos da sociedade, agora e no futuro, enquanto mantêm a sua integridade ecológica, ambiental e hidrológica” (Loucks, 1997). A novidade aqui é que, em vez de usar o GWL para calcular os indicadores de desempenho, este estudo calcula os indicadores de desempenho utilizando as séries temporais do SGI em cada local, para diferentes escolhas de limiares. Condições satisfatórias e insatisfatórias significam valores do SGI acima ou abaixo do limiar, respetivamente.

A fiabilidade representa a probabilidade de que o SGI fique abaixo do limiar e é dada por: $REL = (\text{Número de condições satisfatórias}) / (\text{Número total de condições})$. A resiliência fornece uma indicação da capacidade de retornar a uma condição satisfatória após uma condição insatisfatória: $RES = (\text{Número de vezes que uma condição satisfatória segue uma condição insatisfatória}) / (\text{Número total de condições insatisfatórias})$. Outra forma de definir a resiliência é considerar o inverso da duração média da seca de águas subterrâneas em cada local (Zeydinejad, 2023). Dado que a memória é um proxy da duração da seca, uma estimativa alternativa de resiliência também pode ser calculada como o inverso da memória SGI. A vulnerabilidade é definida como uma medida probabilística que considera a extensão e a magnitude de uma condição insatisfatória:

$$Vul = \sum s_j e_j \quad (\text{Eq. 1})$$

onde s_j é a magnitude (ou severidade) da condição insatisfatória e e_j é a probabilidade dessa magnitude ser atingida durante o intervalo de tempo da série temporal. Finalmente, o índice de sustentabilidade é definido como (Peters et al., 2005):

$$SUS = REL * RES_1 * (1 - VUL) \quad (\text{Eq. 2})$$

RESULTADOS

As tendências nos níveis das águas subterrâneas calculadas de acordo com o teste de Mann-Kendall (MK) são apresentadas na Tabela 1 e exibidas como triângulos invertidos na Figura 1a. Os níveis no Algarve têm diminuído de forma generalizada e consistente. As tendências mais negativas são observadas em locais de maior altitude, como no piezómetro 607/378 no aquífero M13. Isto ocorre porque os défices de precipitação têm um efeito mais significativo nas encostas das colinas, onde a recarga depende principalmente da infiltração direta. Esses piezómetros também exibem as maiores variações de amplitude dos níveis de água (Fig. 1b). Para sul, os aquíferos costeiros situados próximo do nível do mar e com pequenas profundidades até o lençol freático apresentam pequenas variações de amplitude nas cargas hidráulicas. Esta característica, tipicamente observada em planícies de descarga costeira, tem um papel crítico na identificação de secas, como será discutido mais tarde.

As séries temporais do nível de água (GWL) são apresentadas para quatro piezómetros selecionados, considerados representativos de todo o conjunto de piezómetros em análise (Fig. 2). Os registos mostram padrões oscilatórios visivelmente distintos associados à topografia e à elevação da carga hidráulica. Piezómetros baixos próximos da costa mostram flutuações muito pequenas, refletindo principalmente o ciclo anual de precipitação (611/91, 605/268). As cargas hidráulicas nestas regiões podem cair abaixo do nível do mar durante secas prolongadas, como aconteceu no local 611/91 em 1995–1996 e recorrentemente em 2019–2022. Piezómetros em altitudes mais elevadas (607/378) apresentam uma maior componente de oscilações de baixa frequência, com períodos dominantes de 6 a 10 anos sobrepostos nas flutuações do ciclo anual, conforme já descrito em estudos anteriores (Neves et al., 2019). Estas variações de baixa frequência estão principalmente associadas à Oscilação do Atlântico Norte (NAO), que é o principal padrão climático de grande escala que influencia a precipitação na região.

Também se mostra na Figura 2 o percentil 20 (P20) do nível das águas subterrâneas nos piezómetros selecionados (linhas sólidas cinza). Em Portugal, as autoridades identificam um aquífero como estando em estado quantitativo crítico quando o GWL atinge o

limiar P20. Os círculos marcam o início da seca hidrológica conforme definido por este limite. As barras amarelas representam as principais secas meteorológicas regionais identificadas pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Dependendo do piezómetro, algumas secas meteorológicas não se propagam para os aquíferos ou não são identificadas pelo limiar P20.

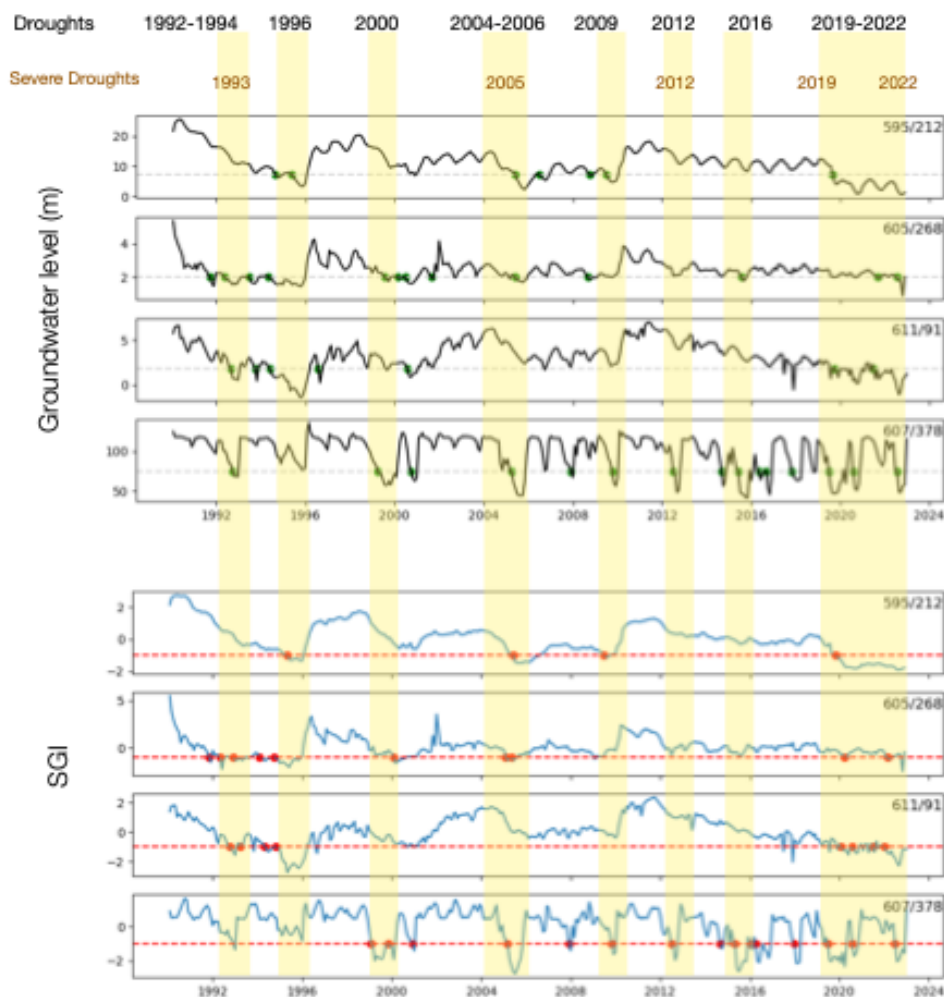


Figura 2: Séries piezométricas e SGI em quatro piezómetros representativos: dois localizados no interior do Algarve (595/212 e 607/378) e dois próximos do mar (605/268 e 611/91). As linhas tracejadas representam o limiar P20 (cinzento) e o limiar SGI (vermelho) para secas moderadas (-1). Os pontos verdes assinalam o início da seca de acordo com o P20, e os pontos vermelhos assinalam o início da seca de acordo com o indicador SGI. As barras amarelas indicam a ocorrência de secas meteorológicas regionais.

A Figura 2 mostra também a série temporal do SGI cujo cálculo é baseado em desvios padronizados relativos à climatologia mensal. A padronização atua como um filtro passa-baixa que atenua ou remove as altas frequências associadas às oscilações do ciclo sazonal e anual. Ao comparar GWL e SGI, fica evidente que esta atenuação tem maior impacto nos piezómetros situados perto do nível do mar devido às pequenas variações de GWL (por exemplo, 611/91). O valor limite do SGI assumido para declarar seca é subjetivo e varia entre diferentes estudos. Aqui, é assumido um limite SGI comum a todos os piezómetros e igual a -1,0, determinado a partir de um estudo de sensibilidade descrito em detalhe no artigo Neves (2024).

O histograma do número de secas por mês do ano fornece uma indicação da capacidade dos índices de antecipar as secas (Fig. 3), o que pode ser importante para fins de gestão e planeamento. Enquanto o P20 deteta secas principalmente nos meses de verão (junho a setembro), quando a seca meteorológica atinge o seu pico, o SGI tem a vantagem de antecipar o alarme em alguns meses, com picos no inverno, particularmente em dezembro e janeiro.

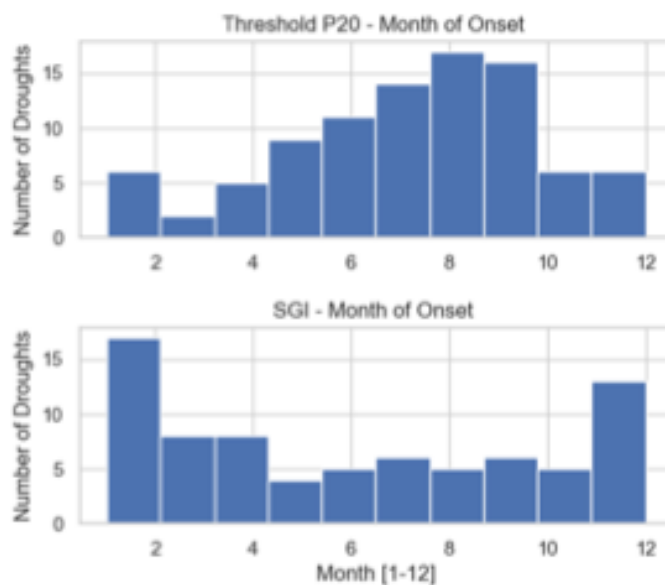


Figura 3: Histograma do número de secas (contagens do número de inícios de secas – pontos verdes e vermelhos como se mostra na Figura 2) em função do mês (1 para janeiro e 12 para dezembro) considerando a totalidade dos piezómetros (16) deste estudo.

Para verificar a adequação do SPEI como proxy do SGI, este estudo determina o período de acumulação do SPEI que produz a melhor correlação entre as séries temporais do SPEI e do SGI (Tabela 1). O SPEI_time indica o tempo de acumulação (em meses) que produz o maior coeficiente de correlação de Pearson. Os melhores resultados da correlação são altamente significativos, pois os valores de p são todos inferiores a 0.001. É evidente que não existe um período de acumulação ideal único que se ajuste a todas as observações de águas subterrâneas e, na verdade, esta varia amplamente entre 4 e 48 meses na área de estudo.

A memória representa o tempo que o GWL leva para responder aos sinais meteorológicos. A memória do sistema é calculada com base na autocorrelação do GWL e na autocorrelação do SGI (Fig. 4) cujo cálculo é descrito com mais detalhe em Neves (2024). A memória GWL é considerada a lag correspondente a um coeficiente de autocorrelação de 0,2 (Neves et al., 2016). Não há diretrizes para a escolha do coeficiente de autocorrelação do SGI. Aqui é definido como 0.3 porque este é o valor que fornece o melhor compromisso entre as memórias SGI e GWL (Tabela 1). No entanto, as memórias variam amplamente entre os diferentes piezómetros e têm uma distribuição espacial muito heterogénea. A memória GWL varia entre 5 e 26 meses enquanto a memória SGI varia entre 5 e 21 meses. Locais com memórias mais curtas apresentam episódios rápidos ou repentinos de recessão e recuperação (por exemplo, 697/378), enquanto locais com memórias mais longas apresentam variações mais suaves e ciclos de longo prazo (por exemplo, 611/91).

A Memória e o SPEI_time possuem uma relação de proporcionalidade direta descrita por um polinómio de 2ª ordem (Fig. 4). O ajuste polinomial é melhor para SGI do que para GWL. O tempo ótimo de acumulação do SPEI, bem como a memória, representam a inércia para responder ao balanço entre a precipitação e a evapotranspiração (P-E) e podem ser considerados um proxy da persistência ou duração das secas das águas subterrâneas. Espera-se que quanto mais longos forem os tempos de memória, menos frequentes e mais longas serão as secas. Isto é observado na maioria dos piezómetros do Algarve, mas é particularmente evidente no piezómetro 595/212, com uma memória de 17 meses e apenas um pequeno número de secas muito longas (Fig. 2). Estes locais têm propriedades hidrogeológicas de filtragem passa-baixo, tais como formações superficiais espessas e, portanto, tempos de recarga mais longos, ou quantidades significativas de armazenamento/volume de água na rede cárstica.

A autocorrelação da recarga é essencialmente uma função da espessura da zona saturada. Uma espessura maior resulta na diminuição da amplitude dos sinais de alta frequência, enquanto uma espessura menor leva a episódios de seca mais curtos, mas mais severos. As exceções ocorrem quando poços rasos com finas zonas não saturadas, ou pequenas profundidades até o lençol freático, têm memória longa (Kumar et al., 2016). Este é o caso dos piezómetros do aquífero M12 onde as longas memórias (grandes autocorrelações) podem ser explicadas pelos volumes significativos de recarga indireta (Neves et al., 2019). Quanto às características

de drenagem do aquífero, a transmissividade é responsável por dissipar pulsos rápidos de recarga. A capacidade de armazenamento é outro fator influente na atenuação de flutuações frequentes e rápidas. Como resultado, aquíferos com maior capacidade de armazenamento e grande transmissividade, como por exemplo o aquífero M5 (Neves et al., 2016), tendem a apresentar maiores memórias e pequena resiliência às secas.

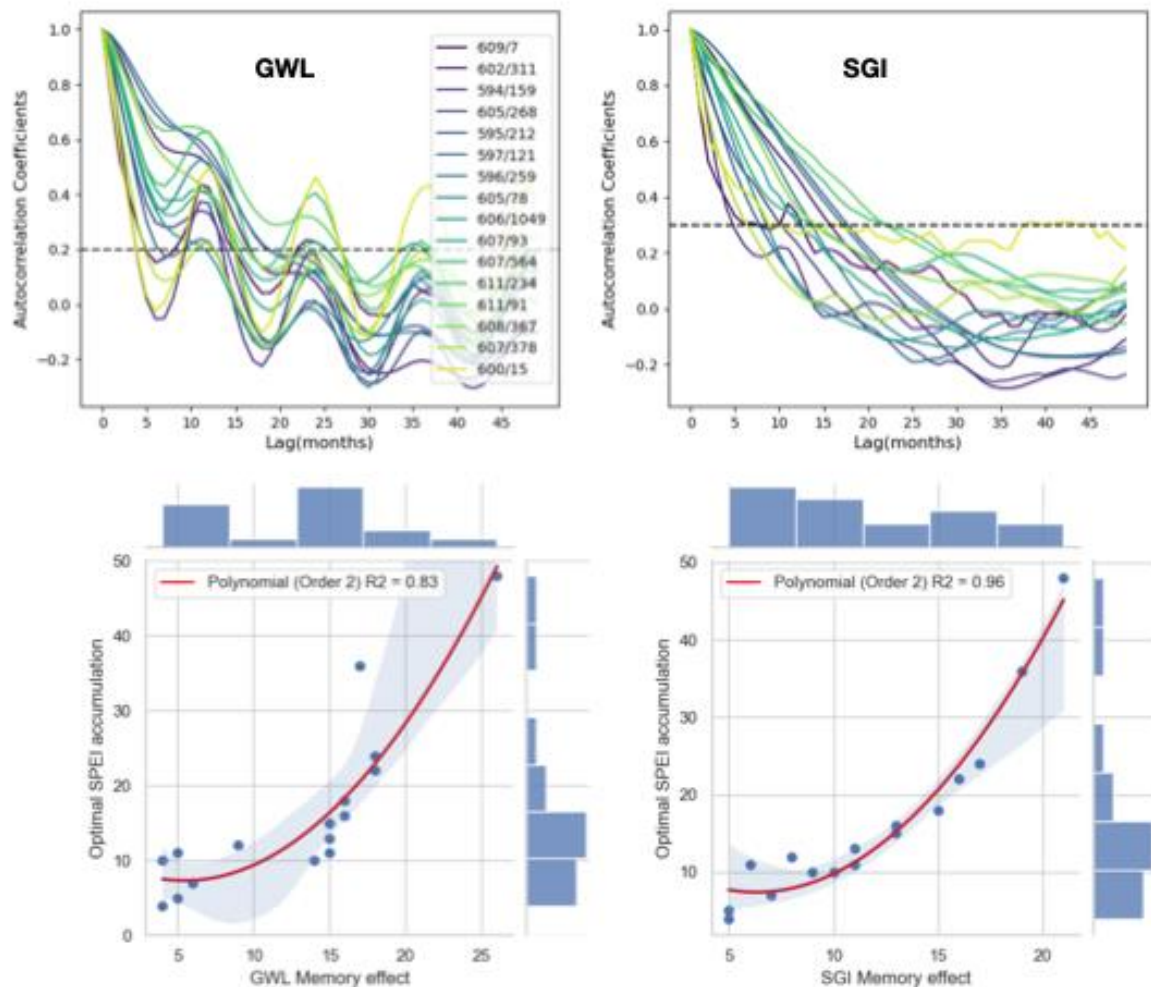


Figura 4: Gráficos da função de autocorrelação do nível da água (GWL) e do SGI para os 16 piezómetros considerados. As linhas tracejadas mostram os valores específicos assumidos para o cálculo da memória (0,2 para GWL e 0,3 para SGI) no Algarve. A relação entre o período ótimo de acumulação e a memória nos 16 locais é descrita por um polinómio de 2ª ordem em ambos os casos com sombreamento indicando o nível de confiança do ajuste de 95%. O ajuste é melhor para SGI do que para GWL (coeficiente de determinação R^2 0.96 e 0.83, respetivamente). Um R^2 de 0,96 significa que 96% da variância nos dados é explicada pelo modelo polinomial e implica que o modelo SGI tem maior capacidade de prever dados futuros do que o modelo GWL.

A análise dos indicadores de desempenho é feita com mais detalhe em Neves (2024) incluindo-se aqui apenas um resumo dos resultados principais. A fiabilidade indica a capacidade de um poço fornecer água sem atingir um estado quantitativo crítico. A fiabilidade é inversamente proporcional valor limite de SGI definido para declarar seca, pois maior fiabilidade implica limites mais extremos que são alcançados com menos frequência. A resiliência (RES), pelo contrário, é diretamente proporcional ao limiar crítico. Quanto mais negativo for o limiar, menor será a resiliência. A utilização de índices para determinar o início da seca e definir classes de seca é um desafio, uma vez que o início depende fortemente de limiares críticos utilizados, particularmente em aquíferos de planície costeira onde as flutuações do nível da água são pequenas. Como resposta, devermos adotar uma abordagem flexível que englobe vários limiares e diferentes indicadores.

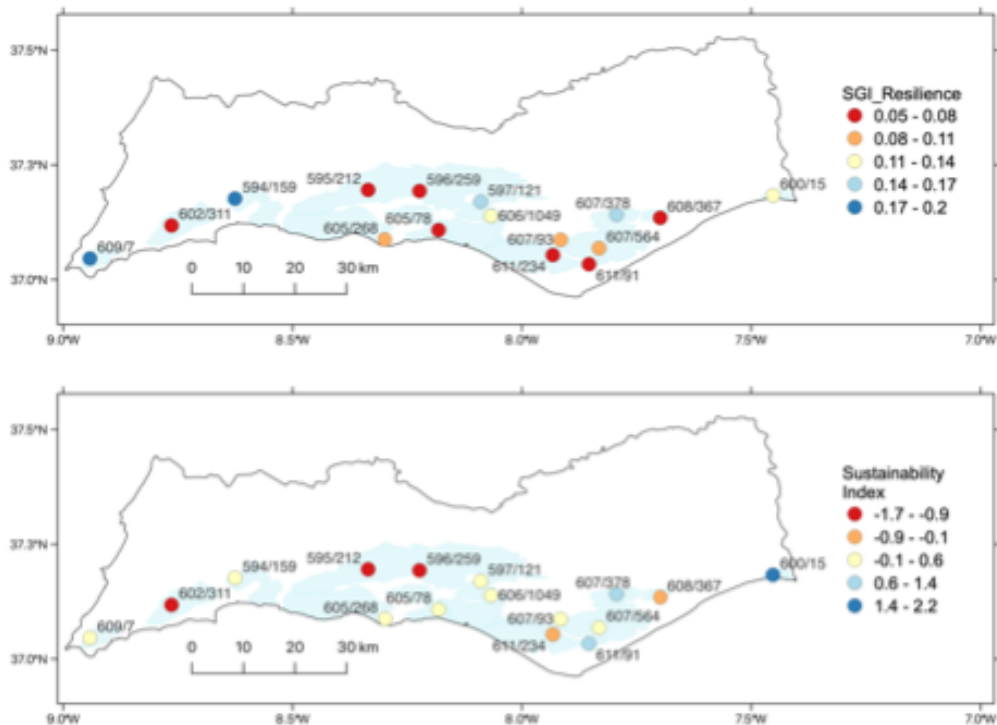


Figura 5: Mapas mostrando a distribuição espacial da resiliência, calculada como o inverso da memória do SGI (topo), e do índice de sustentabilidade normalizado, calculado a partir da série temporal SGI assumindo um limiar de seca moderada (-1) em cada local. A resiliência do SGI fornece uma melhor avaliação da sustentabilidade em resposta à seca nos poços ao longo da costa com memórias longas e níveis freáticos próximos do nível do mar (611/234 e 611/91).

Os mapas da Figura 5 mostram a distribuição espacial da resiliência, calculada como o inverso da memória do SGI, e da sustentabilidade (que reflete essencialmente o indicador de desempenho resiliência ou RES), ambos utilizando o valor do limiar do SGI igual a -1 para definir condições de seca. A maioria dos piezómetros perto da costa mostram baixa resiliência e, portanto, baixa sustentabilidade à seca. Os sítios com menor sustentabilidade são os furos 602/311, 595/212 e 596/259, todos com memórias próximas de 15 meses. Curiosamente, os piezómetros com as maiores memórias (611/91 e 611/234) não são classificados como tendo a menor sustentabilidade. Isto deve-se à sua elevada sensibilidade ao valor limite que distorce a estimativa de sustentabilidade. Neste caso, o inverso da memória SGI é um melhor indicador de sustentabilidade, uma vez que memórias maiores indicam tempos de recuperação mais longos da seca.

Os especialistas geralmente concordam que não existe um índice perfeito para descrever a seca das águas subterrâneas, porque há uma infinidade de índices e cada um analisa um aspeto particular do ciclo da água. Para interpretar e captar totalmente os vários efeitos da seca, recomenda-se, portanto, a utilização de múltiplos índices. O caso-estudo do Algarve mostra que tanto a memória como o período de acumulação do SPEI podem servir como ferramentas eficazes para caracterizar e monitorizar as condições de seca, mas os cálculos devem ser realizados individualmente em cada local.

CONCLUSÕES

A seca de águas subterrâneas é uma preocupação global crescente devido aos seus impactos adversos, socioeconómicos ou naturais. A abordagem e os métodos utilizados neste estudo podem ser aplicados a outras regiões mediterrânicas semiáridas costeiras que enfrentam tendências de secagem, como o Algarve. Podem ser tiradas as seguintes conclusões:

1. Os valores-limite utilizados para determinar o início das secas, os intervalos de classes de seca e as subsequentes características da seca, como a duração, são delicados e devem seguir uma abordagem de teste de sensibilidade. Independentemente do método, a escolha do valor-limite é particularmente crítica em piezómetros costeiros próximos ao nível do mar, com pequenas variações do nível de água subterrânea (GWL).

2. O SGI apresenta várias vantagens sobre o método do percentil 20 para identificar a seca de águas subterrâneas, nomeadamente, uma estimativa mais robusta da memória do sistema, proporcionando uma melhor correspondência com o SPEI ótimo, e uma maior capacidade de detetar a seca precocemente. O percentil 20 aciona o alarme mais frequentemente nos meses de verão, quando a seca já está no seu auge, enquanto o SGI pode antecipar o início da seca nas estações anteriores de inverno e primavera.
3. O SPEI consegue capturar a maioria dos principais aspetos relevantes para estudos de seca de água subterrâneas a nível regional. Em regiões áridas e semiáridas como o Algarve, o SPEI fornece uma estimativa mais robusta da seca e fornece uma melhor correspondência com as observações de águas subterrâneas do que indicadores baseados apenas em precipitação, como o SPI. No entanto, o tempo de acumulação ótimo do SPEI deve ser calculado em cada poço individual devido às características hidrogeológicas específicas de cada local.
4. A sustentabilidade em relação à seca, definida de acordo com critérios de desempenho, é essencialmente uma função da resiliência, que mede a capacidade de um poço suportar condições desfavoráveis e recuperar para condições normais médias. Os indicadores de desempenho não distinguem os forçamentos externos naturais (climáticos) dos antropogénicos (bombagem) mas são úteis para identificar rapidamente poços que necessitem de vigilância prioritária.
5. A resiliência à seca é bem descrita pela memória dos níveis de água subterrânea em cada local. A memória é um parâmetro robusto que mostra boa concordância, independentemente do método de cálculo utilizado; ou seja, as estimativas derivadas das autocorrelações do GWL, autocorrelações do SGI ou períodos de acumulação ótimos do SPEI são consistentes entre si. Além disso, o inverso da memória fornece uma estimativa mais fiável da resiliência em poços costeiros com níveis próximos ou abaixo do nível do mar, sob risco de intrusão salina.
6. No Algarve, a seca moderada de águas subterrâneas pode ser definida por um valor-limite de SGI igual a -1. Poços com resposta de curto prazo ao P-E (SPEI_time < 6 meses) são classificados como resilientes e sustentáveis. Poços com grandes memórias (SPEI_time > 18 meses) são os menos resilientes à seca e os menos sustentáveis. A maioria dos outros poços tem memórias próximas de 12 meses, indicando que o SPEI-12 é o tempo de acumulação médio que produz a melhor correlação com a variabilidade do nível das águas subterrâneas na região.

Em resumo, a avaliação das respostas dos aquíferos à seca em regiões costeiras deve incluir a quantificação de métricas de sustentabilidade. Monitorizar a evolução da seca e os indicadores de desempenho ao longo do tempo proporciona informações valiosas e pode orientar o desenvolvimento de soluções de gestão adaptadas. As conclusões deste estudo apoiam a importância de empregar métodos complementares na monitorização da seca. A integração de indicadores ou índices complementares pode fornecer uma compreensão mais abrangente das dinâmicas da seca em regiões áridas e semiáridas. Como este estudo demonstra, diversificar as nossas estratégias de monitorização pode aumentar a robustez e fiabilidade da avaliação da seca em aquíferos, particularmente em regiões costeiras, e ajudar a conceber melhores estratégias de gestão da seca.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) I.P./MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) – UIDB/ 50019/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/50019/2020>), UIDP/50019/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/50019/2020>) e LA/P/0068/2020 (<https://doi.org/10.54499/LA/P/0068/2020>).

REFERÊNCIAS

- [1] Bloomfield, J.P. and B.P. Marchant (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **17**, 4769–4787.
- [2] Kumar, R., J.L. Musuuza, A.F. Van Loon, A.J. Teuling, R. Barthel, J. Ten Broek, J. Mai, L. Samaniego, and S. Attinger (2016). Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **20**, 1117–1131.
- [3] Loucks, D.P. (1997) . Quantifying trends in system sustainability. *Hydrol. Sci. J.* **42**, 513–530.
- [4] Neves, M.C. (2024). Integrating standardized indices and performance indicators for better drought assessment in semi-arid

coastal aquifers. *Groundwater for Sustainable Development* **27**, 101341.

- [5] Neves, M.C., L. Costa, R. Hugman and J.P. Monteiro (2019). The impact of atmospheric teleconnections on the coastal aquifers of Ria Formosa (Algarve, Portugal). *Hydrogeol. J.* **27**, 2775–2787.
- [6] Neves, M.C., L. Costa and J.P. Monteiro, J.P. (2016). Climatic and geologic controls on the piezometry of the Querença-Silves karst aquifer, Algarve (Portugal). *Hydrogeol. J.* **24**, 1015–1028.
- [7] Peters, E., H.A.J. Van Lanen, P.J.J.F. Torfs and G. Bier (2005). Drought in groundwater - drought distribution and performance indicators. *J. Hydrol.* **306**, 302–317.
- [8] SNIRH (2024) Sist. Nac. Informação Recur. Hídricos <http://www.snirh.pt>
- [9] Vicente-Serrano, S.M., S. Beguería and J.I. López-Moreno (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* **23**, 1696–1718.
- [10] Zeydalinejad, N., 2023. An overview of the methods for evaluating the resilience of groundwater systems. *MethodsX* **10**, 102134.