

Trabajo Fin de Máster

Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESTUDIO DE CORRELACIÓN ENTRE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO GLOBAL E INDICADORES DE ESTADO QUÍMICO Y CUANTITATIVO EN LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA MARBELLA-ESTEPONA

Curso académico 2022/23

Tutor académico:

Tutores de empresa:

Málaga, a 9 de octubre de 2023

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL TFM

, con DNI , DECLARA que es autora del presente Trabajo de Fin de Máster, titulado: “Estudio de correlación entre los impactos del cambio global e indicadores de estado químico y cuantitativo en la masa de agua subterránea Marbella-Estepona”.

Que ha cumplido con las obligaciones legales sobre propiedad intelectual e industrial y que, además, es un trabajo original, no habiéndose utilizado fuentes bibliográficas sin ser citadas debidamente. De no cumplir este compromiso, la abajo firmante es consciente de que, de acuerdo con la Normativa de Evaluación y de Calificación de los estudiantes de la Universidad de Málaga de 14 de marzo de 2018, esto conllevará automáticamente a la calificación numérica de cero, independientemente del resto de las calificaciones que hubiera obtenido. Esta consecuencia debe entenderse sin perjuicio de las responsabilidades disciplinarias en las que se pudieran incurrir.

En Málaga, a 9 de octubre de 2023

VISTO BUENO DEL TUTOR

, Catedrático de Geodinámica Externa, INFORMA que el presente Trabajo Fin de Máster ha sido realizado bajo mi supervisión y cumple con el Reglamento relativo a la propiedad intelectual e industrial.

En Málaga, a 9 de octubre de 2023

AGRADECIMIENTOS

Por último, quiero dar las gracias a las personas más importantes que me han acompañado y apoyado durante estos meses y han sabido transmitirme las palabras más oportunas en los momentos más necesarios: mi familia.

Índice

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Estado del arte	5
1.2. Justificación	6
1.3. Antecedentes	7
1.4. Objetivos	8
1.5. Estructura de la memoria	9
2. METODOLOGÍA.....	10
2.1. Recopilación bibliográfica	10
2.2. Recopilación de datos	10
2.2.1. Datos meteorológicos	10
2.2.2. Datos hidrogeológicos.....	10
2.2.3. Datos de estado cualitativo.....	10
2.2.4. Datos cartográficos	11
2.3. Análisis y tratamiento de datos.....	11
2.3.1. Mapas.....	11
2.3.2. Análisis climático	11
2.4. Índices climáticos	11
2.4.1. SPI.....	12
2.4.2. SPEI.....	14
3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	16
3.1. Ámbito geográfico.....	16
3.2. Hidrometeorología.....	17
3.2.1. Generalidades sobre la dinámica de las precipitaciones y la temperatura a escala regional	17
3.2.2. Análisis de las series históricas de precipitación correspondientes al periodo 1994/95-2021/22	19
3.2.3. Análisis de los datos de temperatura del aire.....	24
3.2.4. Evapotranspiración potencial a partir de las series históricas (periodo 1998/99-2021/22)	26
3.3. Geología	26
3.4. Hidrología superficial	29
3.5. Hidrogeología	31

3.5.1.	Antecedentes	31
3.5.2.	Límites y geometría	31
3.5.3.	Inventario de puntos de agua	33
3.5.4.	Hidrodinámica	35
3.5.5.	Hidroquímica	37
4.	ANÁLISIS DEL DETERIORO TEMPORAL DEBIDO A EVENTOS DE SEQUÍA MEDIANTE ÍNDICES CLIMÁTICOS.....	44
4.1.	Cálculo de los índices climáticos en la Costa del Sol	44
4.1.1.	Cálculo de los índices SPI y SPEI	44
4.1.2.	Periodo de registro de datos y consecuente registro de índices	44
4.1.3.	Cálculo SPI	45
4.1.4.	Cálculo SPEI	48
4.1.5.	Comparación entre SPI y SPEI	50
4.1.6.	Identificación de sequías con SPI y SPEI.....	51
4.1.7.	Limitaciones del SPI y SPEI en la identificación de sequías en la zona de estudio	61
4.2.	Relación entre los índices y el estado cuantitativo	63
4.3.	Relación entre los índices y el estado cualitativo	66
5.	CONCLUSIONES	76
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXO I: Tabla de selección de las estaciones meteorológicas (precipitación)	83
	ANEXO II: Tabla de selección de las estaciones meteorológicas (temperatura).....	84
	ANEXO III: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo “Monterroso”	85
	ANEXO IV: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo “Río Verde”	86
	ANEXO V: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo “Río Padrón”	87
	ANEXO VI: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo “Señorío”	88

RESUMEN

La intensificación de las sequías debido al cambio climático contribuye a la necesidad de realizar una buena gestión de los recursos hídricos, sobre todo en zonas costeras de clima mediterráneo con una elevada actividad turística, ya que la demanda de los recursos hídricos aumenta considerablemente.

En este Trabajo Fin de Máster se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre el SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) y el SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración) en la Costa del Sol Occidental. Adicionalmente, se ha tratado de detectar un posible deterioro temporal de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona (M.A.S. 060.040), tanto en el estado cuantitativo como cualitativo, asociado a eventos de sequía.

El análisis comparativo de los índices no ha permitido caracterizar cuál de los dos refleja mejor la realidad climática en cuanto a la identificación de periodos húmedos y secos. No obstante, el SPEI ha permitido detectar un mayor porcentaje del número de meses de sequía de tipología más intensa en la mayoría de las estaciones observadas.

Dada la complejidad hidrogeológica de la masa de agua subterránea estudiada y la disponibilidad de los datos meteorológicos e hidrogeológicos se ha concluido que no es suficiente con el análisis de índices de sequía, ya que otros factores como la cercanía al mar, los bombeos o la recarga artificial pueden alterar la señal climática.

ABSTRACT

The intensification of droughts due to climate change contributes to the need for good management of water resources, especially in coastal areas with a Mediterranean climate and high tourist activity, since the demand for water resources increases considerably.

In this master's thesis, a comparative analysis has been carried out between the SPI (Standardized Precipitation Index) and the SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) in the "Costa del Sol Occidental". Additionally, an attempt has been made to detect a possible temporary deterioration of the Marbella-Estepona groundwater body (M.A.S. 060.040), both in the quantitative and qualitative state, associated with drought events.

Regarding the comparative analysis of the indices, it has not been possible to observe which of the two reflects better the climatic reality in terms of the identification of wet and dry periods. However, the SPEI has allowed detecting a higher percentage of the number of drought months of more intense typology in most of the observed stations.

Due to the hydrogeological complexity of the groundwater body studied and the availability of meteorological and hydrogeological data, it has been concluded that the analysis of drought indices is not sufficient since other factors such as proximity to the sea, pumping or managed recharge can alter the climatic signal.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado del arte

En las últimas décadas, la Costa del Sol Occidental, situada en la provincia de Málaga, en la comunidad autónoma de Andalucía, ha experimentado una marcada transformación en sus estructuras económicas y sociodemográficas, principalmente debido a un rápido crecimiento poblacional, impulsado por la actividad turística. Ello ha generado un aumento de presión sobre los recursos (en particular sobre el agua) y un cambio en el uso del suelo.

Dado que el crecimiento turístico se produce sobre todo en épocas estivales, cuando existe menor disponibilidad de recursos, la Costa del Sol se posiciona como foco esencial para el análisis de la gestión de recursos hídricos, especialmente en el contexto del cambio climático.

En la actualidad, el cambio climático es uno de los desafíos más críticos a los que la humanidad se está enfrentando. A pesar de que algunos de sus efectos se han percibido durante varios años, se observa un aumento en la claridad de las proyecciones para las décadas venideras. Se prevé un incremento en la frecuencia y severidad de eventos extremos, con precipitaciones intensas y agravamiento de inundaciones. Además, se anticipan, a partir de un aumento de 2°C en la temperatura, sequías agrícolas y ecológicas más frecuentes y/o graves en Europa, entre otros continentes. (IPCC, 2023).

Las sequías son eventos climáticos de naturaleza compleja, caracterizados por múltiples factores desencadenantes que operan en diversas escalas espaciales y temporales. Como resultado de esta complejidad, no existe una definición universalmente aceptada de sequía en la literatura científica (Raposo *et al.*, 2023).

Sin embargo, en la mayoría de las definiciones, la sequía se describe como un periodo de tiempo, generalmente superior a 1 año, durante el cual se produce un déficit hídrico que tiene un impacto adverso en la garantía de suministro de las diferentes demandas de agua (Hisdal *et al.*, 2001).

Además de la complejidad en términos de su definición, las sequías también resultan difíciles de identificar en cuanto a su inicio, duración y finalización, a pesar de que sean evidentes tras un largo periodo sin precipitaciones (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Debido a esta dificultad, varios autores han desarrollado técnicas de análisis y seguimiento de las sequías, entre ellos los índices de sequía.

La creciente demanda de recursos hídricos, ocasionada tanto por el crecimiento demográfico como por el incremento de sequías derivadas al cambio climático, ha dado lugar a una mayor explotación de los acuíferos. Este fenómeno, a su vez, ha

incrementado la vulnerabilidad a la contaminación de los mismos y a procesos de intrusión marina. Por ello, es fundamental indagar más en el conocimiento sobre la problemática asociada a la calidad del agua, especialmente en un contexto de incremento de la utilización de las aguas subterráneas y disminución de la recarga natural, ya que se pueden producir procesos de intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros (Argamasilla *et al.*, 2017).

A partir del año 2000, la mejora tanto en términos cuantitativos como cualitativos de las masas de agua subterránea se ha convertido en un objetivo medioambiental prioritario, establecido en el artículo 4 de la Directiva Marco Europea del Agua (DMA). Dicho objetivo plantea alcanzar el “buen estado de las aguas europeas” en tres ámbitos: físico-químico, hidromorfológico y biológico.

1.2. Justificación

El presente documento se ha elaborado como Trabajo Fin de Máster (TFM) para la 15ª edición del Máster Universitario en Recursos Hídricos y Medio Ambiente, realizado en el centro tecnológico CETAQUA-Andalucía, en el marco del proyecto europeo “Preventing Groundwater Contamination Related To Global And Climate Change Through A Holistic Approach Based On Managed Aquifer Recharge”, con el acrónimo “MAR2PROTECT”. Este proyecto, liderado por la Asociación para la Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ciencias y Tecnología en la Universidad NOVA de Lisboa, con la participación de organismos pertenecientes a diferentes países, entre los que se encuentra España, tiene como objetivo proporcionar un enfoque holístico para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas por los impactos del cambio climático y el cambio global, mediante diferentes tecnologías. Como núcleo innovador tiene el sistema de soporte de decisiones M-AI-R (M-AI-R-DSS), que utiliza técnicas basadas en inteligencia artificial para aumentar la eficiencia de la recarga gestionada de acuíferos y apoya a los tomadores de decisiones en todos los pasos, desde el diseño hasta la operación para rendir evaluación.

Una de las herramientas innovadoras a desarrollar es la REACH *tool*, que presentará tres enfoques (modelización, análisis retrospectivo de datos y una parte de GIS sobre mapas de vulnerabilidad para recarga). Dicha herramienta permitirá evaluar diferentes tipos de riesgo de contaminación bajo escenarios de cambio climático y cambio global.

Con este TFM se pretende contribuir al análisis retrospectivo de datos históricos de variables tanto cualitativas como cuantitativas de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona (sitio de demostración del proyecto en España) para analizar su deterioro asociado a eventos de sequía provocados por el cambio climático.

1.3. Antecedentes

La masa de agua subterránea Marbella-Estepona ha sido objeto de estudio durante muchos años debido a su importancia para el abastecimiento de toda la Costa del Sol Occidental. A continuación, se presentan las contribuciones científicas más recientes y relevantes.

En el tomo 2 del Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga se dedica un capítulo a la masa de agua subterránea objeto de estudio (Lupiani, 2007). Se detallan las características hidrogeológicas de los acuíferos que conforman la masa de agua subterránea Marbella-Estepona y aspectos relacionados con el sistema de abastecimiento.

En la tesis doctoral de Manuel Argamasilla (2017) se realizó un estudio detallado de los acuíferos detríticos costeros de Marbella-Estepona. Adicionalmente, se elaboró una propuesta de sistema de indicadores de sequía en la Costa del Sol Occidental.

Fuera del marco académico, entidades como CETAQUA han dedicado varios años a la investigación de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona. Esto ha incluido investigaciones relacionadas con pruebas de recarga artificial de acuíferos, así como predicciones a futuro de la disponibilidad de recursos basadas en índices climáticos.

En lo relativo a la identificación de sequías a partir de índices climáticos, se ha recopilado información sobre las bases metodológicas de cálculo de estos índices y algunos artículos en los que se muestra su aplicación. En concreto, se han utilizado dos trabajos principales correspondientes a la metodología usada para el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación, en inglés *Standardized Precipitation Index (SPI)* y del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración, en inglés *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)*.

El trabajo de Mckee *et al.* (1993) recoge toda la metodología sobre el SPI, en la que también se describe una clasificación para los tipos de sequía en función de los valores de este índice. Además, se ha consultado una guía de usuario sobre dicho índice proporcionada por la Organización Meteorológica Mundial, en inglés *World Meteorological Organization (WMO)*, en la cual se ha obtenido información sobre el *software* necesario para su cálculo, desarrollado por el Centro Nacional de Mitigación de Sequías, en inglés *National Drought Mitigation Center (NDMC, 2018)* de la Universidad de Nebraska.

Para la metodología sobre el SPEI se ha consultado el trabajo de Vicente-Serrano *et al.* (2010). En cuanto al *software* utilizado para el cálculo del índice se ha obtenido información del manual ofrecido por los autores del índice (Vicente-Serrano *et al.*, 2009).

Respecto a los artículos de aplicación de estos índices se ha tomado como referencia principal el trabajo expuesto por Tirivarombo *et al.* (2018), en el que se hace un análisis del SPI y SPEI a diferentes escalas temporales en la cuenca de Kafue, en Zambia. Estos autores llevaron a cabo una comparación entre ambos índices en la identificación de sequías. También se han consultado otros trabajos en relación con dichos índices con objeto de investigar sobre los umbrales utilizados para categorizar las sequías (Rhee *et al.*, 2017, Dikshit *et al.*, 2021, Laimighofer *et al.*, 2022).

Por último, se han consultado informes de sequía de actualidad elaborados por confederaciones hidrográficas, en los cuales se usa el SPI como indicador de sequía en las demarcaciones hidrográficas (CAPADR, 2023; CHG, 2023). Estos informes se realizan en función a lo establecido al Plan Especial de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía (PES).

En el PES de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía, la zona de estudio se ubica en la Unidad Territorial de Sequía UTS 03, denominada “Cuencas vertientes al mar entre las desembocaduras de los ríos Guadiaro y Guadalhorce. En el PES (2021) se ha calculado un único SPI a partir series de precipitación simuladas a partir de datos disponibles en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), pero este está calculado hasta 2017.

Para poder desarrollar este trabajo relacionado con la evaluación del posible deterioro cualitativo de la zona de estudio se ha podido contar con un informe en proceso de revisión, proporcionado por CETAQUA. En dicho informe (CETAQUA, 2023) se realiza un análisis del deterioro temporal debido a eventos de sequía en determinadas masas de agua superficial de Galicia, que se ha tomado como referencia para las correlaciones entre parámetros físico-químicos del agua e índices climáticos.

1.4. Objetivos

Los objetivos perseguidos con la ejecución de este Trabajo Fin de Máster son:

- Realizar un análisis comparativo de dos índices climáticos (SPI y SPEI) en diferentes estaciones meteorológicas en la Costa del Sol Occidental.
- Identificar periodos de sequía a partir de los índices climáticos generados.
- Evaluar el posible deterioro del estado cualitativo y cuantitativo en la masa de agua subterránea Marbella-Estepona asociado a periodos de sequía detectados por los índices climáticos.

1.5. Estructura de la memoria

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) se estructura principalmente en tres grandes bloques: una metodología que describe en detalle todo el procedimiento de ejecución del trabajo; una caracterización de la zona de estudio, que proporciona información relevante sobre la misma; y, finalmente, un análisis exhaustivo orientado al logro de los objetivos planteados.

2. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos marcados se han llevado a cabo los trabajos que se describen a continuación.

2.1. Recopilación bibliográfica

El proceso de recopilación de bibliografía se ha basado en la búsqueda de trabajos científicos (artículos, atlas, actas de conferencias, informes, tesis) relacionados con la geología, hidrogeología y funcionamiento del sistema de abastecimiento de la zona de estudio. Algunos informes, con información más técnica para el desarrollo del trabajo, han sido proporcionados por CETAQUA.

2.2. Recopilación de datos

2.2.1. Datos meteorológicos

Se han podido recopilar datos climáticos (precipitación y temperatura) de ciertas estaciones en la zona de estudio gracias al libre acceso a las bases de datos del Sistema Automático de Información Hidrológica de la Red Hidrosur (SAIH), del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) y de la Red de Alerta e Información Fitosanitaria de la Junta de Andalucía (RAIF) de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo sostenible de la Junta de Andalucía, y por otro lado, de la red secundaria de la AEMET, con el acceso que posee el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA) para la descarga de datos.

2.2.2. Datos hidrogeológicos

Los datos hidrogeológicos utilizados en este trabajo han sido los niveles piezométricos de 28 puntos. De estos, 15 han sido obtenidos del portal web que ofrece el Ministerio para la Transición Ecológica en la red de seguimiento piezométrico y los otros 13 han sido proporcionados por HIDRALIA, Gestión Integral de Aguas de Andalucía, S.A., que es la empresa encargada de la gestión del agua en Marbella y Estepona.

2.2.3. Datos de estado cualitativo

Los datos correspondientes al estado cualitativo de la masa de agua subterránea objeto de estudio se han obtenido del portal de la Junta de Andalucía, con el formulario de consulta de resultados analíticos de la Red DMA (Directiva Marco del Agua).

2.2.4. Datos cartográficos

Gran parte de los archivos *shapefile* generados para el desarrollo y la representación de mapas del presente trabajo se han elaborado a partir de archivos descargados del portal de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA), creado por la Junta de Andalucía. También se ha utilizado el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Además de estos sitios web, se ha trabajado con la capa del límite de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona facilitada por CETAQUA.

2.3. Análisis y tratamiento de datos

2.3.1. Mapas

Para la elaboración de los mapas se ha utilizado el programa QGIS, que es un Sistema de Información Geográfica de libre acceso y de código libre gratuito. Este *software* permite utilizar numerosas herramientas para el tratamiento, edición, publicación y diseño de la información geográfica entre otras aplicaciones. Para la generación de la capa de la red piezométrica se ha utilizado la herramienta Google Earth Pro, la cual ha permitido ubicar cada piezómetro y obtener sus correspondientes coordenadas.

2.3.2. Análisis climático

El análisis de las series de datos climáticos se ha iniciado con el completado de las mismas y posterior tratamiento con el programa Trasero 2.0 (Padilla y Delgado, 2013). Este *software*, de acceso libre, permite tratar y gestionar series temporales de datos hidrometeorológicos así como realizar análisis estadísticos descriptivos y estudios climáticos a partir de las mismas.

Con el programa Trasero se ha calculado también la evapotranspiración potencial, mediante el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), a partir de las series de precipitación y temperatura completadas y corregidas. Se han seleccionado seis estaciones representativas de la zona de estudio.

2.4. Índices climáticos

Para este trabajo se han usado dos índices climáticos, el SPI (Mckee *et al.*, 1993) y el SPEI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). El primero tiene en cuenta sólo la precipitación mientras que el segundo tiene en cuenta la temperatura, más concretamente la evapotranspiración potencial.

2.4.1. SPI

Consideraciones sobre el SPI

El Índice Estandarizado de Precipitación o *Standardized Precipitation Index* (SPI por sus siglas en inglés) fue desarrollado por los científicos estadounidenses McKee, Doesken y Kleist en 1993 en la Universidad Estatal de Colorado. Se trata de un índice potente, flexible y sencillo de calcular, ya que para su cálculo el único parámetro requerido es la precipitación. Además, es efectivo para el análisis de periodos y ciclos húmedos como de los secos. Sin embargo, la ventaja de que sólo requiere un parámetro es también un inconveniente, ya que no tiene en cuenta ningún componente de equilibrio entre el agua y el suelo y por tanto no se puede calcular ninguna relación de evapotranspiración/evapotranspiración potencial (ET/ETP).

El índice SPI permite identificar, evaluar y monitorizar el progreso de la sequía en el rango de escalas temporales (Smakhtin y Hughes, 2007).

Para el cálculo del SPI es aconsejable disponer de al menos 20 años de datos, aunque sería óptimo y preferible contar con un periodo mayor, de 50 y 60 años, o más, de acuerdo con la guía del usuario sobre este índice de la Organización Meteorológica Mundial (2012). Dicha guía proporciona todos los aspectos a tener en cuenta en relación con el SPI.

El SPI es más fiable cuantos menos datos faltantes existan en las series de datos requeridas por dicho índice, por lo que es conveniente aplicar técnicas de estimación para rellenar los huecos de los registros. El hecho de que normalmente no existan series largas y completas de registro hace que se tengan en cuenta las limitaciones estadísticas de los fenómenos extremos al trabajar con periodos de registro más cortos, por lo que el usuario debe decidir la tolerancia de datos faltantes que están dispuestos a incorporar en los cálculos y análisis del SPI.

Cálculo del SPI

El cálculo de este índice se basa en el registro de las precipitaciones a largo plazo para un periodo determinado. Dicho registro debe ajustarse a una distribución de probabilidades y posteriormente transformarse en una distribución normal de modo que el SPI medio para una determinada localidad y periodo sea cero.

Cuando la precipitación es mayor que la mediana los valores del SPI son positivos y cuando es menor son negativos. El hecho de que esté normalizado permite que se puedan representar climas húmedos y secos del mismo modo.

En la actualidad existen varios programas y herramientas informáticas para el cálculo automático del SPI. Algunos de ellos son más complejos, ya que requieren conocimiento de lenguajes de programación como Python R o MATLAB. Sin embargo, existen programas que no requieren dichos conocimientos y que son de fácil uso. Entre

estos últimos se encuentran programas como el SPI_SL_6, con última actualización en 2018, que es un ejecutable desarrollado por el Centro Nacional de Mitigación de Sequías (*National Drought Mitigation Center, NDMC*) de la Universidad de Nebraska en Estados Unidos. En 2007 también se incluyó la posibilidad del cálculo del SPI en el programa SPATSIM (*Spatial and Time Series Information Modeling*), que estima espacialmente distintos índices de sequía basados en la precipitación. El *software* DrinC (*Drought Indices Calculator*) presenta una interfaz de fácil manejo para el cálculo de varios índices relacionados con análisis meteorológicos, hidrológicos y agrícolas (Tigkas *et al.*, 2015). En este trabajo, el SPI ha sido generado de forma autodidacta mediante el *software* SPI_SL_6.

El SPI puede calcularse para diferentes escalas temporales, desde 1 mes hasta 72 meses. No obstante, dependiendo de lo que se vaya a analizar es más conveniente usar una u otra escala. Sería aconsejable utilizar una escala temporal corta, entre 1 y 6 meses, para las condiciones meteorológicas y de humedad del suelo (agricultura) mientras que, para caudales fluviales, almacenamiento en reservorios y aguas subterráneas es preferible utilizar periodos de más larga duración, de entre 6 y 24 meses.

En este TFM se utiliza el SPI a escala de 12 meses (SPI₁₂). Para ello se han convertido todas las series de datos diarios de lluvia de las estaciones a paso mensual para poder así introducirlas en el *software* y posteriormente obtener el SPI a escala mensual. Es cierto que se pueden introducir en el programa series diarias, pero esto hace que se reduzca el periodo de registro porque el archivo .csv que se introduce debe empezar en el mes de enero de un año en particular y acabar en el mes de diciembre de otro, por lo que ha sido más recomendable pasar todo a mensual y así no desaprovechar datos de registro.

Análisis SPI

Mckee *et al.* (1993) desarrollaron un sistema de clasificación en el que se podía definir el tipo de intensidad de sequía en función de los valores del SPI (Tabla 1). Además, definieron episodios de sequía, independientemente de la escala temporal analizada, cuando el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1 o inferior, y finaliza cuando alcance de nuevo valores positivos. De esta manera todos los episodios de sequía presentan una duración (definida por su comienzo y final), una intensidad (para cada mes que continúa el episodio) y una magnitud (la suma positiva del SPI para todos los meses del episodio).

2,0 y más	extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	muy húmedo
1,0 a 1,49	moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	moderadamente seco
-1,5 a -1,99	severamente seco
-2 y menos	extremadamente seco

Tabla 1. Sistema de clasificación de la intensidad de la sequía en función del valor del SPI (tomado de la Guía de Usuario del SPI de la Organización Meteorológica Mundial).

Además, el criterio de estos autores permite que se pueda determinar la rareza de una sequía actual y la probabilidad de la precipitación necesaria para que finalice la sequía. También permite comparar de manera fiable los resultados de sequías históricas y actuales entre localidades climáticas y geográficas diferentes (Tabla 2).

SPI	Categoría	Número de veces en 100 años	Severidad del episodio
0 a -0,99	Sequía leve	33	1 en 3 años
-1,00 a -1,49	Sequía moderada	10	1 en 10 años
-1,5 a -1,99	Sequía severa	5	1 en 20 años
< -2,0	Sequía extrema	2,5	1 en 50 años

Tabla 2. Probabilidad de ocurrencia de sequía en función del valor del SPI (tomado de la Guía de Usuario del SPI de la Organización Meteorológica Mundial).

2.4.2. SPEI

Consideraciones sobre el SPEI

Este índice fue desarrollado en 2010 por un conjunto de autores, Sergio M. Vicente-Serrano, Santiago Beguería y Juan I. López-Moreno. Este tipo de índices que no tienen en cuenta únicamente la precipitación son preferibles para aplicaciones que involucran escenarios climáticos futuros, para monitorear y explorar las consecuencias del calentamiento global en condiciones de sequía, aunque no siempre se acepta la inclusión de la evapotranspiración potencial ya que a veces no se comprende bien o se subestima.

Además, existen otros índices que también incluyen la temperatura, como el PDSI (Palmer, 1965) pero que carecen del carácter multiescalar necesario para evaluar la sequía en distintos sistemas hidrológicos y para diferenciar entre los tipos de sequía (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Por ello, estos autores crearon el SPEI, que en comparación con el SPI y el PDSI, tiene la ventaja de que combina el carácter multiescalar con la capacidad de incluir efectos de la variabilidad de la temperatura en la evaluación de la sequía.

El SPEI combina la sensibilidad del PDSI a los cambios en la demanda de la evaporación por parte de la atmósfera (debidos a las fluctuaciones y tendencias de la temperatura) con la simplicidad de cálculo y naturaleza multitemporal del SPI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

Cálculo SPEI

Se calcula de manera similar al SPI con la salvedad de que se introduce un balance hídrico climático, incluyendo la temperatura. Se calcula utilizando series mensuales o semanales de la diferencia de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP) como señal de entrada. Se trata simplemente de un balance de agua que es calculado a diferentes escalas de tiempo.

Uno de los inconvenientes que presenta el cálculo de la ETP es la necesidad de contar con varios parámetros, como la humedad del aire, la radiación, entre otros. Sin embargo, en el cálculo del SPEI propuesto por los autores se ha utilizado el método de Thornthwaite, en el que sólo se requiere la temperatura mensual media y la latitud.

Para el cálculo del índice SPEI se ha utilizado el *software* (SPEI Calculator) que proporciona el autor, desarrollado en 2009 y publicado en 2010 junto con el artículo sobre dicho índice (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Hay que utilizar la consola del ordenador para instalar un ejecutable que no presenta ninguna interfaz. Hay que introducir archivos .csv en la consola con el formato que indica el autor en el manual (spei_manual) y posteriormente se obtienen las series de SPEI. En estos archivos hay que introducir la latitud y la temperatura media de cada estación. En este caso, como no todas las estaciones meteorológicas cuentan con datos de temperatura, se han escogido las temperaturas de las estaciones más cercanas.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Ámbito geográfico

La zona de estudio de este trabajo corresponde a la masa de agua subterránea Marbella-Estepona (M.A.S. 060.040). Se localiza en la Costa del Sol de Occidental, provincia de Málaga, al sur de Andalucía, y se extiende, con una superficie de aproximadamente 22 km², a lo largo de la franja costera, de oeste a este, por los términos municipales de Manilva, Casares, Estepona, Benahavís, Marbella y Mijas (Figura 1). A su vez, quedan englobados parcialmente numerosos núcleos urbanos como San Luis de Sabinillas, El Padrón, Nueva Atalaya, Guadalmina, San Pedro de Alcántara, Nueva Andalucía, Istán, Ojén, Río Real, Elviria, y La Cala, entre otros.

En su parte septentrional, queda delimitada por la cadena montañosa que va desde la Sierra Bermeja (parte occidental) hasta las estribaciones meridionales de la Sierra Alpujata (parte oriental), pasando por Sierra Blanca. Estos relieves contrastan con el litoral costero, caracterizado por la ausencia de elevadas pendientes.

La masa de agua subterránea Marbella-Estepona queda incluida en las siguientes hojas del Mapa Geológico Nacional (1:50.000): 1071 (Jimena de la frontera), 1072 (Estepona), 1065 (Marbella), 1066C (Coín), y 1066 (Coín) de la serie MAGNA.

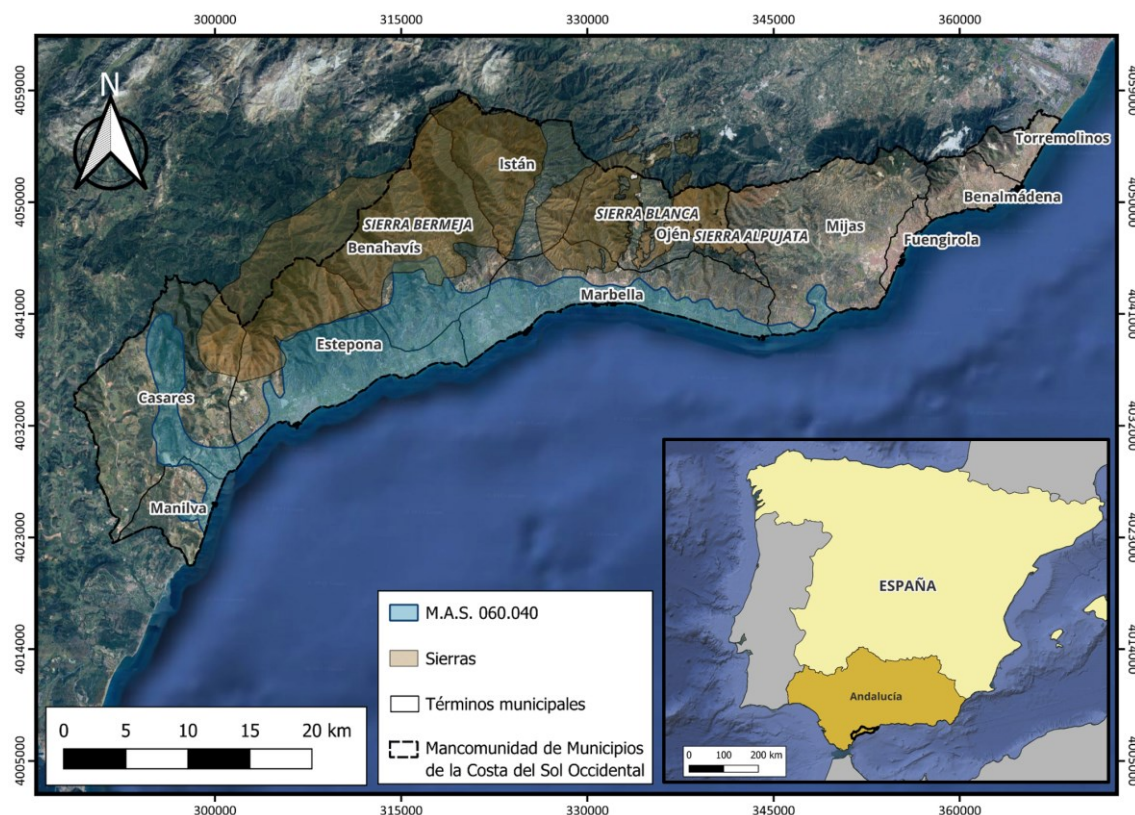


Figura 1. Localización geográfica de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona (M.A.S. 060.040) dentro de la Mancomunidad de Municipios de la Costa del Sol Occidental.

3.2. Hidrometeorología

3.2.1. Generalidades sobre la dinámica de las precipitaciones y la temperatura a escala regional

Según el sistema de clasificación climática propuesto por Köpen-Geiger, el área de estudio queda incluida dentro de un clima templado con verano seco y caluroso, con código "Csa" (Köppen, 1936). Esta tipología se caracteriza por tener un clima templado y húmedo a la vez que temperaturas medias comprendidas entre -3 y 18°C en el mes más frío y superiores a 10°C en el mes más cálido, además de tener inviernos templados y veranos calurosos, con una temperatura media del mes más cálido por encima de los 22°C.

La latitud, la proximidad al mar y el relieve de la provincia de Málaga son factores fundamentales a la hora de valorar el clima en esta región (Senciales, 2007). El primero es común a toda la provincia y le confiere a la misma una elevada tasa de insolación ya que la zona se encuentra relativamente cercana al Trópico de Cáncer y la gran incidencia solar durante todo el año hace que las temperaturas sean cálidas. La proximidad al Mar Mediterráneo, caracterizado por ser más cerrado y cálido que el Océano Atlántico, le confiere a la zona de estudio una mayor presencia de vapor de agua y, con ello, una mayor regulación térmica. De esta manera, los valores extremos de temperaturas asociadas a la latitud de la zona son reducidos. Por último, el relieve juega un papel fundamental en la distribución de las precipitaciones, ya que las sierras de la zona hacen un efecto de barrera para la entrada de los frentes atlánticos. Estos vientos cargados de humedad, al chocar con los relieves, se elevan rápidamente y se enfrían hasta que se condensa la gran cantidad de vapor de agua y descargan en forma de lluvia (Pérez *et al.*, 2014). Las sierras que actúan como barrera son la serranía de Ronda, la Sierra de las Nieves y Sierra Blanca.

El régimen climático de la comunidad autónoma andaluza se caracteriza por una irregularidad de las precipitaciones tanto temporal, ya que en la época estival las lluvias son casi inexistentes y se concentran en otoño e invierno, como espacial, dado que disminuyen de forma generalizada de oeste, con valores máximos de precipitación anual registrados en la Grazalema, en la provincia de Cádiz (zona hiperhúmeda), a este, con valores inferiores a 200 mm en Cabo de Gata, provincia de Almería (zona árida) (Senciales, 2007). En lugares intermedios entre estos dos extremos, como la provincia de Málaga, ocurre una marcada transición pluviométrica (Figura 2).

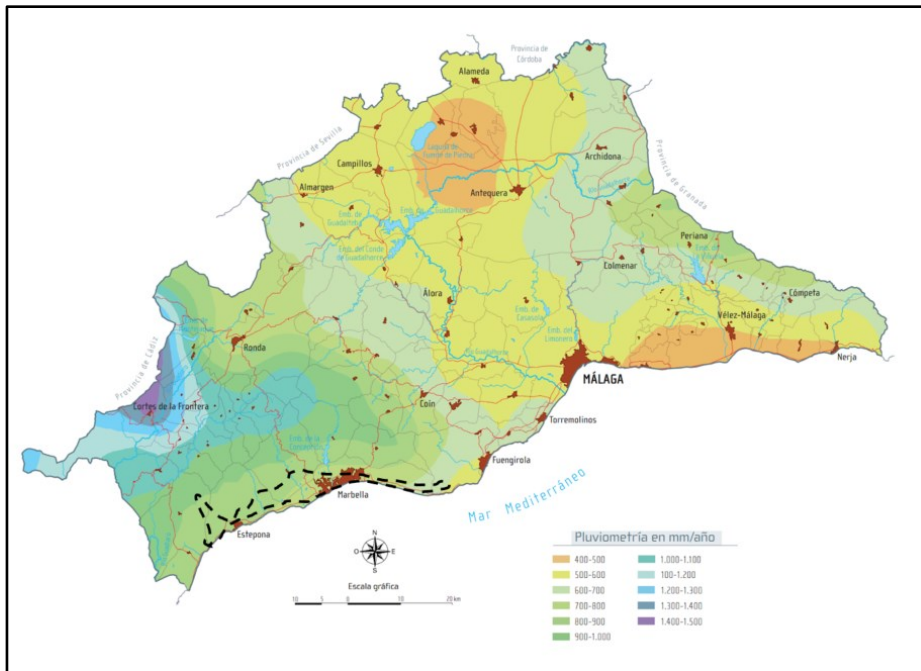


Figura 2. Mapa de las precipitaciones de la provincia de Málaga (modificado de Senciales, 2007), en el que se indica la ubicación de la zona de estudio (línea discontinua de color negro).

Existe un gradiente longitudinal en el área de estudio, de oeste a este, con precipitaciones medias entre los 800 y 900 mm por la zona de Estepona, que descienden hasta los 600 mm, en el sector de Mijas. Las temperaturas medias anuales son de 12 a 14 °C (Figura 3).

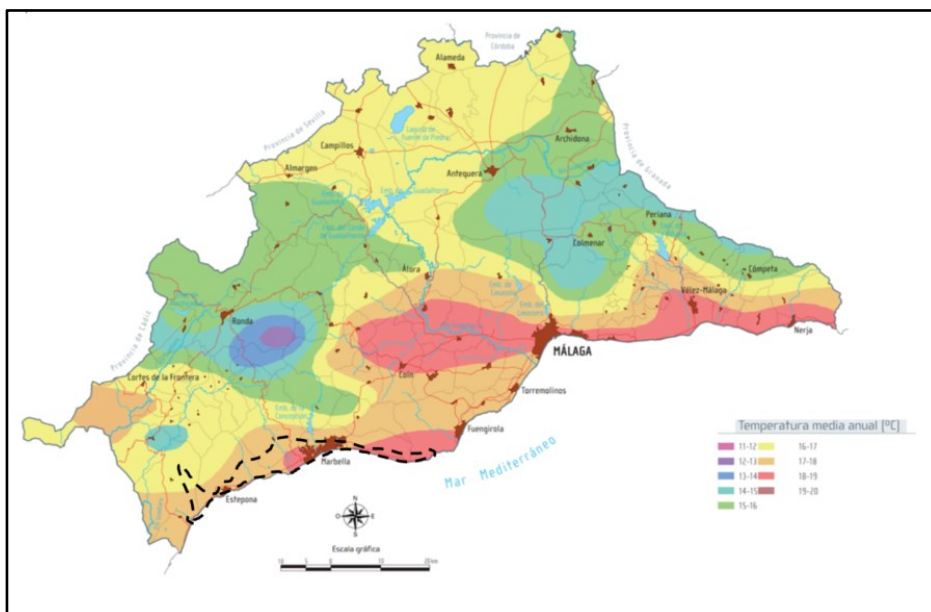


Figura 3. Mapa de temperatura media anual de la provincia de Málaga (modificado de Senciales, 2007), en el que se indica la ubicación de la zona de estudio (línea discontinua color negro).

3.2.2. Análisis de las series históricas de precipitación correspondientes al periodo 1994/95-2021/22

3.2.2.1. Análisis y tratamiento de datos

Para llevar a cabo el estudio pluviométrico del área de estudio se ha realizado un análisis exhaustivo sobre las series de datos de las estaciones meteorológicas disponibles. En una primera aproximación se consideraron 43 estaciones, pero debido a la escasa longitud y continuidad de sus series de datos y a su distribución espacial se hizo una reducción considerable. En el anexo I se pueden observar todas las estaciones meteorológicas que se descartaron.

La red de control pluviométrico considerada consta de 12 estaciones meteorológicas. Hay que tener en cuenta que, para este análisis, una vez realizado el correspondiente completado y tratamiento de las estaciones, los datos de las estaciones de Manilva (6057X) y San Luis de Sabinilla (6057), se han unificado en una sola denominada "Manilva" (6057X-6057). Esto se ha podido realizar debido a que las dos estaciones están muy cercanas, prácticamente los datos finales coinciden con los iniciales de la otra y además presentan una distribución pluviométrica similar. Algo parecido ocurrió con las estaciones de San Pedro de Alcántara (6072) y San Pedro de Alcántara Guadalmina (6072A). En este caso, no se trató de una fusión, sino que se intentó complementar la segunda estación con los datos de la primera. Sin embargo, finalmente se optó por completar la estación 6072A utilizando datos de otras estaciones que mostraban una correlación más alta.

Al final, la red de control se simplifica hasta un total de 10 estaciones meteorológicas. De ellas, 4 pertenecen a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), concretamente a la Red de Estaciones Secundarias, 4 están integradas en la red del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA), 1 es propiedad de la Red de Alerta e Información Fitosanitaria (RAIF) de la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Sostenible, y otra del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), integrado en la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía.

En la Tabla 3 se pueden observar las características principales de cada una de ellas y en la Figura 4 su ubicación geográfica. En general, la distribución de la red de control presenta una regularidad espacial en la zona de estudio, aunque hay más representación en las zonas urbanas. En conjunto, la red de estaciones pluviométricas existente abarca un rango altitudinal que se extiende desde 6 m s.n.m (Marbella Puerto Banús a 1450 m s.n.m (Los Reales), aunque esta última es la única que queda por encima de los 500 m s.n.m.

Referencia	Estación pluviométrica	Municipio	Coordenadas UTM (m)		Altitud (m s.n.m)	Periodo de registro	Red	Nº de años registro	Nº de años incompletos
			X	Y					
6057X	Manilva	Manilva	297273	4028286	140	30/09/2008 - 02/07/2022	AEMET	15	2
6057	San Luis de Sabinilla	Manilva	299854	4026945	20	01/01/1965 - 31/07/2009	AEMET	38	27
RAIFMA001	Fitosanitaria	Estepona	314811	4037801	85	03/01/2001 - 07/11/2023	RAIF	23	2
RIA2904	IFAPA	Estepona	301937	4035540	185	22/11/2000 - 26/06/2023	IFAPA	24	2
6	Los Reales	Casares	302199	4039995	1450	01/10/1994 - 07/06/2023	SAIH	30	2
6069B	Benahavís	Benahavís	318786	4046169	380	01/03/1995 - 31/05/2022	AEMET	28	3
16	Embalse de la Concepción	Marbella	324530	4045029	110	01/10/1994 - 09/06/2023	SAIH	30	2
24	Depuradora	Marbella	325759	4043018	49	01/10/1994 - 11/06/2023	SAIH	30	2
6076O	Puerto Banús	Marbella	324993	4039443	6	01/01/1972 - 31/03/2022	AEMET	51	6
6072	San Pedro de Alcántara	Marbella	321292	4038655	25	01/01/1948 - 31/03/2014	AEMET	56	26
6072A	San Pedro de Alcántara - Guada	Marbella	321707	4038246	10	01/10/2005 - 31/05/2022	AEMET	18	2
17	Ojén	Ojén	336976	4048576	493	01/10/1994 - 10/06/2023	SAIH	30	2

Tabla 3. Características principales de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio.

Los periodos de registro pluviométrico de cada una de las estaciones son distintos y están comprendidos entre los 15 años (Manilva) y los 56 (San Pedro de Alcántara). Esta última cuenta con el mayor registro, pero presenta 26 años incompletos, lo que supone un 46,43%. Cabe destacar el porcentaje de años incompletos (27) de San Luis de Sabinillas, que cuenta con un registro de 38 años, por lo que tiene un 71 % incompletos. Las estaciones más modernas, pertenecientes al SAIH son las que cuentan con un menor número de años incompletos.

El análisis histórico se ha llevado a cabo para el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1994/95 y 2021/22, integrado por un total de 28 años, que es el que cuenta con una mayor continuidad de series de datos pluviométricos y mayor número de años coincidentes en las estaciones del área de estudio.

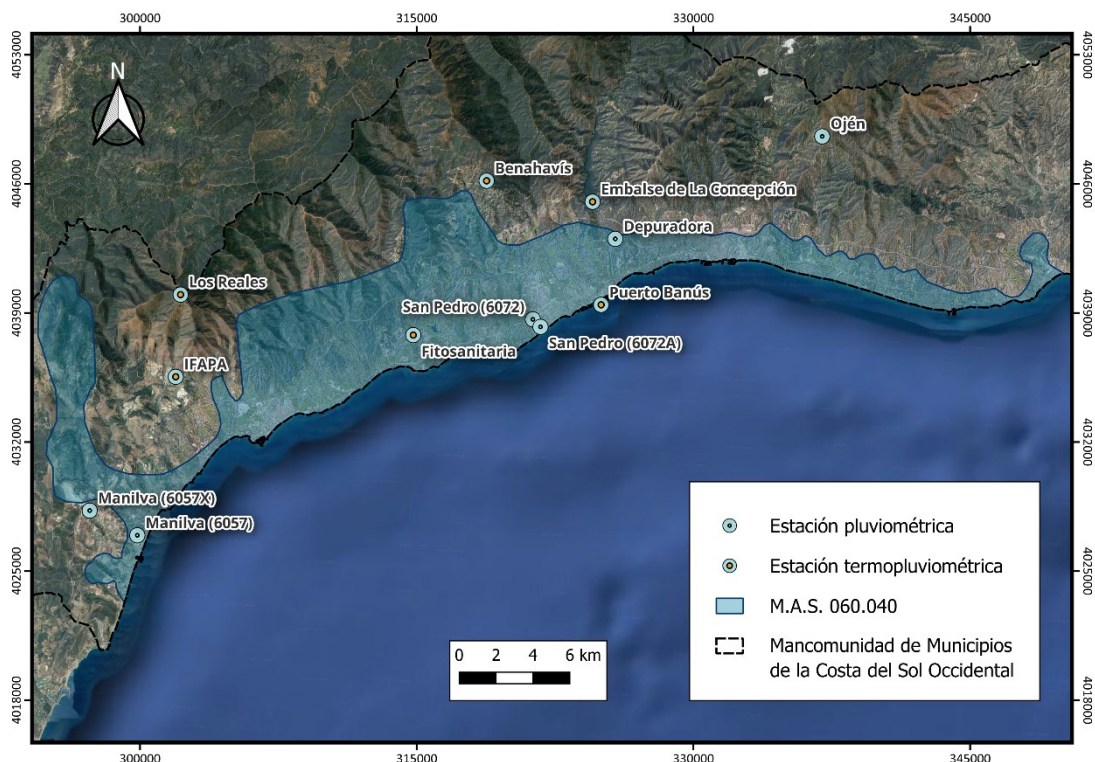


Figura 4. Mapa de situación de las estaciones meteorológicas consideradas en el área de estudio.

El primer paso en el tratamiento de los datos históricos de precipitación ha consistido en la identificación de lagunas en los registros originales, primero a paso de tiempo anual, luego mensual y posteriormente diario. Estos vacíos de información diaria han sido completados mediante regresión lineal entre pares de estaciones que presentan un mayor coeficiente de correlación. El completado ha tenido como objetivo homogeneizar las series de registro pluviométrico para poder compararlas entre sí.

Una vez completadas las series de precipitación se ha aplicado el método de dobles masas o dobles acumulaciones para comprobar la existencia de errores accidentales o sistemáticos. Este método consiste en la comparación de las series de precipitación anual acumulada de cada estación con, en este caso, la media de todas las estaciones. Se han detectado un error accidental en el año 2009/10 en la serie de Los Reales y se ha corregido con la media de las estaciones.

3.2.2.2. Precipitación media anual. Determinación de años tipo

El cálculo de la precipitación media se ha realizado a partir de los datos registrados en las 10 estaciones seleccionadas finalmente para el periodo 1994/95 - 2021/22. La precipitación media aritmética obtenida en la zona de estudio es de 694 mm.

Para determinar el tipo de año hidrológico (húmedo, seco, medio) durante el periodo de estudio se han usado los datos medios anuales de pluviometría. Los años en los que la lluvia registrada sobrepasa, al menos, un 15% el dato medio anual se ha considerado como año húmedo. Los que lo presentan un valor inferior al 85% del mismo, años secos. Y todos los años que presentan una precipitación comprendida en el intervalo definido por los tipos seleccionados, se han considerados como años medios. En la Tabla 4 se muestran los años tipo para cada una de las estaciones pluviométricas, diferenciados por colores: azul para el año húmedo, el amarillo para el seco y el blanco para el tipo medio.

Año hidrológico	Los Reales	IFAPA	Fitosanitaria	Benahavis	Embalse de la Concepción	Depuradora de Marbella	San Pedro de Alcántara	Ojén	Manilva	Puerto Banús	Media anual (mm)
1994/95	228,5	387,56	222,1	314,07	113,6	108	333,73	126,5	274,82	248,64	236
1995/96	55,1	318,63	166,58	1465,8	46,4	52,6	1178,02	42,1	1344,98	1158,69	583
1996/97	1120,1	1355,59	1146,58	1491,1	1053,7	1023,4	1140,67	1241,9	1313,8	1119,41	1201
1997/98	658,4	949,42	857,03	1101,4	659,4	736,8	788,11	884,4	874,63	741,52	825
1998/99	628	665,16	489,8	470,2	383,5	373,1	437,97	422	428	361,74	466
1999/00	666,7	654,48	494,34	742,8	372,4	377,3	592,92	406,6	571,16	526,55	541
2000/01	1170	963,16	775,45	860,79	771,8	732,7	755,95	1012,6	664,11	703,74	841
2001/02	687,8	739,4	624,8	709,4	420,1	425,9	520,84	609,9	712,7	448,89	590
2002/03	645,4	944,2	794,4	816,5	501,2	495	739,39	634,4	758,2	685,52	701
2003/04	1008,7	955	804,8	1082,2	824,7	796	850,5	1113,4	916,58	804,45	916
2004/05	384,7	468	457,8	512,1	347,6	399,3	474,63	379,5	527,88	398,85	435
2005/06	781,1	866,8	748,46	780,8	586	588,9	694,75	701	792,38	558,61	710
2006/07	934,2	783,84	596,37	748,23	605,5	657,8	674,15	646,6	697,8	591,99	694
2007/08	895,9	1111,52	944,2	808,45	573,4	600,1	899,5	761,3	882,29	851,78	833
2008/09	919,3	635,81	612,1	711,11	525,7	607,6	522,01	579,8	591,61	538,9	624
2009/10	1297,2	1916,8	1641	1750,5	1197,6	1136,7	1471,23	1327	1580,8	1208,7	1453
2010/11	1081,2	1333	1122,6	1296,33	952,5	937,9	1130,48	1124,2	952,6	952,6	1088
2011/12	623,1	557,6	458,4	495,25	517,3	547,9	490,9	518,4	501,8	510,8	522
2012/13	666,2	1160	934,6	1117,5	756,8	751,7	804,27	837,2	848,1	752,9	863
2013/14	511,9	543,7	375	455,95	295	303	342,03	281,6	432,4	298,4	384
2014/15	697,5	741	571,6	703,45	549,6	533,8	509,58	673,1	512,4	504,9	600
2015/16	812,2	664,4	423	580,23	409,6	381,9	419,29	509,7	557,8	349	511
2016/17	725,1	1234,63	921,9	933,2	675,4	747,7	878,6	792,1	811,8	739,5	846
2017/18	894,4	918,4	599,5	737,46	679,5	550,2	567,2	781,2	594,8	532,06	685
2018/19	1110,5	778,46	440,4	743,3	504,4	469,6	439,4	797,1	403,4	387,98	607
2019/20	821,3	733,04	534,4	591,62	493	481,1	502,09	571,1	505,8	587,58	582
2020/21	717,5	704,68	538,51	596,08	499,2	461,7	521,2	320	616,4	662,95	564
2021/22	776,3	698,9	539,6	769,35	409,6	360,2	551,36	243,8	528,43	359,74	524
Media	769	849	673	835	562	558	687	655	721	628	694
Máximo	1297	1917	1641	1751	1198	1137	1471	1327	1581	1209	1453
Mínimo	55	319	167	314	46	53	334	42	275	249	236
Med * 1,15	884	977	774	960	646	642	790	753	830	722	798
Med * 0,85	653	722	572	710	477	475	584	557	613	534	590
Años húmedo	10	6	10	7	9	9	8	11	8	9	9
Años medios	11	11	5	11	10	8	6	7	7	7	7
Años secos	7	11	13	10	9	11	14	10	13	12	12

Tabla 4. Datos de precipitación anual (mm) durante el periodo 1994/95-2021/22. Años tipo: húmedo (azul), seco (amarillo) y medio (blanco).

El conjunto de datos de las estaciones meteorológicas muestra una cierta ciclicidad, en la que se alternan periodos de años húmedos, medios y secos, con una duración variable entre 2 y 4 años. Durante el periodo 1994/95-2021/22, se han contabilizado un total de 12 años secos (con precipitación menor que 590), 9 años húmedos (más de 798) y 7 años medios (entre 590 y 798), para la zona de estudio.

El año más húmedo fue 1996/97, en el que se registraron 1201 mm de lluvia. Por el contrario, el año 1994/95 fue el más seco, con una precipitación media de 236 mm. Por estaciones meteorológicas, en todas se registraron los datos pluviométricos máximos en 2009/10, aunque respecto a los mínimos, algunas lo presentaron en 1994/95 y otras en el año siguiente a este.

3.2.2.3. Distribución temporal de las precipitaciones

La evolución temporal de las precipitaciones medias anuales ocurridas en la zona de estudio durante el periodo 1994/95-2021/22 se puede observar en la Figura 5. Además, se muestra la precipitación media aritmética del conjunto de estaciones seleccionadas y la desviación de la precipitación anual acumulada con respecto a la media.

Durante el periodo 1994/95-2021/22 las precipitaciones anuales presentan una evolución temporal marcada por una alternancia de años secos, medios y húmedos. En cuanto a los periodos secos destaca el año 1994/95, que dio lugar a la mayor desviación de la precipitación anual acumulada respecto a la media de toda la serie analizada. Por el contrario, el periodo 2009/10-2010/11 fue el que más pluviometría presentó, con 1453 mm de media, lo que provocó el consecuente ascenso de la desviación anterior mencionada.

Cabe señalar que desde el año 2019/20 hasta la el final del registro, existe un periodo consecutivo de años secos, lo que produce que la desviación descienda de forma considerable.

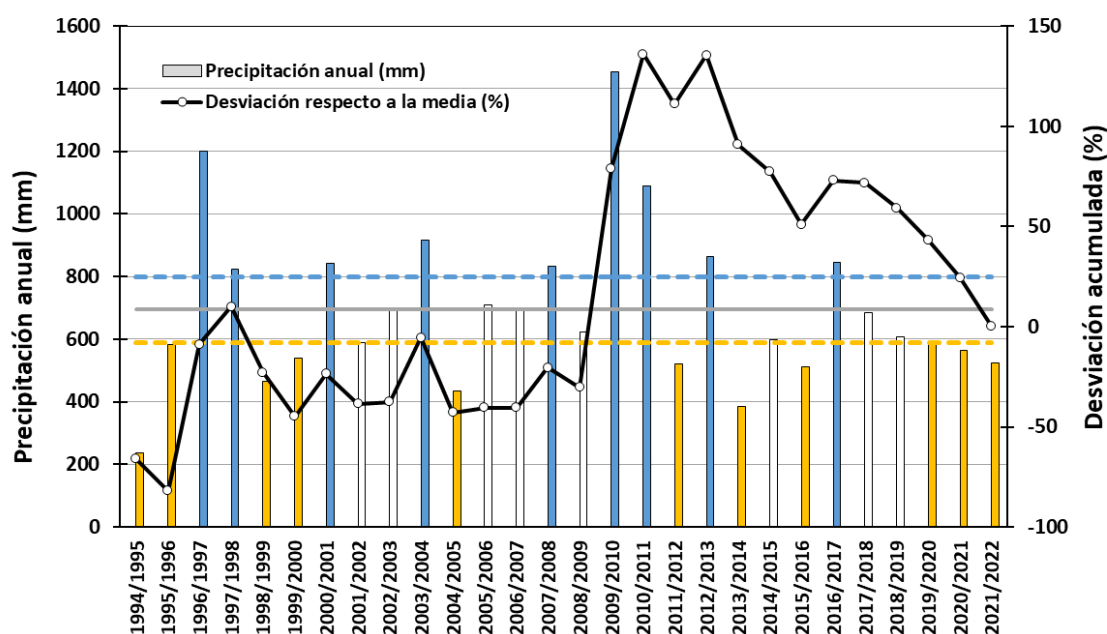


Figura 5. Distribución temporal de las precipitaciones medias anuales durante el periodo 1994/95-2021/22 y desviación de la precipitación anual acumulada respecto a la media.

El análisis de la precipitación mensual del periodo 1994/95-2021/22 (Figura 6 y Tabla 5) muestra que las lluvias se registran generalmente en los primeros meses del año hidrológico. El periodo más lluvioso va de octubre a marzo, se acumula el 80 % de las precipitaciones anuales, y diciembre es en el que se registran las mayores precipitaciones. A partir de marzo, la precipitación media acumulada tiende a permanecer constante debido a la escasez de lluvias en los meses estivales, característica del tipo de clima. Sólo se observa una ligera subida al final del año hidrológico, en el mes de septiembre.

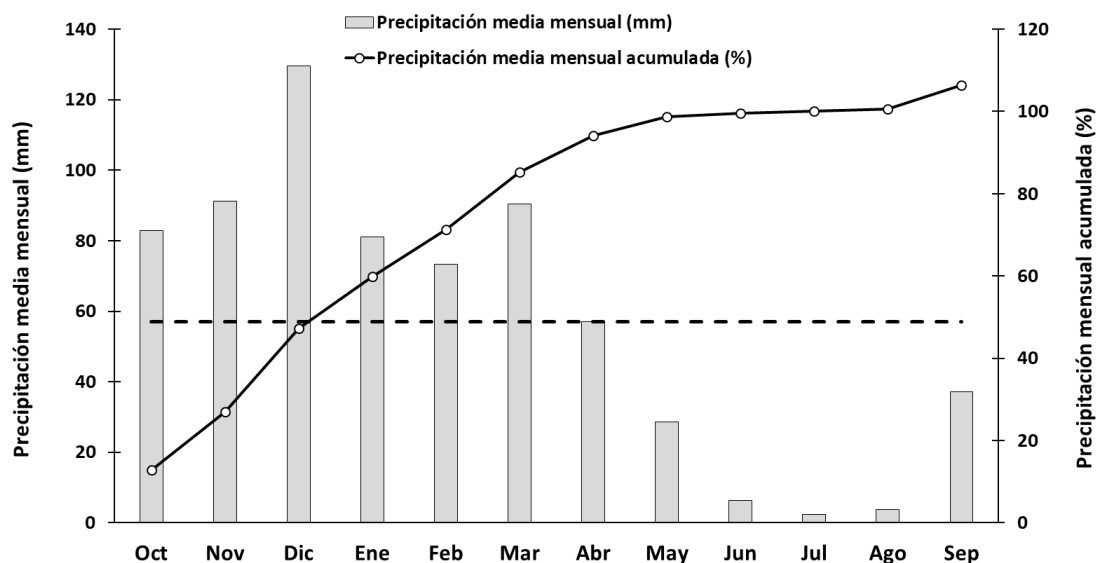


Figura 6. Valores de la precipitación media mensual y acumulada del conjunto de estaciones pluviométricas seleccionadas, durante el periodo 1994/95-2021/22.

Mes	Los Reales	IFAPA	Fitosanitaria	Benahavís	Embalse de la Concepción	Depuradora de Marbella	San Pedro de Alcántara	Ojén	Manilva	Puerto Banús	P media mensual (mm)	P media mensual acumulada (mm)	P media mensual acumulada (%)
Octubre	120	87	71	89	73	70	71	86	84	77	82,88	82,9	12,1
Noviembre	110	111	83	114	72	72	93	83	86	87	91,13	174,0	25,4
Diciembre	114	152	138	158	104	110	133	132	138	116	129,51	303,5	44,4
Enero	68	105	82	112	62	63	87	72	86	75	81,15	384,7	56,3
Febrero	71	93	74	85	62	60	68	82	77	63	73,40	458,1	67,0
Marzo	102	122	95	105	77	73	89	73	93	76	90,42	548,5	80,2
Abril	60	70	55	74	43	45	58	50	64	51	57,13	605,6	88,6
Mayo	33	35	23	39	24	22	31	28	27	25	28,69	634,3	92,8
Junio	11	10	5	5	3	2	6	4	11	6	6,28	640,6	93,7
Julio	1	6	2	1	0	0	5	0	5	1	2,31	642,9	94,0
Agosto	3	8	4	3	2	3	6	3	6	2	3,82	646,7	94,6
Septiembre	53	41	33	41	34	33	33	41	32	28	37,11	683,8	100,0
Máximo	120	152	138	158	104	110	133	132	138	116	130	-	-
Media	62	70	55	69	46	46	57	54	59	51	57	-	-
Mínimo	1	6	2	1	0	0	5	0	5	1	2	-	-

Tabla 5. Precipitaciones medias mensuales durante el periodo 1994/95-2021/22.

3.2.3. Análisis de los datos de temperatura del aire

3.2.3.1. Características generales. Datos disponibles

El análisis de los datos históricos de temperatura del aire en la zona de estudio se ha llevado a cabo a partir de los datos de 6 estaciones (Tabla 6), de las cuales 2 pertenecen al SAIH, 2 a la red secundaria de la AEMET, 1 a la RAIF y otra al IFAPA. Esta selección se ha realizado a partir de un número total de 20 estaciones, pero por el registro insuficiente de datos o por la lejanía de las mismas no se han tenido en cuenta (Anexo II).

Referencia	Estación termopluviométrica	Municipio	Coordenadas UTM (m)		Altitud (m s.n.m)	Periodo de registro	Red	Nº de años registro	Nº de años incompletos
			X	Y					
RAIFMA001	Fitosanitaria	Estepona	314811	4037801	85	01/03/2001 - 11/07/2023	RAIF	23	2
RIA2904	IFAPA	Estepona	301937	4035540	185	22/11/2000 - 26/06/2023	IFAPA	24	2
6	Los Reales	Casares	302199	4039995	1450	26/01/2012 - 07/06/2023	SAIH	12	2
6069B	Benahavís	Benahavís	318786	4046169	380	01/12/1998 - 31/05/2022	AEMET	25	14
16	Embalse de la Concepción	Marbella	324530	4045029	110	20/03/2012 - 07/06/2023	SAIH	12	1
6076O	Puerto Banús	Marbella	324993	4039443	6	01/01/1972 - 31/03/2022	AEMET	51	12

Tabla 6. Características principales de las estaciones termopluviométricas ubicadas en el área de estudio.

Todas las estaciones presentan, en mayor o menor medida, lagunas de datos, por lo que han sido completadas mediante regresión lineal. Además de la problemática de la ausencia de datos, se han detectado errores en las series de datos de temperatura de algunas estaciones (todas excepto IFAPA), en las que las temperaturas mínimas superaban a las máximas. Esto puede ser debido a errores de transcripción, o de tipo sistemático. En consecuencia, se ha procedido a corregir los datos de temperatura de algunos días por el valor promedio de los días contiguos usando el sentido común, ya que había que detectar si el valor erróneo era el de la temperatura máxima o el de la mínima. Finalmente, la estación Fitosanitaria se ha descartado ya que había demasiados errores cuando se ha completado.

3.2.3.2. Temperatura del aire a partir de las series históricas (periodo 1998/99-2021/22)

En la Figura 7 se representan las evoluciones de las temperaturas medias anuales registradas en las estaciones IFAPA, Benahavís y Puerto Banús, representativas espacialmente de la zona, durante el periodo 1999/00-2021/22. El año más cálido fue 2020 en el cual se registraron temperaturas de hasta 35,25°C en agosto de ese año en la estación de Benahavís.

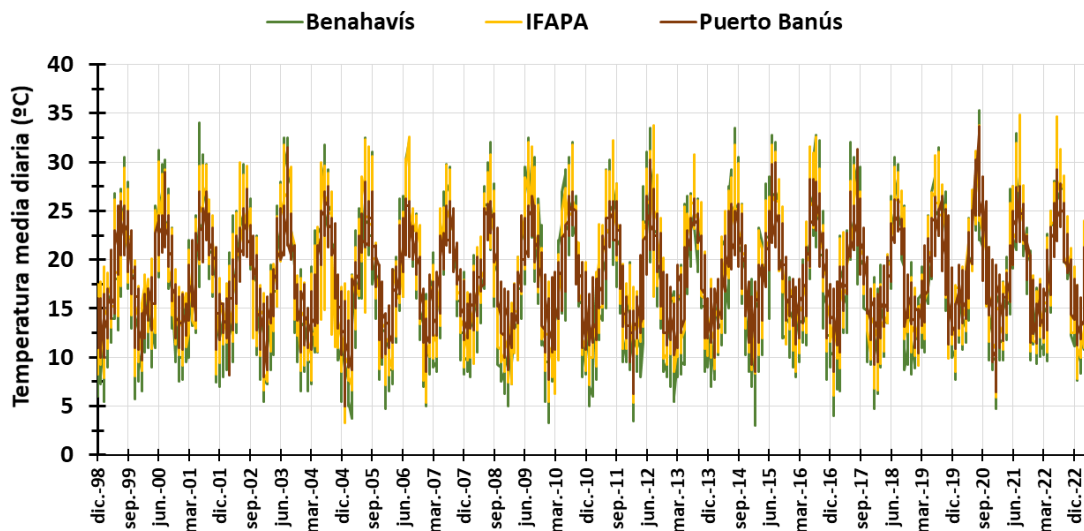


Figura 7. Evolución de los valores de temperatura media diaria en las estaciones de Benahavís, IFAPA y Puerto Banús durante el periodo 1998/99 y 2022/23.

3.2.4. Evapotranspiración potencial a partir de las series históricas (periodo 1998/99-2021/22)

En la Figura 8 se muestran las evoluciones de la evapotranspiración potencial (ETP) calculadas con series de precipitación y temperatura en seis estaciones meteorológicas. En las estaciones que carecen de registro de temperatura se ha optado por utilizar la serie de temperatura de la estación del IFAPA, debido a su proximidad geográfica y a la fiabilidad de los datos disponibles.

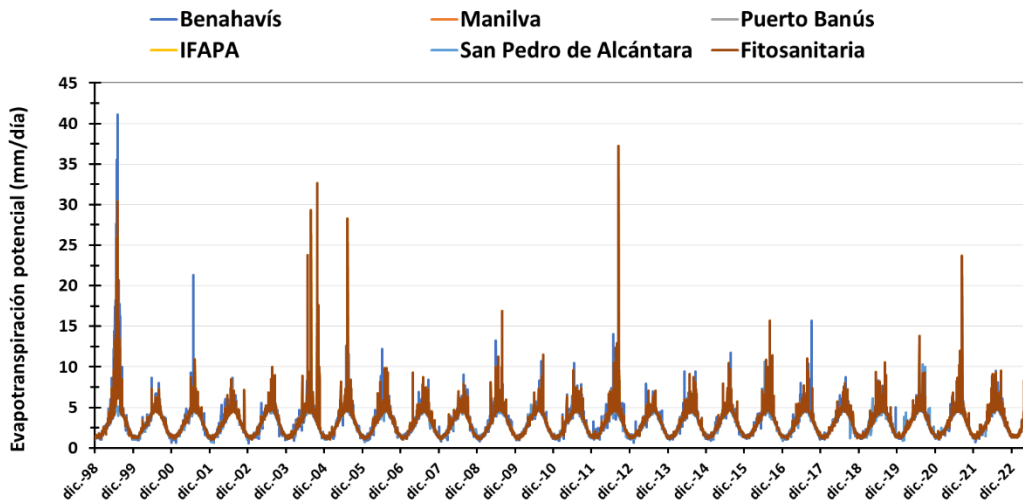


Figura 8. Evolución de los valores de evapotranspiración potencial diaria en algunas estaciones del área de estudio durante el periodo 1998/99-2022/23.

Los años en los que se registran valores notablemente superiores de evapotranspiración potencial durante el periodo de estudio son 1998/99, 2004/05, 2011/12 y 2020/21. Estos años coinciden con algunos de los periodos secos identificados en el análisis climático. En consecuencia, se evidencia una correlación entre los valores de ETP y periodos secos.

3.3. Geología

El área de estudio se encuadra dentro de la Cordillera Bética, una cadena montañosa perteneciente al conjunto de cadenas alpinas que rodean al Mediterráneo occidental (orógeno perimediterráneo occidental), formadas durante el Mioceno, como consecuencia del plegamiento y de su consiguiente emersión debido a los movimientos horizontales de fragmentos de la litosfera. La Cordillera Bética coincide con la unidad morfológica que presenta numerosos relieves montañosos y se extiende desde Andalucía hasta la Comunidad Valenciana en la Península Ibérica hasta las Islas Baleares (Vera *et al.*, 2004).

Los materiales que constituyen la Cordillera Bética, en función de la edad de las rocas que afloran y del grado de deformación que les afecta, pueden agruparse en

cuatro grandes unidades geológicas: Zonas Externas, Complejo del Campo de Gibraltar, Zonas Internas y las Cuencas Neógenas Postorogénicas (Figura 9).

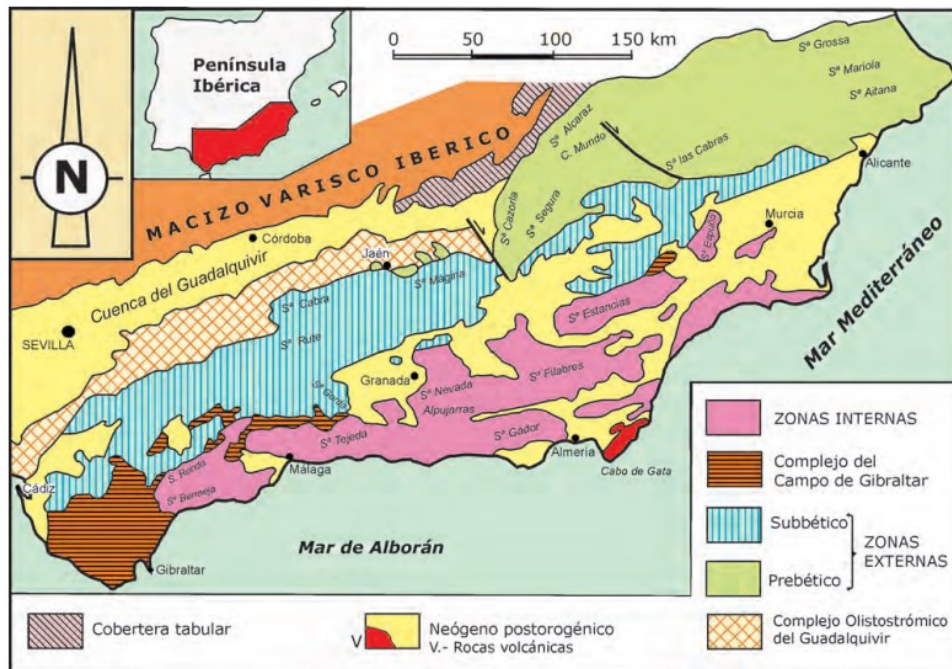


Figura 9. Mapa geológico de la Cordillera Bética (tomado de Vera, 2004).

Las Zonas Externas tienen su origen en el depósito de rocas sedimentarias, desde el Triásico hasta el Mioceno inferior, en el margen continental sudibérico deformadas por la colisión del fragmento de la subplaca Mesomediterránea, conocido como Dominio de Alborán.

Las Zonas Internas son la parte emergida de ese dominio en el sur de España, cuyos materiales continúan bajo el Mar de Alborán formando la corteza continental. Afloran rocas de sedimentarias, ígneas y metamórficas del Paleozoico, Triásico y en menor medida en algunas zonas del Mesozoico y Cenozoico.

El Complejo del Campo de Gibraltar se compone de materiales turbidíticos que fueron expulsados y trasladados durante el desplazamiento del Dominio de Alborán, y su posterior colisión, hasta ubicarse en el contacto de las Zonas Externas e Internas, con un mayor desarrollo en el Campo de Gibraltar. Esta unidad geológica está formada por lutitas y areniscas depositadas en medios marinos profundos. Aflora extensamente en la provincia de Cádiz, particularmente al sur y ocupa una amplia extensión en la provincia de Málaga (Didon, 1969).

Una vez finalizada toda la fase orogénica se generaron zonas de subsidencia en las que hubo una importante sedimentación, en gran medida formada por los productos de la erosión de los nuevos relieves emergidos. Estos materiales se denominan Cuencas Neógenas Postorogénicas debido a que los materiales que la componen son del Neógeno (Mioceno superior-Plioceno) formados posteriormente a la fase orogénica que

dio lugar a la cordillera. Las dos cuencas más extensas son la del Guadalquivir y la de Alborán, aunque existen otras de menor extensión denominadas cuencas intramontañosas. Los sedimentos de la Cuenca de Alborán son en su mayoría arcillas o margas marinas (Vera *et al.*, 2004).

Una vez descritas las principales unidades geológicas, se describen a continuación con más detalle las Zonas Internas, que constituyen el sustrato y el límite septentrional del área de estudio. Las Zonas Internas están formadas por tres grandes complejos que, de base a techo, son: Nevado-Filábride, Alpujárride y Maláguide (Serrano *et al.*, 2004).

El Complejo Nevado-Filábride está compuesto en su mayoría por rocas metamórficas, entre las que predominan los micaesquistos grafitosos, y, en menor abundancia, cuarcitas, gneises, metabasitas y mármoles.

El Complejo Alpujárride es el de mayor extensión. Está formado por materiales como micaesquistos, cuarcitas, gneises y metabasitas y se caracteriza y se diferencia del resto por la presencia de unas rocas ultrabásicas denominadas peridotitas en el sector más occidental (Serranía de Ronda). Estas rocas ígneas sufren procesos de meteorización que dan lugar a óxidos-hidróxidos de hierro, de color rojizo, motivo por el que se le da nombre a Sierra Bermeja. Además, también se encuentran filitas y cuarcitas del Pérmico-Triásico Inferior y calizas y dolomías del Triásico Medio-Superior, algunas marmorizadas por el metamorfismo. A este complejo pertenece la Sierra Blanca.

El Complejo Maláguide aflora al norte del área de estudio y está formado por pizarras y grauvacas del Paleozoico, sobre el que se depositaron arcillas y areniscas rocas del Triásico y, encima, materiales carbonatados del Jurásico.

Existe otra unidad litológica en las cuencas de los ríos Guadalmina y Guadaiza conocida como la Formación de San Pedro de Alcántara. Está constituida mayoritariamente por conglomerados y brechas heterométricas con cantos y bloques de Paleozoico Maláguide y, sobre todo, de rocas de origen alpujárride, como esquistos, gneises de alto grado, e incluso peridotitas (Aguado *et al.*, 1990).

En el área de estudio se distinguen dos conjuntos sedimentarios principales, uno inferior de edad Plioceno y otro superior del Cuaternario, que se apoyan de forma discordante sobre el sustrato bético de peridotitas y gneises del Complejo Alpujárride y pizarras y grauvacas del Maláguide, explicado anteriormente (Figura 10).

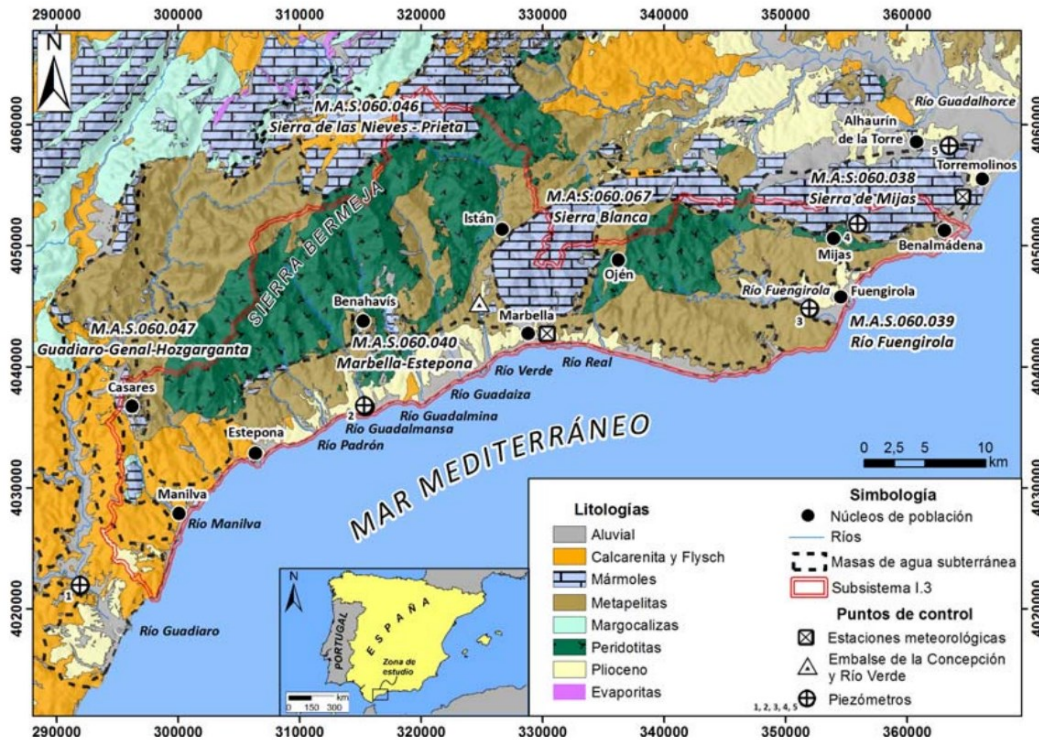


Figura 10. Mapa geológico de la zona de estudio (tomado de Martín et al., 2016).

Dentro del conjunto plioceno existen dos tramos: uno basal, con 20-40 m de espesor, que aflora la mayor parte al norte de Puerto Banús y en las inmediaciones de Estepona y está formado por conglomerados; y, un tramo superior, con arenas en la base y margas más o menos arenosas, hacia el techo y hacia el mar. Los materiales pliocenos constituyen un acuífero detrítico multicapa, con el tramo basal confinado hacia la costa y libre hacia el continente.

Los sedimentos cuaternarios se encuentran discordantes sobre los anteriores y son, principalmente, de dos tipos: fluviales y eólicos. Los fluviales están formados por cantos rodados, gravas y arenas, con una escasa matriz limo-arcillosa, que han sido depositados por los ríos actuales. Los principales afloramientos se localizan en los ríos Padrón, Castor, Guadalmanza, Guadalmína, Guadaiza y Verde, donde llegan a alcanzar anchuras de 500 m y potencias cercanas a 40 m en algún caso. Los eólicos son arenas de granulometría muy homogénea, que constituyen un antiguo manto de dunas situado en la zona de Elviria-Cabo Pino, de hasta 500 m de anchura y 12 m de espesor (Lupiani, 2007).

3.4. Hidrología superficial

El área de estudio pertenece a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA) y se encuentra en el subsistema de explotación de recursos hídricos I-3 (cuencas vertientes al mar entre las desembocaduras de los ríos Guadiaro y Guadalhorce), dentro del sistema I (Serranía de Ronda). Existen siete cuencas

hidrográficas principales, que se corresponden con los ríos más importantes de la zona, que de oeste a este son: Manilva, Padrón, Guadalmasa, Guadalmina, Guadaiza, Verde y Real (Figura 11).

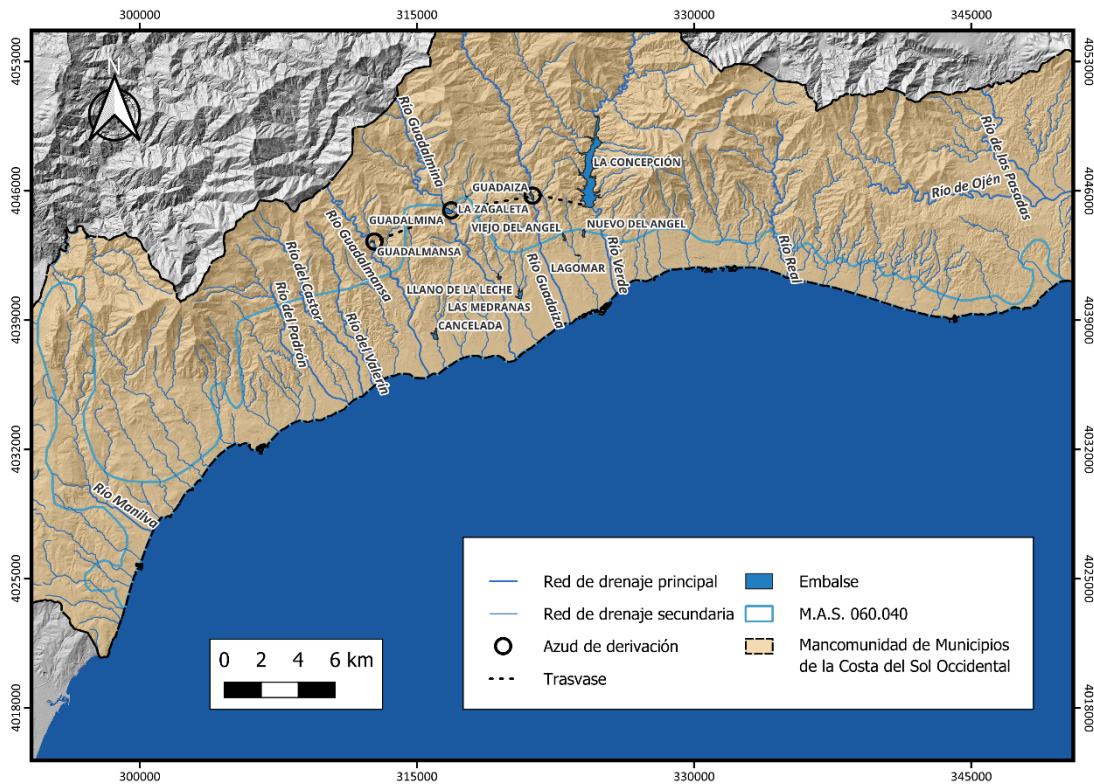


Figura 11. Red hidrográfica y principales infraestructuras hidráulicas del área de estudio.

La proximidad de las sierras a la costa condiciona en gran parte tanto la morfología como el caudal de la red de drenaje. Los cauces tienen recorrido corto, desde sus nacimientos en las cumbres hasta sus desembocaduras; están caracterizados por fuertes pendientes y se comportan, por tanto, como torrentes.

Otra particularidad de esta red de drenaje es el carácter intermitente que presenta debido al régimen de lluvias tan irregular que existe, propio del clima de la zona, y a la escasez de manantiales que puedan mantener el caudal en los periodos de estiaje. Por tanto, es característico observar en la zona ríos con abundante caudal en los periodos de lluvia y secos el resto del año.

La infraestructura hidráulica más relevante de la zona de estudio, por su capacidad de almacenamiento ($57,54 \text{ hm}^3$), es el embalse de La Concepción o del Río Verde, en el municipio de Istán. Este embalse es un componente fundamental de los recursos utilizados para el abastecimiento de agua de todos los municipios de la Costa del Sol, complementando así otras fuentes hídricas, que incluyen aguas subterráneas, desalinización y aguas regeneradas. El embalse, además de regular los caudales del río Verde, también regula los trasvasados desde los azudes de derivación existentes en los ríos Guadalmasa, Guadalmina y Guadaiza (Figura 11).

Además del embalse principal, existen otros ocho embalses en la zona, pero de mucha menor entidad: las Medranas, el Nuevo del Ángel y el Viejo del Ángel, ubicado el primero en el arroyo del Chopo los dos últimos en el arroyo Benabato. También se encuentran los embalses de Llano de la Leche, Cancelada, Guadalmanza, Lagomar y Guadalmina.

Los recursos hídricos almacenados en el embalse de La Concepción son distribuidos en alta por la empresa pública ACOSOL, hacia la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) de Marbella. De ahí, parten dos conducciones principales (oeste y este) para el abastecimiento de los municipios de la Costa del Sol Occidental.

3.5. Hidrogeología

3.5.1. Antecedentes

En la tesis doctoral de Manuel Argamasilla (2017) se hizo un exhaustivo análisis de los antecedentes de la zona de estudio en cuanto a los estudios hidrogeológicos que se habían realizado en la misma. El autor comenta que las conclusiones de estos trabajos, la mayoría elaborados por el IGME, demostraban que, desde el punto de vista del funcionamiento hidrogeológico, había dos unidades acuíferas principales, los materiales pliocenos y las formaciones cuaternarias, con diferentes fuentes de alimentación y características, aunque con cierta conexión hidráulica, permitiendo así que una unidad pueda drenar o alimentar a la otra.

Debido a la denominada Metasequía de la primera mitad de los años noventa se realizaron trabajos de reconocimiento geológico y exploración geofísica e hidrogeológica. Posteriormente se ha actualizado toda esa información con la edición del Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga, en 2007, del que se ha obtenido información para la elaboración de este trabajo.

3.5.2. Límites y geometría

La masa de agua subterránea Marbella-Estepona está constituida por varios sectores acuíferos, que afloran a lo largo de la franja costera entre Manilva y la Cala de Mijas.

De todos los materiales geológicos que se encuentran en la zona, los que funcionan como acuíferos son los dos conjuntos sedimentarios principales, de edad Plioceno y Cuaternario, y los mármoles del Complejo Alpujárride. Por el contrario, los materiales que se encuentran como sustrato de estos son los que tienen una baja permeabilidad, que son las peridotitas y gneises del Complejo Alpujárride, y pizarras y grauvacas del Maláguide (Figura 12).

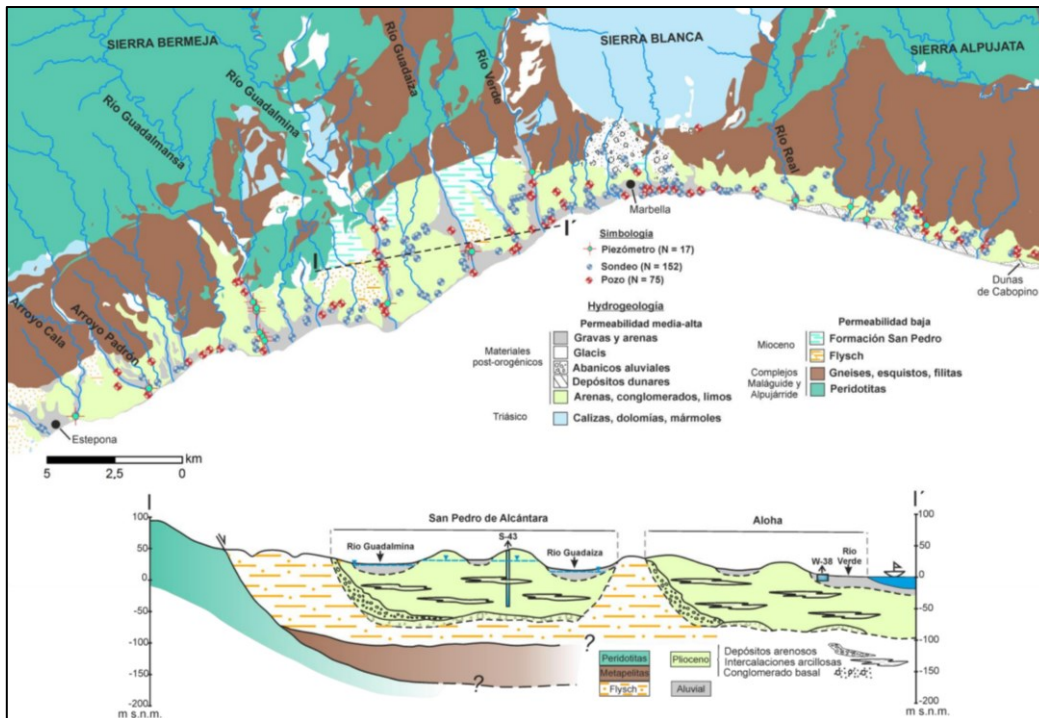


Figura 12. Mapa hidrogeológico de la zona de estudio (tomado de Argamasilla, 2017).

Argamasilla (2017) hizo un estudio de la piezometría, con mapas de isopiezas y gradientes hidráulicos, en el que se concluyó la diferenciación de varios acuíferos en el término municipal de Marbella. Además, tuvo en cuenta otro criterio relacionado con el contraste litológico entre los materiales pliocenos (conglomerados, limos-arenosos y arcillas) y cuaternarios (gravas y arenas). También se ha tenido en cuenta el artículo de Sánchez *et al.* (2018) en el que se contribuyó al conocimiento de los límites y geometría de los acuíferos pliocenos de Marbella y Estepona mediante la aplicación de técnicas geofísicas.

Los principales sectores acuíferos diferenciados en la M.A.S. 060.040 a partir de bibliografía sobre los mismos son (Figura 13):

- Acuífero aluvial de Manilva.
- Acuífero plioceno de Estepona.
- Acuíferos aluviales de los ríos Padrón y Guadalmana
- Acuífero plioceno del río Guadalmina
- Acuífero plioceno de San Pedro de Alcántara
- Acuífero aluvial del río Guadaiza
- Acuífero plioceno de Aloha
- Acuífero aluvial del Río Verde
- Acuífero plioceno de Marbella Núcleo – Sector Oriental (Señorío, Marbella y Real Cabopino)

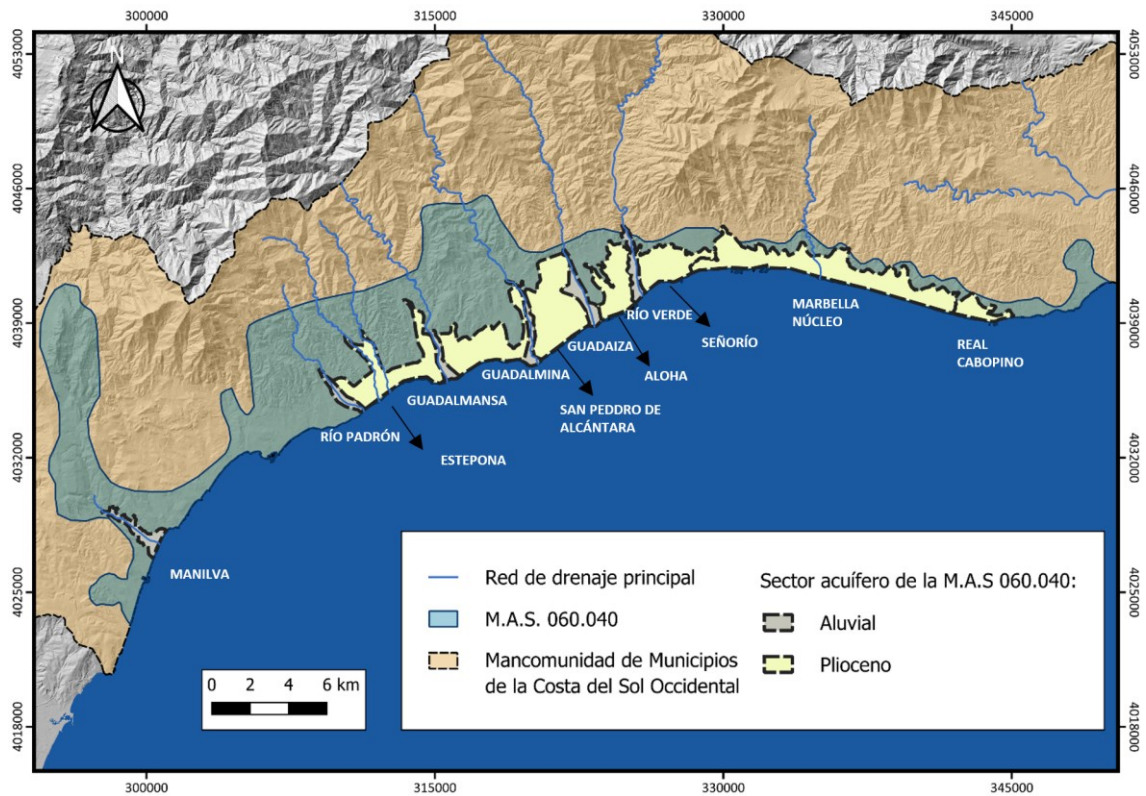


Figura 13. Sectores acuíferos observados en la M.A.S 060.040.

3.5.3. Inventario de puntos de agua

En este trabajo se ha elaborado un inventario de puntos de agua de la zona de estudio (Figura 14). Para ello, se ha contado con información recopilada de antecedentes en distintas bases de datos: la red de seguimiento piezométrico del portal web del Ministerio para la Transición Ecológica y la información proporcionada por HIDRALIA - Gestión Integral de Aguas de Andalucía, S.A., que es la empresa encargada de la gestión del agua en los municipios de Marbella y Estepona.

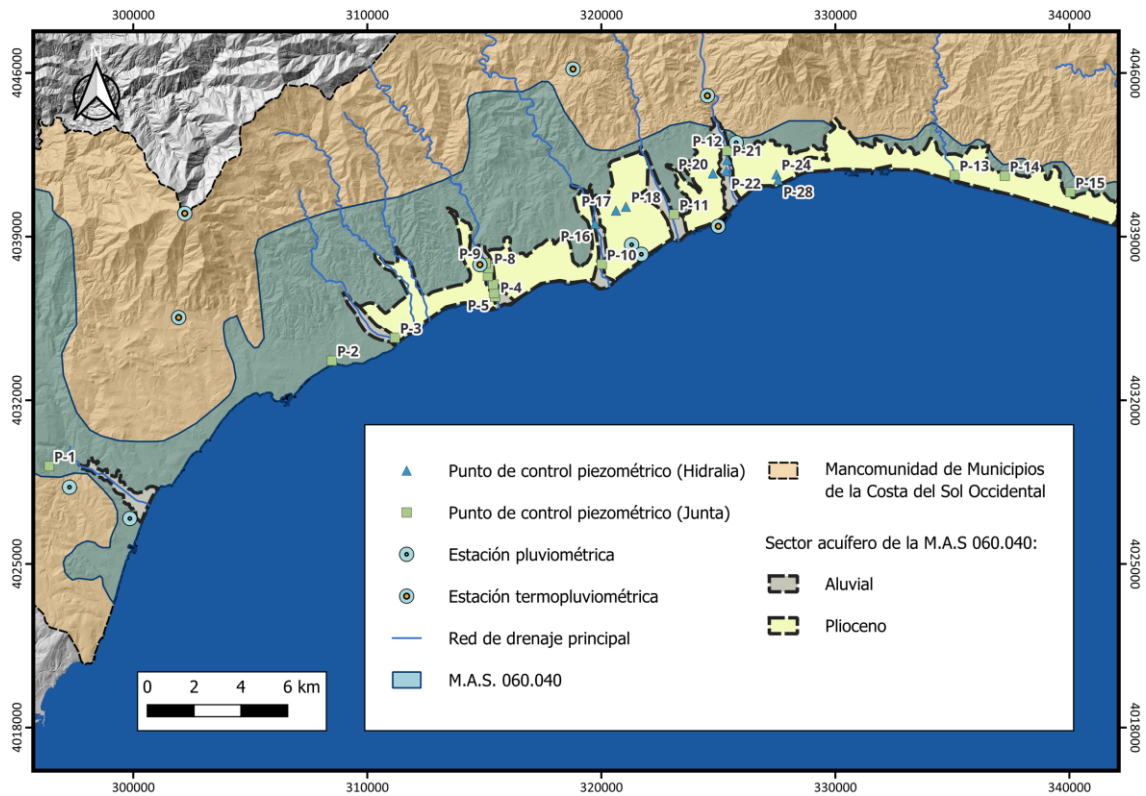


Figura 14. Mapa de situación de los puntos de control piezométrico en el área de estudio.

En la Tabla 7 se muestran las características principales de los puntos de agua recopilados en este trabajo, incluyendo su ubicación (en el sistema de coordenadas ETRS89 huso 30N) y la extensión del periodo de registro del que se ha podido recopilar información.

El total de puntos catalogados es de 28, de los cuales 15 constituyen la red de control piezométrico de la Junta de Andalucía y 13 de la de HIDRALIA. A pesar de contar con estos 28 puntos, cabe destacar las principales limitaciones que existen a la hora de configurar la red de control piezométrico. Estos acuíferos se encuentran muy explotados y a veces los niveles piezométricos medidos no son estáticos, como ocurre en las captaciones de HIDRALIA, que son destinadas al abastecimiento urbano. Otra limitación que se ha encontrado en los puntos considerados ha sido el escaso periodo de control y la elevada ausencia de datos mensuales, que impiden tener un registro fiable continuado en el tiempo.

Código	Punto de control piezométrico	Cota topográfica (m s.n.m.)	Prof. Obra (m)	Inicio Registro	Fin Registro	Dist. Costa (m)	Acuífero	Gestor	Coordenadas UTM (m)	
									X	Y
P-1	P.06.48.001-S (Manilva Pz-1)	8	126	mar-96	mar-23	4610	-	Junta	296404	4029186
P-2	P.06.40.006-B (Ayo. La Cala)	4,03	217	dic-95	mar-23	144	Plioceno	Junta	308486	4033696
P-3	P.06.40.005-B (Río Padrón)	2,27	193	dic-95	mar-23	351	Plioceno	Junta	311179	4034677
P-4	P.06.40.004-B (Guadalmansa. (Guadalmina Estepona))	5,38	20	feb-07	mar-23	570	Cuaternario	Junta	315463	4036432
P-5	P06-40-003-S (Pozo E-1)	5,11	13,5	ago-96	mar-23	731	Cuaternario	Junta	315411	4036587
P-6	P06-40-004-S (Pozo E2)	5,5	13	ago-96	mar-23	890	Cuaternario	Junta	315380	4036956
P-7	P.06.40.002-S (Pz-2)	12,79	105	oct-95	mar-23	1689	Pliocuaternario	Junta	315151	4037318
P-8	P.06.40.006-S (Guadalmansa Nuevo 1)	15,5	100	oct-03	mar-23	1797	Pliocuaternario	Junta	315186	4037654
P-9	P.06.40.007-S (Guadalmansa Nuevo 2)	17	77,3	feb-04	mar-23	2019	Pliocuaternario	Junta	315055	4037868
P-10	P.06.40.003-B (Guadalmina. Urbanización Alhambra)	11,07	30	feb-07	abr-21	1070	Cuaternario	Junta	320017	4037821
P-11	P.06.40.001-S (Guadaiza Pz-1)	15	18	feb-98	mar-23	918	Cuaternario	Junta	323112	4039953
P-12	P.06.40.002-B (Río Ver. Rambla Marbella Istán)	14	28	feb-07	mar-23	2620	Cuaternario	Junta	325363	4042679
P-13	P.06.40.001-B (Río Real)	7,17	108	feb-07	mar-23	340	Plioceno	Junta	335087	4041633
P-14	P.06.40.012-S (Siete Revueltas Pz-1)	8	29,5	feb-98	mar-23	535	-	Junta	337231	4041600
P-15	P.06.40.011-S (Real Zaragoza Pz-1)	13	24	feb-98	mar-23	649	-	Junta	340032	4040906
P-16	P.R. Guadalmina	25,1	15,5	ene-02	nov-22	2691	Cuaternario	Hidralia	319728	4039543
P-17	Cable Sky 1	-	-	abr-00	nov-22	106	Plioceno	Hidralia	320623	4040117
P-18	San Pedro 1	-	-	ene-00	nov-22	2475	Plioceno	Hidralia	321048	4040281
P-20	Aloha Bajo	24,2	115	ene-00	nov-22	2120	Plioceno	Hidralia	324766	4041703
P-21	Río Verde Marbella 3	13,1	19	ene-00	nov-22	2267	Cuaternario	Hidralia	325378	4042277
P-22	Río Verde Nueva Andalucía 3	10	49	ene-00	sept-22	1817	Cuaternario	Hidralia	325332	4041795
P-24	Señorío 2	24,1	114	may-95	nov-22	563	Plioceno	Hidralia	327478	4041667
P-28	Torreverde	14,3	59	ene-00	nov-21	277	Plioceno	Hidralia	327558	4041429

Tabla 7. Características de los puntos de la red de control piezométrico.

3.5.4. Hidrodinámica

Para realizar el análisis de las series temporales de piezometría se ha hecho una selección de los puntos de control piezométrico, basada en criterios como: mayor extensión del periodo de registro, continuidad en los datos, representatividad de los sectores acuíferos por su comportamiento y distribución espacial.

Se han analizado con más detalle las evoluciones piezométricas de las series temporales correspondientes a los piezómetros (Tabla 7): La Cala, Río Padrón, Pz-2, Río Verde Marbella 3 (RVMB3), Sñ2, C.SKY.1 y Real Zaragoza. Las medidas de nivel piezométrico tienen periodicidad mensual y abarcan el periodo 1995-2022, con algunas excepciones en las que este periodo se reduce.

En el análisis de las evoluciones mensuales de las cotas piezométricas de los diferentes puntos de muestreo de la zona de estudio se han detectado algunas observaciones peculiares.

En el caso del piezómetro Río Padrón (P-3) se ha observado que ha sido surgente durante varios meses desde el inicio del registro hasta 2003 (Figura 15). A partir de dicho año los máximos piezométricos han ido descendiendo progresivamente. El piezómetro La Cala (P-2), aunque presente un rango de variación muy pequeño, también ha mostrado una tendencia (algo menor) descendente del nivel piezométrico a lo largo de los años del registro, con los máximos piezométricos cada vez menores. Ambos piezómetros son los que se encuentran en la zona más occidental del área de estudio.

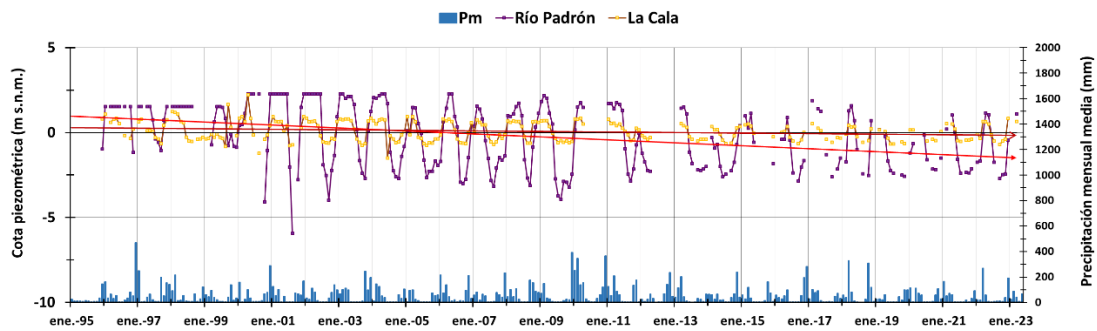


Figura 15. Evolución piezométrica durante el periodo 1995-2023 en los piezómetros Río Padrón y La Cala. También se encuentra representada la precipitación mensual media (Pm). Las tendencias son representadas con unas flechas de color rojo.

Las mayores fluctuaciones del nivel piezométrico han sido registradas en el punto de control C.Sky.1 (P-17) ubicado en la formación de San Pedro, entre los ríos Guadalmina y Guadaiza (Figura 16). La evolución de este punto es diferente al resto de sondeos, con un rango de variación de aproximadamente 40 m. Además, se ha detectado ciertos desfases en las cotas piezométricas máximas, especialmente a partir de 2007/08. Ello puede deberse a la estrategia de explotación (apenas bombeo en los meses de recarga) que se ha realizado en los materiales pliocenos de San Pedro de Alcántara y a un comportamiento más inercial del acuífero. Esta explicación es respaldada por un caso parecido en un piezómetro cercano, mencionado por Argamasilla (2017) bajo la denominación “Las Escuelas”, que presenta un comportamiento análogo al del P-17 en el presente estudio.

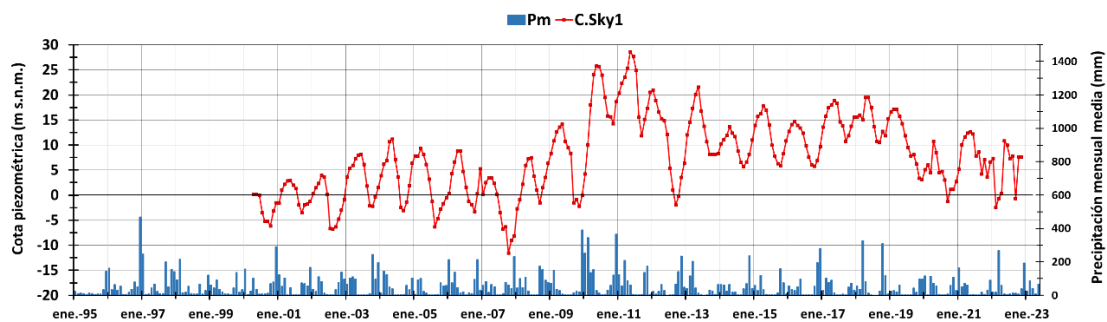


Figura 16. Evolución piezométrica durante el periodo 1995-2023 en el piezómetro C.Sky1. También se encuentra representada la precipitación mensual media (Pm).

En el piezómetro situado en la margen derecha del río Guadalmana, Pz-2 (P-7) y el piezómetro del Señorío 2 (P-24) se han podido detectar, gracias a que poseen un registro de datos más extenso, grandes fluctuaciones en el año 1995 (asociado a la Metasequía) y en el año 1998/99, cuando se produjo de nuevo un periodo seco (Figura 17). El resto de los puntos presentan una evolución de la cota piezométrica con variaciones desde máximos en invierno hasta mínimos en época de estiaje.

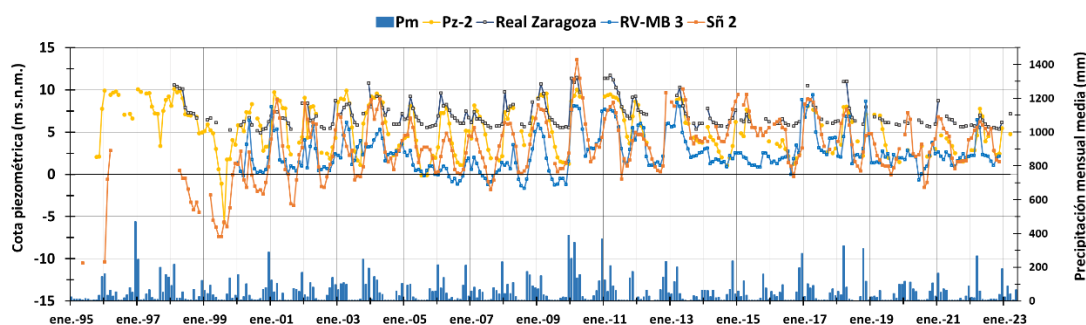


Figura 17. Evolución piezométrica durante el periodo 1995-2023 en los piezómetros Pz-2, Real Zaragoza, RV-MB3 y Sñ2. También se encuentra representada la precipitación mensual media (Pm).

En la mayoría de los puntos de control se puede observar un comportamiento marcadamente estacional, con máximos piezométricos en invierno y mínimos en verano. No obstante, hay que tener en consideración, que estos acuíferos son complejos ya están sometidos a bombeos para abastecimiento y a la recarga artificial, por lo que la respuesta piezométrica puede no deberse únicamente a la señal natural de las precipitaciones.

3.5.5. Hidroquímica

3.5.5.1. Consideraciones previas

La caracterización de la calidad química del agua subterránea de los acuíferos detríticos costeros de Marbella-Estepona ha sido analizada en profundidad en la tesis doctoral de Manuel Argamasilla (2017). Se detectó una gran variedad de procesos hidrogeoquímicos que ocurren de forma simultánea y alteran la calidad inicial de agua en la zona de estudio. Esta complejidad añadida a los acuíferos objeto de estudio, requirió la necesidad de analizarlos a partir de diferentes aproximaciones metodológicas (hidrológicas, hidroquímicas e isotópicas).

Con todas estas técnicas se pudo constatar diferencias en los seis grupos hidroquímicos propuestos por el autor. Los grupos se corresponden con los acuíferos de Estepona (A), acuíferos aluviales (B), San Pedro de Alcántara (C), Aloha (D), Señorío – Marbella núcleo (E) y Real Cabopino (F) (Figura 18).

En las aguas de los grupos A, B y C se vio reflejada la influencia de una gran componente catiónica de naturaleza peridotítica, debido a la posible existencia de cantos procedentes de disgregación del macizo ultramáfico de la Sierra Bermeja. La disolución de este tipo de rocas (silicatos ricos en Mg^{2+}) hace que las aguas estén enriquecidas en este catión.

En las aguas de los grupos E y F, en cambio, se identificó una componente de naturaleza más carbonática, debido a que la matriz de estos acuíferos puede contener minerales de dicha naturaleza procedentes del relieve marmóreo de Sierra Blanca. La

disolución de estos materiales carbonáticos condiciona la composición química de sus aguas, enriquecidas en Ca^{2+} , lo que provoca un endurecimiento de las mismas.

Por otro lado, se observó que las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ están interrelacionadas como resultado de procesos de intercambio catiónico a lo largo de toda la costa, especialmente en las muestras de agua de los grupos D y E. La entrada de la interfaz salina hacia el continente (intrusión marina) podría favorecer la liberación de Ca^{2+} o Mg^{2+} a cambio de Na^+ en los estratos más arcillosos del acuífero.

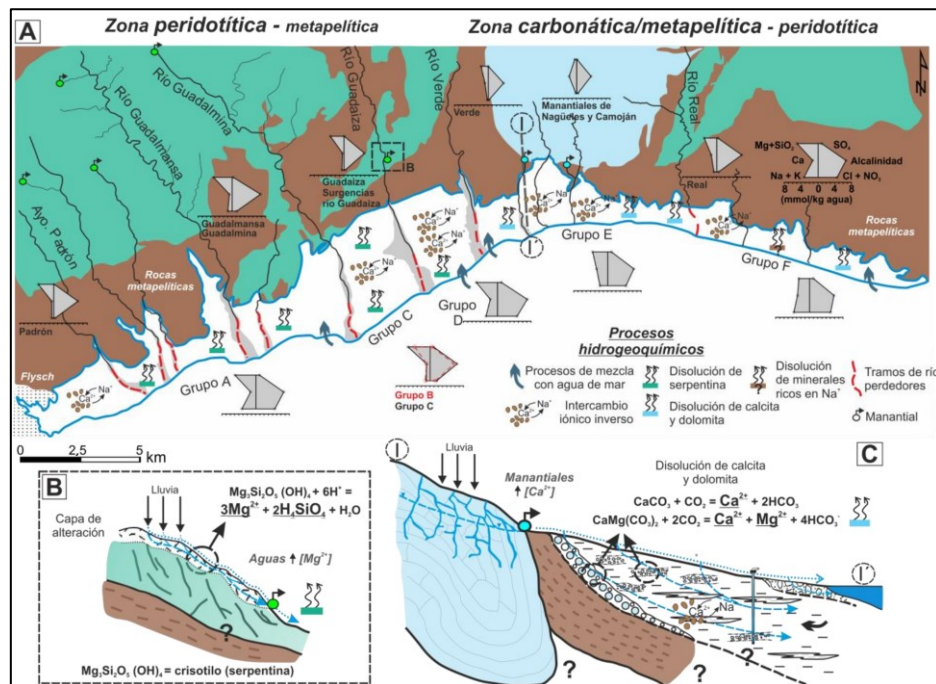


Figura 18. Esquema conceptual de los procesos hidrogeoquímicos dominantes en las aguas de los acuíferos detríticos costeros de Marbella-Estepona (tomado de Argamasilla, 2017).

En este trabajo, al contrario de la extensa base de datos con la que se contó en la tesis mencionada, sólo se ha podido obtener información hidroquímica de seis puntos de muestreo, y con un escaso registro de datos. No obstante, se han intentado contrastar las interpretaciones anteriores de Argamasilla (2017).

3.5.5.2. Caracterización hidroquímica

Para la caracterización hidroquímica de la M.A.S. 060.040 se han recopilado muestras de agua de 6 puntos de muestreo pertenecientes a la Junta de Andalucía, cuya ubicación geográfica se puede apreciar en la Figura 19. Las características específicas de estos puntos se encuentran resumidos en la Tabla 8.

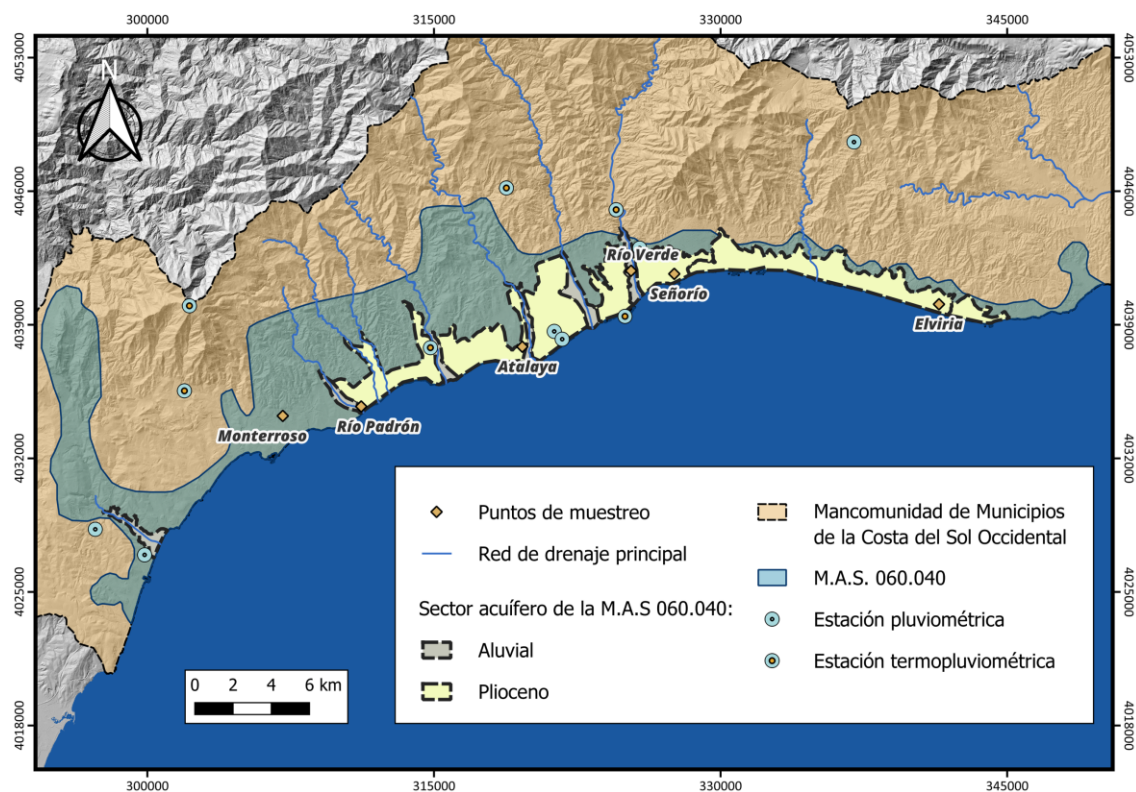


Figura 19. Localización de los puntos de muestreo hidroquímico en la M.A.S. 060.040.

Estación	Código	Nombre completo	Coordenadas UTM (m)		Periodo de registro		Años sin datos	Periodicidad	Observaciones
			X	Y	Inicio	Fin			
Monterroso	MD5137	CA0640001 MONTERROSO	307085	4034228	2011	2023	2016	Irregular	-
Río Verde	MD5139	CA0640002 RIO VERDE. NUEVA ANDALUCIA	325311	4041830	2011	2023	2016 y 2020	Irregular	-
Río Padrón	MD5138	PC0640005 RIO PADRON. ESTEPONA	311189	4034721	2011	2023	2016, 2019 y 2020	Irregular	-
Señorío	MD5228	SEÑORIO 1, 2 O 3 (ABTO. MARBELLA)	327571	4041669	2012	2022	2016	Irregular	-
Atalaya	MD5140	1546-3-0029 ATALAYA	319619	4037851	2011	2021	2016, 2018 y 2019	Irregular	2020 y 2021 sólo con nitratos
Elviria	MD5141	1645-5-0094 ELVIRIA	341425	4040077	2011	2021	2016, 2018 y 2020	Irregular	2021 y 2021 sólo con nitratos

Tabla 8. Características de los puntos de muestreo hidroquímico de la M.A.S. 060.040.

Durante el proceso de tratamiento de las muestras se han identificado algunas limitaciones que han sido solventadas. En particular, se ha observado que en varios días de muestreo se registraron dos valores diferentes de algunas variables. Para resolver esta discrepancia se ha optado por calcular el valor promedio entre ambas mediciones en esos días.

Por otra parte, se ha detectado que algunos parámetros, en concreto el carbono orgánico total (TOC), fluoruros y fosfatos, no han superado el límite de detección. Como solución, se ha optado por asignar la mitad del límite de detección al valor por debajo de dicho límite (ej: <0,5 mg/l a 0,25 mg/l).

Por último, es importante destacar que se ha llevado a cabo una unión de las series de datos de ciertos parámetros, como calcio y calcio disuelto, así como magnesio y magnesio total. Esta decisión es debida a que, mediante un análisis detallado, se ha detectado un cambio en el nombre de registro para una misma variable por parte de la Junta de Andalucía a partir de cierta fecha. Esto ha sido posible gracias a que se ha

detectado que el final de una variable (ej: calcio) coincide exactamente con el inicio de otra (ej: calcio disuelto), además de reconocer la similitud en los valores. De esta manera se puede asegurar una coherencia en la recopilación y el análisis de datos.

El diagrama de Piper de la Figura 20 se ha elaborado a partir de las muestras de agua que contaban con todos los componentes mayoritarios, a excepción del contenido en K^+ , que solo se encuentra analizado en el agua de los puntos en los pozos de Monterroso y Río Verde.

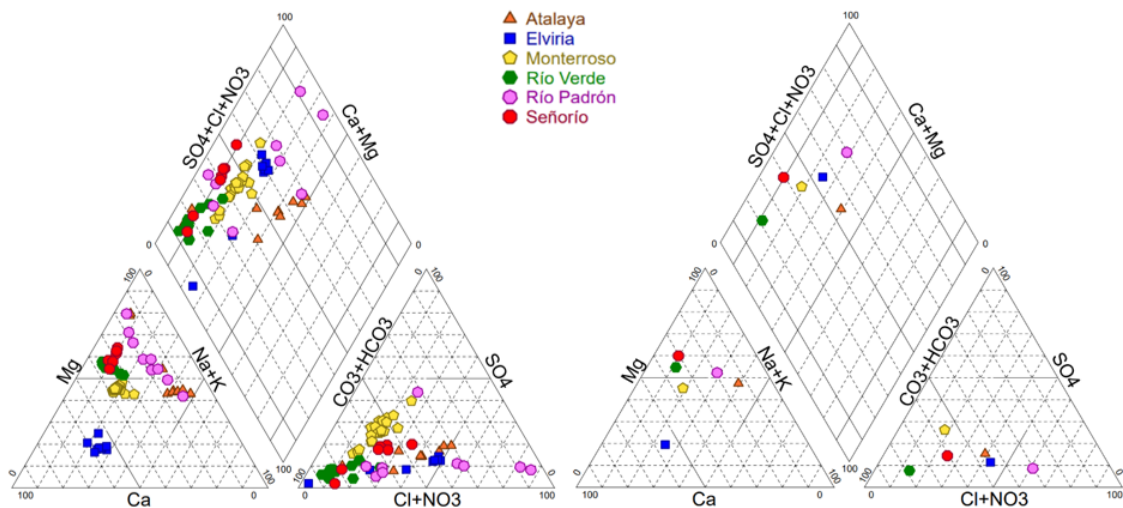


Figura 20. Diagrama de Piper en el que se representa la composición química de las aguas subterráneas de la M.A.S. 060.040 para el registro de datos disponibles. En la izquierda se representan todas las muestras y en la derecha el valor promedio para cada uno de los puntos.

Las aguas de los pozos de Río Verde, Monterroso y Señorío son bicarbonatadas magnésicas. Por otro lado, en los puntos Atalaya y Elviria, se registran aguas de facies un poco más mixtas, aunque se pueden identificar bicarbonatadas cálcicas o mixtas en el sondeo de Elviria.

Por último, las aguas del pozo del Río Padrón son las que presentan mayor dispersión de facies hidroquímicas. Son de tipo cloruradas magnésicas, aunque varias muestras quedan desplazadas hacia aguas más bicarbonatadas.

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los componentes químicos analizados en las aguas de la M.A.S. 060.040. Los puntos de muestreo Monterroso y Río Padrón son los que presentan un mayor número de observaciones. No obstante, no todas las observaciones cuentan con todas las variables.

Punto (Ref.)	CE μS/cm	Tª °C	pH	mg/l												
				TAC	Cl ⁻	Ca ²⁺	F ⁻	PO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	O ₂ dis.	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	TOC	
ATALAYA	n	12	12	12	12	12	10	12	10	12	14	7	0	12	12	10
	med	1164	21,37	8,31	319,58	158,54	34,42	0,24	0,22	73,96	2,18	7,63	-	115,68	84,47	3,21
	máx	1552	25,20	8,88	415,00	209,00	56,50	0,37	0,45	91,00	6,40	8,90	-	165,00	115,00	5,96
	mín	551	16,10	7,37	207,00	17,00	19,00	0,09	0,05	52,00	0,50	5,78	-	10,00	21,00	1,00
	c.v (%)	25,11	13,42	5,67	22,93	43,53	34,17	35,50	59,33	15,74	77,40	16,25	-	44,65	37,35	48,46
ELVIRIA	n	12	12	12	12	12	10	12	10	12	14	4	0	10	12	10
	med	1078	19,86	7,39	271,33	146,48	136,70	0,08	0,14	28,90	5,87	6,42	-	69,62	53,79	2,57
	máx	1284	24,90	8,08	300,00	235,00	163,00	0,25	0,33	40,00	11,00	7,51	-	86,00	77,00	4,60
	mín	416	14,60	7,04	212,00	5,00	82,00	0,05	0,03	17,00	0,50	5,04	-	30,00	5,00	1,00
	c.v (%)	24,65	12,19	4,27	12,06	55,73	16,95	77,33	101,02	19,58	59,50	16,40	-	23,64	52,06	46,79
MONTERROSO	n	32	32	32	23	32	23	32	30	32	32	5	23	23	32	10
	med	823	19,81	7,35	270,65	44,74	70,17	0,12	0,10	53,36	10,65	6,41	1,71	40,98	100,11	2,43
	máx	893	22,90	7,57	302,00	57,55	77,00	0,25	0,56	59,00	55,00	7,49	4,30	64,00	147,00	5,95
	mín	755	14,80	6,98	137,00	9,00	61,00	0,05	0,03	49,00	1,62	5,11	1,29	33,40	24,20	1,00
	c.v (%)	5,20	9,12	1,57	12,77	23,50	6,40	46,13	138,83	5,27	83,80	14,36	43,68	14,88	27,81	75,02
RÍO VERDE	n	11	11	11	11	11	11	10	11	11	11	2	11	11	11	5
	med	545	17,75	7,95	263,91	25,48	44,38	0,07	0,05	43,30	1,93	7,85	1,44	16,05	20,09	1,87
	máx	699	19,60	8,22	297,00	70,00	52,00	0,25	0,13	53,00	5,70	9,14	2,55	33,30	32,80	2,56
	mín	426	16,20	7,78	218,00	10,00	36,00	0,05	0,03	34,10	0,50	6,55	1,06	7,80	10,50	1,00
	c.v (%)	15,68	5,51	1,65	9,38	69,16	13,16	82,99	79,47	14,64	74,28	23,34	27,47	52,37	38,10	42,83
RÍO PADRÓN	n	25	25	25	17	25	9	25	23	25	25	0	0	17	25	9
	med	2148	20,09	7,62	294,24	339,34	96,00	0,09	0,13	158,13	6,39	-	-	163,14	65,68	1,88
	máx	9990	21,70	8,14	342,00	2754,00	257,00	0,40	0,82	531,00	15,00	-	-	1094,00	353,00	3,70
	mín	696	18,60	7,22	137,00	39,90	27,80	0,05	0,03	62,00	2,25	-	-	10,40	12,20	1,00
	c.v (%)	105,03	4,41	3,19	19,97	166,20	97,47	104,86	150,81	79,62	52,25	-	-	178,94	108,20	49,37
SEÑORÍO	n	14	15	14	15	15	7	15	15	15	15	0	0	15	15	7
	med	921	19,70	7,81	334,00	73,73	66,87	0,08	0,40	80,01	10,80	-	-	24,45	62,32	1,83
	máx	1079	22,60	8,05	367,00	134,00	79,00	0,25	4,87	94,00	14,80	-	-	29,00	108,00	3,80
	mín	822	17,40	7,58	295,00	22,32	58,00	0,05	0,03	69,00	7,30	-	-	20,20	5,31	1,00
	c.v (%)	9,28	6,18	2,18	6,91	36,28	12,08	74,05	312,97	9,74	22,69	-	-	9,92	41,69	61,28
Promedio	1113	20	8	292	131	75	0	0	73	6	7	2	72	64	2	

Tabla 9. Valores estadísticos principales (número de muestras, **n**; valor medio, **med**; valor máximo, **máx**; valor mínimo, **mín**; y coeficiente de variación, **c.v**, expresado en %) de los parámetros físico-químicos y componentes químicos de las muestras de agua de la M.A.S. 060.040.

El valor medio de la conductividad eléctrica (CE) difiere en gran medida en las aguas de los puntos de muestreo. Las aguas con mayor CE corresponden a las de los puntos del Río Padrón (2148 μS/cm), Atalaya (1163 μS/cm) y Elviria (1077 μS/cm), los cuales se encuentran ubicados más cercanos a la costa. Por el contrario, las aguas que presentan menores valores de CE son las de los pozos de Monterroso (822 μS/cm) y Río Verde (544 μS/cm), situados estos más retirados del borde costero, por lo que la influencia del agua marina es menor.

Cabe destacar que el valor medio muy elevado de la CE en las aguas del acuífero del río Padrón, está condicionado en gran medida por el valor máximo de 9,99 mS/cm en el mes de octubre de 2012, después de un periodo muy seco (2011/12).

Los valores medios de pH y Tª no presentan una gran diferencia en las aguas analizadas en puntos de muestreo. El pH varía entre 7,35 y 8,31 y la Tª entre 17,75 y 21,37 °C.

El anión predominante en las aguas de los puntos de control es el HCO₃⁻, con un valor medio de 292 mg/l. La mayor concentración media se ha detectado en las aguas del sondeo del Señorío (334 mg CaCO₃/l).

El segundo anión predominante en estas aguas es el Cl⁻, con un contenido medio de 131 mg/l en las aguas de todos los puntos de muestreo. Las aguas de los puntos más

retirados de la costa (Monterroso y Río Verde), y por tanto, con menor influencia del agua de mar, son las que presentan un menor contenido de Cl^- . En contraposición, el contenido medio más elevado de Cl^- (339 mg/l) se ha detectado en las aguas del punto del Río Padrón, con un valor máximo de 2754 mg/l en el mes de octubre de 2014, tras haber finalizado el periodo seco 2013/14.

Después de los periodos secos (como el caso de los meses de octubre de 2012 y 2014), la recarga natural del acuífero por las precipitaciones se reduce y puede producirse el avance de la cuña salina hacia el continente, provocando así una mezcla del agua de mar, cargada en alto contenido de iones como el ión Cl^- y con una elevada CE, con el agua del acuífero. Esto explicaría los valores de ambos parámetros en las muestras analizadas tras los periodos secos. No obstante, sería conveniente aplicar otro tipo de técnicas, como la isotopía, para validar el origen de la salinidad en las aguas de los puntos de muestreo.

El contenido medio en SO_4^{2-} es mayor en el agua del pozo de Monterroso (100,11 mg/l) y menor en los del Río Padrón (65,68 mg/l) y del Señorío (62,32 mg/l). No obstante, en el pozo del Río Padrón se ha registrado un valor máximo de 353 mg/l en octubre de 2014. El valor elevado en esta fecha podría explicarse con lo comentado anteriormente sobre la posible intrusión marina en un año seco, ya que la presencia de los sulfatos puede estar ligada a procesos de intrusión marina.

La concentración media de F^- en el agua es similar en todos los puntos, con un rango entre 0,08 y 0,24 mg/l. Lo mismo ocurre con la de PO_4^{2-} , que varía entre 0,05 y 0,40 mg/l.

Los valores medios de los cationes mayoritarios en las aguas muestreadas son similares, con concentraciones de 75, 73 y 72 mg/l de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , respectivamente. Sin embargo, existe una variación en función de la distribución espacial de los puntos de control.

El contenido de Ca^{2+} destaca en Elviria sobre el resto de los puntos, con 136,70 mg/l. Las aguas de este sondeo proceden del sector Marbella Núcleo – Sector Oriental, el cual presenta una marcada componente química carbonática, con posible origen procedente de los relieves marmóreos de Sierra Blanca, situada más al norte.

Por el contrario, el contenido de Mg^{2+} es mayor en las aguas de los puntos de muestreo del Río Padrón (158 mg/l), Atalaya (73 mg/l) y Señorío (80 mg/l), situados en la parte más occidental. Esto podría explicarse por la influencia de los cantos procedentes de la disgregación del macizo ultramáfico (peridotitas de Sierra Bermeja al norte del sector de Estepona y extremo occidental de Marbella) (Argamasilla, 2017).

Por último, el contenido medio de Na^+ es superior en el agua del pozo del Río Padrón y de Atalaya, con 163,14 mg/l y 115,68 mg/l, respectivamente. Cabe destacar el

valor máximo alcanzado en el río Padrón, 1094 mg/l. Este ion, al igual que el Cl^- puede asociarse a procesos de intrusión marina.

4. ANÁLISIS DEL DETERIORO TEMPORAL DEBIDO A EVENTOS DE SEQUÍA MEDIANTE ÍNDICES CLIMÁTICOS

Se ha llevado a cabo un análisis detallado de la correlación existente entre los índices climáticos y variables de estado tanto químico (parámetros físico-químicos) como cuantitativo (niveles piezométricos). El objetivo principal de dicho análisis es tratar de identificar indicios de deterioro temporal de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona.

Para ello se ha procedido a realizar un análisis de dos índices climáticos (SPI y SPEI) en diferentes puntos de la zona de estudio. Posteriormente, se han identificado las sequías asociadas a estos índices y finalmente se han obtenido las correlaciones de dichos índices con la piezometría y los parámetros de calidad del agua.

4.1. Cálculo de los índices climáticos en la Costa del Sol

4.1.1. Cálculo de los índices SPI y SPEI

Los índices calculados en este estudio han sido el SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) y el SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración), ambos obtenidos con *software* específico para ello, cuyo desarrollo se ha explicado en el apartado de metodología del presente trabajo.

4.1.2. Periodo de registro de datos y consecuente registro de índices

El periodo de registro difiere para ambos índices ya que el correspondiente a la temperatura, requerido por el SPEI, es de menor longitud que el de precipitación (Tabla 10). De esta manera, el SPI se ha podido calcular a partir de septiembre de 1995 (datos desde octubre de 1994) y el SPEI a partir de noviembre de 1999 (datos desde diciembre de 1998). Este desfase del inicio del periodo de registro con el primer valor de los índices es debido a que el SPI y el SPEI son calculados a escala temporal de 12 meses y por tanto el valor del primer mes de la serie se calcula con los doce datos mensuales previos. El final de registro, sin embargo, sí es el mismo para todos, mayo de 2023.

Índice climático	Registro datos	Registro índices
SPI	oct-94 / may-23	sep-95 / may-23
SPEI	dic-98 / may-23	nov-99 / may-23

Tabla 10. Índices climáticos calculados en este estudio y periodos de registro.

4.1.3. Cálculo SPI

Para el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación SPI (SPI - McKee *et al.*, 1993) en la zona de estudio se ha recopilado información climática, en este caso la variable registrada ha sido la precipitación, de las 10 estaciones pluviométricas seleccionadas para el análisis climático.

Todas ellas cuentan con un periodo de registro, previamente completado y tratado, de 27 años (01/10/1994 - 01/05/2023), a excepción de 2 de ellas, Manilva y Puerto Banús, que cuentan con 32 años (01/01/1990 - 01/05/2023). Con objeto de conocer si existe una gran diferencia entre el cálculo del SPI con un registro de 27 o de 32 años en las estaciones de Manilva y Puerto Banús, es decir, cinco años de diferencia, se ha procedido a comparar los SPI obtenidos con ambos registros para cada una de ellas (Figura 21).

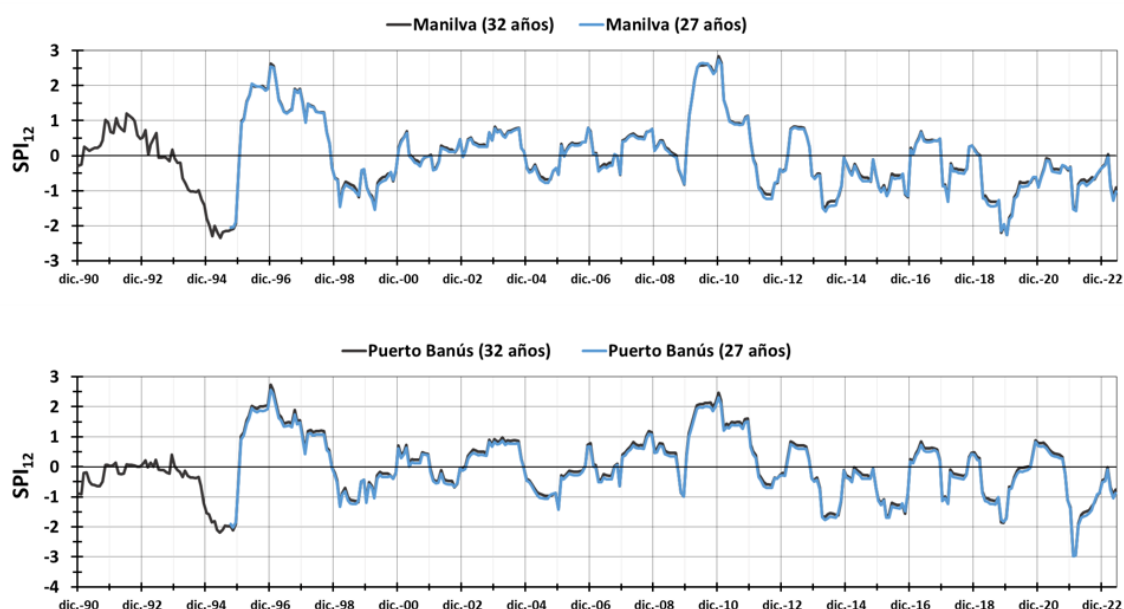


Figura 21. Evolución de los Índices Estandarizados de Precipitación (SPI₁₂) durante el periodo 01/12/1990 - 01/05/2023 (largo) y 01/09/1995 - 01/05/2023 (corto) en las estaciones pluviométricas de Manilva y Puerto Banús.

Ambas estaciones, tanto Manilva como Puerto Banús, presentan un SPI muy similar para los registros de distinta longitud ($R^2 = 0,9983$ para la primera y $0,9985$ para la segunda). Por tanto, esto sugiere que no hay diferencias sustanciales en estas dos estaciones para periodos de datos separados por un lapso de cinco años.

A pesar de que las estaciones de Manilva y Puerto Banús cuentan con registros de datos más extensos que el resto de las estaciones, lo que permitiría la detección de sequías con anterioridad a 1994, se ha optado por considerar como válido el SPI del registro corto. De esta manera la comparación del SPI de las 10 estaciones es más sencilla y representativa.

En la Figura 22 se muestran los índices SPI generados para las 10 estaciones seleccionadas. Las evoluciones del SPI son muy similares y permiten detectar en todas las estaciones la alternancia de periodos húmedos y secos a lo largo del periodo de estudio.

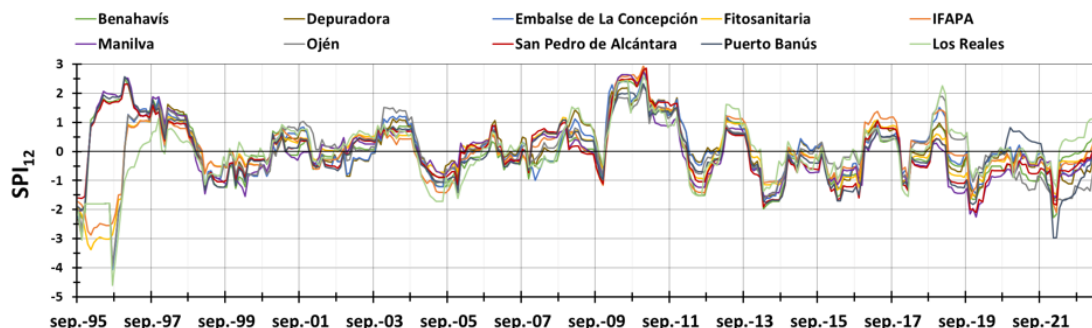


Figura 22. Evolución de los Índices Estandarizados de Precipitación (SPI_{12}) durante el periodo 01/09/1995 - 01/05/2023 en las estaciones pluviométricas del área de estudio.

En esta comparación a gran escala, cabe señalar el periodo más húmedo identificado en los años 2009/10-2010/11, en el que se llegan a alcanzar valores de SPI de hasta 2,93 en la estación del IFAPA en diciembre de 2010. El segundo periodo más húmedo detectado es el del año 1996/97, con un valor máximo de SPI de 2,57 en la estación Puerto Banús.

Por el contrario, el periodo más seco que puede identificarse abarca desde 2019 hasta el final del registro. Durante este periodo se han registrado valores de hasta 2,98 en enero de 2022 en la estación de Puerto Banús. Es importante destacar la presencia de picos pronunciados correspondientes a los valores muy negativos que se llegan a alcanzar en el mes de agosto de 1996 en algunas estaciones: Los Reales, Embalse de la Concepción, Depuradora y Ojén, en las que el SPI alcanza valores de -4,7, -4,07, -3,97 y -3,93, respectivamente.

La notable disparidad en los valores del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para el mes en cuestión en estas estaciones, en comparación con las demás, ha llevado a una revisión de las series mensuales de precipitación correspondientes a dichas estaciones. En este análisis, se ha observado que en estas cuatro estaciones no se ha registrado ni un solo mm de lluvia desde diciembre de 1994 hasta agosto de 1996, momento a partir del cual se vuelven a registrar valores de lluvia. La ausencia total de registros de precipitación en estas series durante un período de 20 meses explica el valor extremadamente negativo del SPI generado para agosto de 1996.

Si observamos la fuente de los datos de estas estaciones (Tabla 3) conviene enfatizar que todas pertenecen al SAIH de la Red Hidrosur. Por el contrario, las que no pertenecen a esta red no presentan un pico tan marcado en ese año; de hecho, ni siquiera llega a haber un valor negativo para el mes de agosto de 1996. Este hecho es

muy relevante para tenerlo en cuenta a la hora de tomar determinadas estaciones de referencia. Los valores tan negativos indicarían una sequía meteorológica muy marcada de gran intensidad, pero no se explicaría entonces que el resto de las estaciones no detectasen ningún periodo de sequía.

No obstante, además de las del SAIH hay dos estaciones, Fitosanitaria e IFAPA, que difieren significativamente en los primeros meses de registro en comparación con las demás estaciones (Anexo I). Es importante tener en cuenta que los primeros cinco años de registro de estas estaciones carecían de datos, lo que ha requerido realizar un completado de los mismos. Aunque se hayan podido completar mediante regresión lineal con el resto de las estaciones, el hecho de que se trate de un periodo de varios años implica que los datos no son completamente fiables.

Por todo ello, se ha decidido recalcular de nuevo el SPI para todas las estaciones reduciendo el periodo de registro, eliminando así los meses en los cuales se considera que las estaciones del SAIH tienen registros erróneos y las otras dos estaciones reducen el número de años en los que carecían datos al principio. Este nuevo cálculo parte de datos desde agosto de 1996 y por tanto el inicio de los valores de SPI comienza en julio de 1997. En la Figura 23 se puede observar las series de SPI calculadas con el periodo reducido (jul-97/may-23).

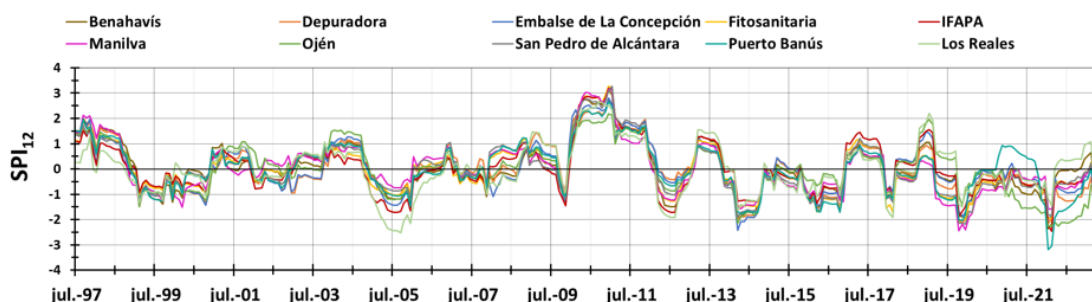


Figura 23. Evolución de los Índices Estandarizados de Precipitación (SPI_{12}) durante el periodo 01/07/1997 - 01/05/2023 en las estaciones pluviométricas del área de estudio.

Aun habiendo reducido el periodo, se han vuelto a detectar algunas diferencias para determinados periodos de ciertas estaciones (las pertenecientes al SAIH) y se ha vuelto a analizar más en detalle las series mensuales de precipitación. Se ha comprobado que algunos meses contienen datos incoherentes de lluvia, siempre menor de la que cabe esperar en comparación con las estaciones de las otras tres fuentes de datos (AEMET, IFAPA y RAIF). Por este motivo se ha optado por eliminar de manera definitiva las estaciones del SAIH para el cálculo de los índices climáticos. Las estaciones seleccionadas finalmente han sido Benahavís, Fitosanitaria, IFAPA, Manilva, San Pedro de Alcántara y Puerto Banús (Figura 24).

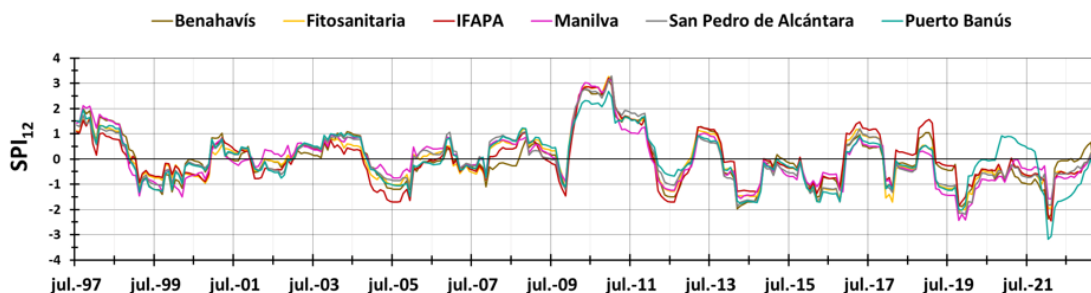


Figura 24. Evolución de los Índices Estandarizados de Precipitación (SPI_{12}) durante el periodo 01/07/1997 - 01/05/2023 en las estaciones pluviométricas seleccionadas del área de estudio.

Se ha realizado un análisis comparativo del SPI de las diferentes estaciones, mediante el coeficiente de determinación (R^2) para el periodo de cálculo (Tabla 11). Todas las estaciones muestran valores altos de correlación entre ellas, con un rango de entre 0,75 (entre la estación del IFAPA y la de Puerto Banús) y 0,95 (entre las estaciones de Fitosanitaria y de San Pedro de Alcántara).

	Benahavís	Fitosanitaria	IFAPA	Manilva	San Pedro de Alcántara	Puerto Banús
Benahavís	1					
Fitosanitaria	0,88	1				
IFAPA	0,86	0,89	1			
Manilva	0,83	0,91	0,77	1		
San Pedro de Alcántara	0,87	0,95	0,84	0,91	1	
Puerto Banús	0,76	0,83	0,75	0,78	0,85	1

Tabla 11. Correlaciones observadas (R^2) de los índices SPI_{12} entre las diferentes estaciones pluviométricas durante el periodo de jul-97 a may-23.

4.1.4. Cálculo SPEI

Para el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPEI) en la zona de estudio se ha recopilado información climática, en este caso las variables registradas han sido la precipitación y la temperatura de las 6 estaciones pluviométricas seleccionadas para el cálculo del anterior índice.

El periodo de cálculo se queda reducido en comparación con el SPI debido a que los datos de temperatura cuentan con una longitud menor que los de precipitación. Por tanto, el índice queda restringido al periodo entre noviembre de 1999 y mayo de 2023.

Dado que no todas las estaciones disponen de datos de registro de temperatura, se ha procedido a asignar a estas estaciones los datos de temperatura de las estaciones más cercanas que sí cuentan con esta variable meteorológica. En todos estos casos, la estación del IFAPA ha sido seleccionada como la más cercana para llevar a cabo esta asignación (Tabla 12). Cabe destacar que la estación Fitosanitaria no ha sido considerada para la temperatura debido a que se han identificado irregularidades en la serie de datos completada de dicha estación.

Estación	Tª elegida
Benahavís	=
Fitosanitaria	IFAPA
IFAPA	=
Manilva	IFAPA
San Pedro de Alcántara	IFAPA
Puerto Banús	=

Tabla 12. Asociación de la temperatura a las estaciones que no presentan dicha variable meteorológica. Las estaciones en las que se ha utilizado el registro de temperatura de la misma estación se representan con un símbolo de igual (=).

Las evoluciones del índice SPEI en las diferentes estaciones se muestran en la Figura 25.

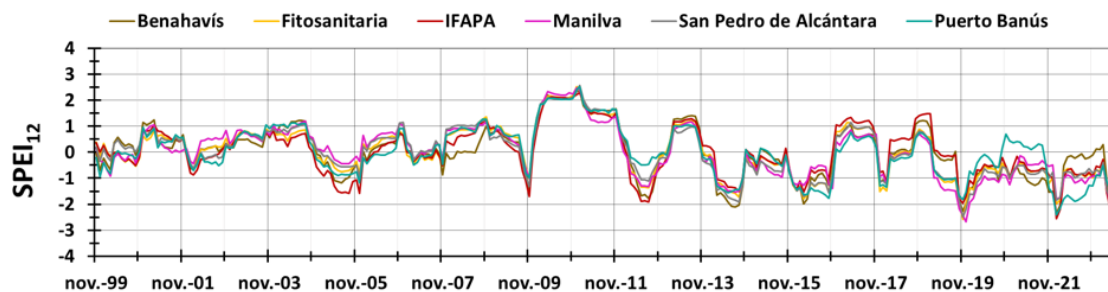


Figura 25. Evolución de los Índices Estandarizados de Precipitación y Evapotranspiración ($SPEI_{12}$) durante el periodo 01/11/1999 - 01/05/2023 en las estaciones pluviométricas seleccionadas del área de estudio.

Las evoluciones del SPEI, al igual que las del SPI, son muy similares y también permiten detectar en todas las estaciones la alternancia de periodos húmedos y secos a lo largo del periodo de estudio. El periodo más húmedo identificado es el del año 2009/10 y el más seco el correspondiente al periodo desde 2019 hasta el final del registro.

Se ha realizado un análisis comparativo del SPEI para las diferentes estaciones, mediante el coeficiente de determinación (R^2) para el periodo de cálculo (Tabla 13). Todas las estaciones muestran valores altos de correlación entre ellas, con un rango de entre 0,73 y 0,95, muy similar al obtenido con los SPI (0,75 y 0,95). Con el SPEI la menor correlación se da entre la estación de Benahavís y Puerto Banús. La mayor correlación coincide con la obtenida para el SPI, entre la de Fitosanitaria y la de San Pedro de Alcántara.

	Benahavís	Fitosanitaria	IFAPA	Manilva	San Pedro de Alcántara	Puerto Banús
Benahavís	1					
Fitosanitaria	0,87	1				
IFAPA	0,86	0,88	1			
Manilva	0,78	0,92	0,77	1		
San Pedro de Alcántara	0,86	0,95	0,84	0,92	1	
Puerto Banús	0,73	0,84	0,74	0,77	0,84	1

Tabla 13. Correlaciones observadas (R^2) de los índices SPEI₁₂ entre las diferentes estaciones pluviométricas durante el periodo de jul-97 a may-23.

4.1.5. Comparación entre SPI y SPEI

Se ha llevado a cabo un análisis comparativo de los índices SPI y SPEI para cada una de las estaciones pluviométricas de la zona de estudio mediante los coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) (Figura 15). Es importante tener en cuenta que, para una comparación adecuada de los índices, lo ideal sería que fueran calculados para períodos de igual duración. Sin embargo, es necesario considerar que en este caso existe una diferencia de 28 meses entre un período y otro, dado que el SPI abarca desde julio de 1997 y el SPEI desde noviembre de 1999.

A pesar de la diferencia de registro, todas las estaciones presentan una buena correlación lineal entre los valores de SPI y SPEI (Tabla 14). Se observa una mayor correlación en la de Puerto Banús con un valor de R^2 de 0,9555. Manilva, por el contrario, es la que presenta menor correlación, aun siendo ésta muy alta, con un R^2 de 0,9203 (Figura 26). En el caso del coeficiente de determinación, la estación de Puerto Banús también es la que presenta la mayor correlación con un valor de r de 0,98. Por el contrario, las estaciones con menor correlación son la de Benahavís, Fitosanitaria, Manilva y San Pedro de Alcántara.

	r	R^2
Banahavís	0,96	0,93
Fitosanitaria	0,96	0,93
IFAPA	0,97	0,93
Manilva	0,96	0,92
San Pedro de Alcántara	0,96	0,93
Puerto Banús	0,98	0,96

Tabla 14. Correlaciones entre los índices SPI y SPEI en cada una de las estaciones pluviométricas durante el periodo de jul-97 a may-23 para el primero y de nov-99 a may-23 para el segundo.

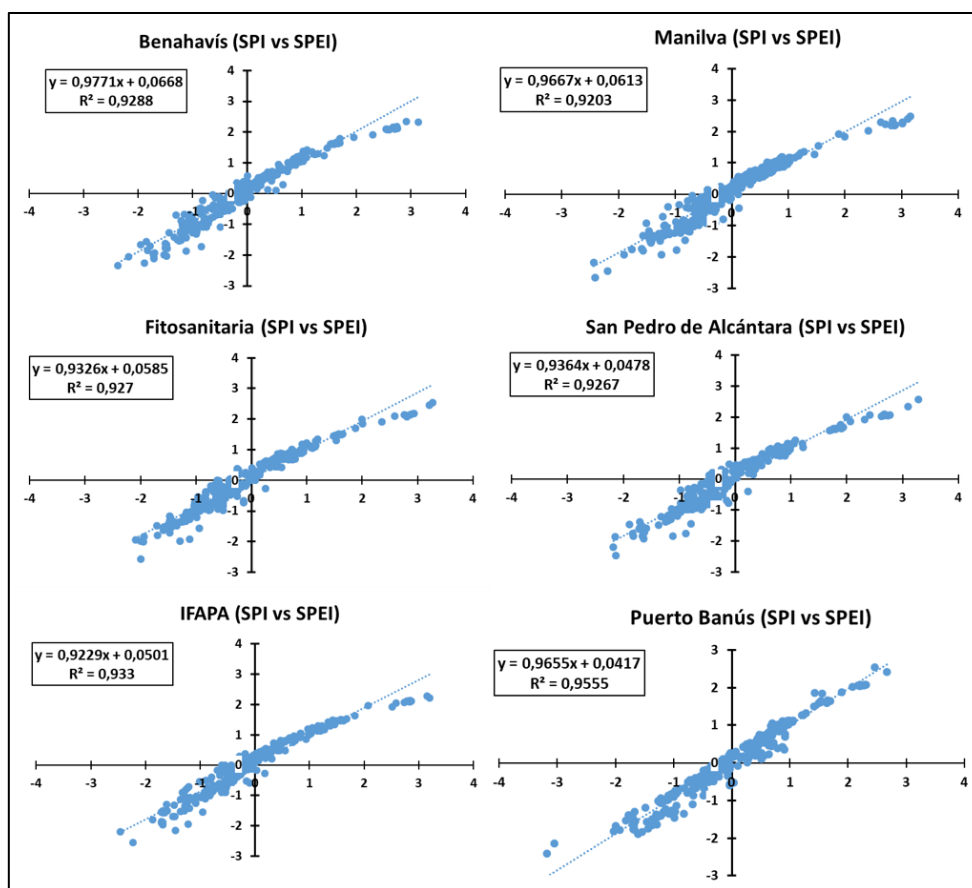


Figura 26. Correlaciones entre los índices SPI y SPEI en cada una de las estaciones pluviométricas durante el periodo de jul-97 a may-23 para el primero y de nov-99 a may-23 para el segundo.

4.1.6. Identificación de sequías con SPI y SPEI

El análisis comparativo entre los diferentes índices climáticos se realiza mediante el uso de umbrales de sequía. Estos umbrales permiten llevar a cabo una evaluación conjunta de los periodos de sequías entre índices para el todo el periodo de estudio.

El hecho de que se utilicen dos índices diferentes puede derivar a un debate sobre los umbrales a utilizar, ya que a priori se puede pensar que dos índices no pueden ser comparados con un mismo umbral. Esto ha llevado a algunos autores a generar tablas de comparaciones de índices con unos umbrales determinados, como se describe en el informe técnico sobre indicadores de sequía de Andreu *et al.* (2015), en el que se proponen unos umbrales para el SPI y el índice de estado (Is). No obstante, otros autores como Laimighofer *et al.* (2022) y Rhee *et al.* (2017) han utilizado los mismos umbrales para SPI y SPEI. En ambos casos se han considerado los umbrales establecidos por McKee *et al.* (1993). Estos autores plantearon una clasificación con la que se podía definir el tipo de intensidad de una sequía en función de los valores de SPI. A pesar de ser una clasificación propuesta en un principio exclusivamente para el SPI, otros autores, como Dikshit *et al.* (2021), la han utilizado en sus estudios para el SPEI.

Por todo ello, en este trabajo se ha optado por usar también la clasificación propuesta por Mckee *et al.* (1993) para la comparación entre los índices SPI y SPEI destinada a la identificación de sequías. Los valores de los umbrales se muestran en la Tabla 15.

	Valor del índice	Límites
Extremadamente húmedo	≥ 2	2
Muy húmedo	1,50 - 1,99	1,5
Moderadamente húmedo	1,00 a 1,49	1
Normal	-0,99 a 0,99	-
Moderadamente seco	-1,49 a -1,00	-1
Severamente seco	-1,99 a -1,50	-1,5
Extremadamente seco	≤ -2	2

Tabla 15. Categorización de sequías para SPI y SPEI (McKee et al., 1993). Se ha añadido la columna "límites" para mostrar los valores a partir de los cuales la sequía cambia de tipología.

La evolución de los índices SPI y SPEI en las distintas estaciones meteorológicas seleccionadas se muestra en la Figura 27 y se observa una notable similitud entre ellas. Este comportamiento explica los valores tan elevados de los coeficientes de determinación calculados anteriormente para las series generadas de SPI y SPEI (Figura 26).

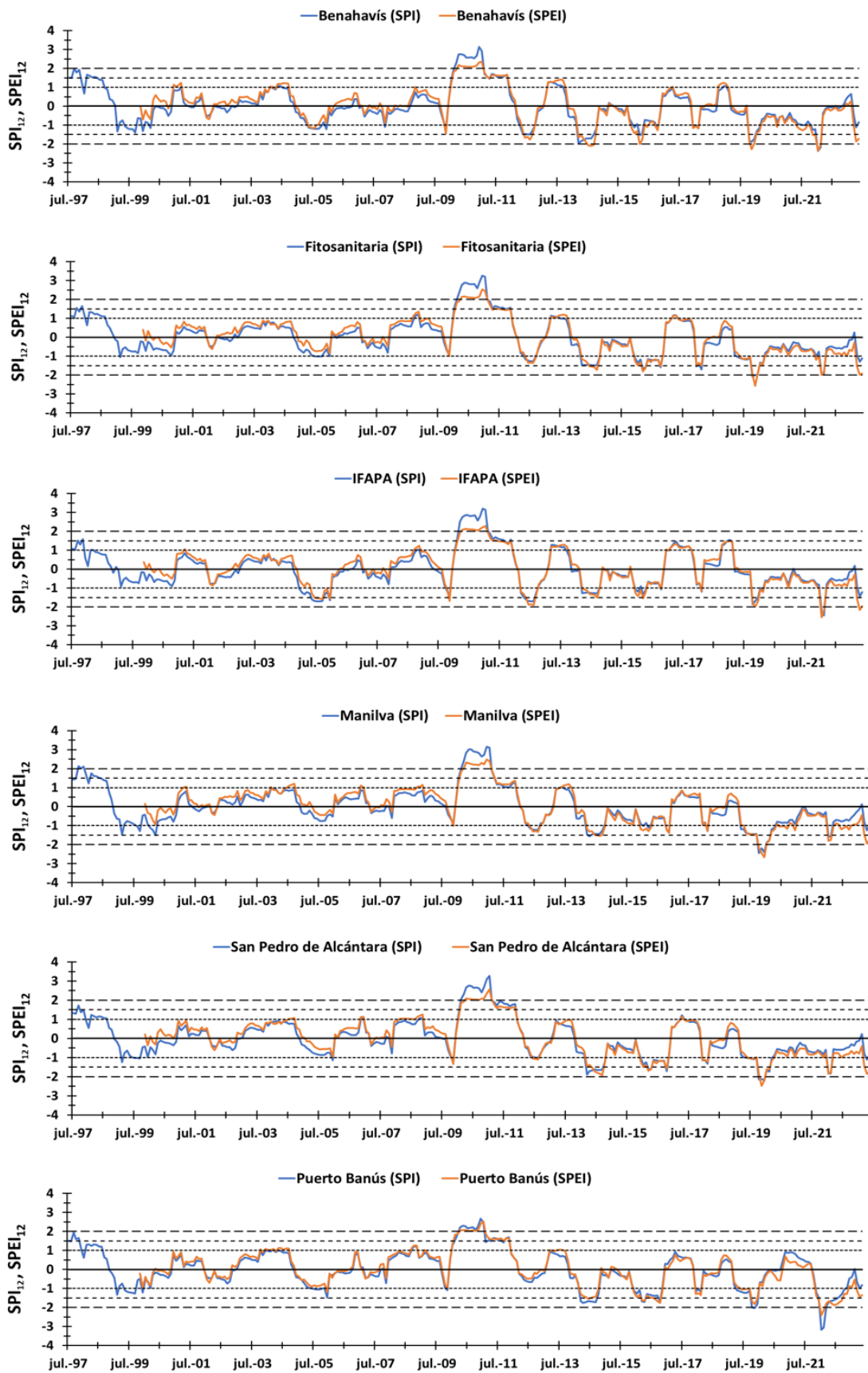


Figura 27. Índices SPI y SPEI de las estaciones pluviométricas seleccionadas en la zona de estudio durante el periodo de jul-97 a may-23 para el primero y de nov-99 a may-23 para el segundo. En líneas discontinuas se muestran los umbrales para la identificación de sequías establecidos por McKee et al. (1993).

En la Figura 27 se puede apreciar que, en general, ambos índices permiten detectar similares periodos de sequía en las distintas estaciones. Si tenemos en cuenta el análisis climático que se expone en el apartado correspondiente del trabajo, más concretamente en la Figura 5, en la que se muestra la distribución temporal de las precipitaciones y los tipos de año (húmedo, medio y seco) se puede apreciar que efectivamente tanto el SPI como el SPEI, en casi la mayoría de las estaciones, permiten detectar todos los periodos de sequía del periodo de estudio, que tuvieron lugar en los años 1998/99-1999/00, 2004/05, 2011/12, 2013/14, 2015/16, 2019/20-fin de registro. A su vez, estos índices también permiten identificar en casi la totalidad de las estaciones los años más húmedos, como lo fueron los años 1996/97-1997/98 (después de la conocida Metasequía), 2003/04, 2007/08, 2009/10-2010/11, 2012/13 y 2016/17.

Los índices SPI y SPEI también han permitido detectar los años de tipo medio que se identificaron con el análisis climático. Estos se corresponden con los periodos en los que no existen unos valores tan elevados para clasificarlos como periodos húmedos ni tan bajos como para clasificarlos como periodos secos. Los años de tipo medio que se han detectado son: 2001/02-2002/03, 2005/06-2006/07, 2008/09, 2014/15 y 2017/18-2018/19.

Los resultados de ambos índices coinciden con los del análisis climático realizado, que señala que el periodo más húmedo del periodo de estudio es el 2009/10-2010/11. Sin embargo, el análisis climático indica que el año más seco es el 2004/05, mientras que el análisis de los índices muestra que, aunque en ese año se detecta sequía, la más importante de todo el periodo acontece desde 2019 hasta el final del registro y sufrimos actualmente. Esta observación se explica por la presencia de varios años secos consecutivos, lo que conduce a que los índices detecten un periodo de sequía de mayor magnitud e intensidad.

Si se observa el SPI para las estaciones que cuentan con más registro, Manilva y Puerto Banús (Figura 21), se puede observar que desde 1994/95 no existía un periodo categorizado como “extremadamente seco”. En el caso de la estación de Puerto Banús, el SPI llega a mostrar valores más negativos en la sequía actual que en la denominada Metasequía de 1994/95, aunque esta tenga mayor duración.

Una vez analizada la evolución general de los índices durante el periodo de estudio completo, resulta de interés conocer de manera más detallada y específica las diferencias entre ambos índices, además de ver esta para las distintas estaciones de la zona de estudio. Se ha realizado un análisis exhaustivo para identificar todos los periodos de sequía, con su fecha de inicio y finalización, tanto para el SPI como para el SPEI. Las características detalladas de cada periodo se pueden observar en la Tabla 16, en la que se indican, además de las fechas específicas, otros parámetros como la duración (número de meses que dura la sequía), la intensidad (valor mínimo detectado) y la magnitud (suma de los valores para todos los meses del episodio seco).

	Año hidrológico*	SPI 12					SPEI 12				
		Inicio	Fin	Duración (nº meses)	Intensidad	Magnitud	Inicio	Fin	Duración (nº meses)	Intensidad	Magnitud
BENAHAVIS	1999-2000	01/02/1999	01/12/2000	22	-1,40	-15,81	-	-	-	-	-
	2005-2006	01/05/2005	01/11/2006	18	-1,22	-10,63	01/05/2005	01/01/2006	8	-1,17	-70,40
	2007-2008	01/11/2007	01/09/2008	10	-1,09	-3,38	-	-	-	-	-
	2009-2010	01/11/2009	01/12/2009	1	-1,22	-1,22	01/11/2009	01/12/2009	1	-1,46	-1,46
	2012-2013	01/04/2012	01/02/2013	10	-1,50	-9,74	01/05/2012	01/02/2013	9	-1,78	-8,93
	2014-2015	01/03/2014	01/03/2015	12	-1,96	-14,08	01/03/2014	01/03/2015	12	-2,11	-15,42
	2016-2017	01/01/2016	01/12/2016	11	-1,53	-10,76	01/12/2015	01/12/2016	12	-1,99	-14,28
	2017-2018	01/12/2017	01/10/2018	10	-1,10	-4,63	01/12/2017	01/05/2018	5	-1,17	-3,47
	2019-2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2020-2021	01/10/2019	01/08/2022	34	-2,37	-29,34	01/10/2019	01/12/2022	38	-2,348	-34,8
	2021-2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FITOSANITARIA	1999-2000	01/02/1999	01/12/2000	22	-1,06	-14,16	-	-	-	-	-
	2005-2006	01/07/2005	01/01/2006	6	-1,02	-5,49	-	-	-	-	-
	2009-2010	-	-	-	-	-	01/11/2009	01/12/2009	1	-1,01	-1,01
	2012-2013	01/05/2012	01/01/2013	8	-1,28	-7,02	01/05/2012	01/01/2013	8	-1,36	-7,03
	2014-2015	01/03/2014	01/12/2016	33	-1,69	-30,73	01/03/2014	01/12/2016	33	-1,8	-32,077
	2015-2016	01/12/2015	01/12/2016	1	-1,36	-10,61	01/12/2015	01/12/2016	12	-1,54	-11,93
	2017-2018	01/12/2017	01/10/2018	10	-1,71	-7,11	01/12/2017	01/06/2018	6	-1,50	-4,81
	2019-2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2020-2021	01/04/2019	01/02/2023	46	-2,09	-37,45	01/05/2019	01/06/2023	49	-2,58	-48,76
	2021-2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2022-2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IFAPA	2004-2005	01/12/2004	01/08/2006	20	-1,71	-20,15	-	-	-	-	-
	2005-2006	01/10/2009	01/01/2010	3	-1,46	-2,67	01/05/2005	01/04/2006	11	-1,58	-11,99
	2009-2010	01/03/2012	01/02/2013	11	-1,71	-12,99	01/09/2009	01/11/2009	2	-1,69	-2,78
	2012-2013	01/03/2012	01/02/2013	11	-1,71	-12,99	01/03/2012	01/02/2013	11	-1,90	-13,23
	2014-2015	01/03/2014	01/11/2014	8	-1,29	-9,81	01/03/2014	01/11/2014	8	-1,51	-9,78
	2015-2016	01/12/2015	01/12/2016	12	-1,36	-10,61	01/12/2015	01/12/2016	12	-1,54	-11,93
	2018-2018	01/02/2018	01/03/2018	1	-1,20	-1,20	01/02/2018	01/03/2018	1	-1,16	-1,16
	2019-2020	01/10/2019	01/02/2021	16	-1,87	-12,47	-	-	-	-	-
	2020-2021	-	-	-	-	-	01/10/2019	01/06/2023	44	-2,58	-48,76
	2021-2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2022-2023	01/01/2022	01/02/2023	13	-2,46	-10,20	-	-	-	-	-
MANILVA	1999-2000	01/02/1999	01/12/2000	22	-1,51	-18,89	-	-	-	-	-
	2009-2010	-	-	-	-	-	01/11/2009	01/12/2009	1	-1,01	-1,01
	2012-2013	01/05/2012	01/02/2013	9	-1,23	-7,72	01/05/2012	01/03/2013	10	-1,32	-8,05
	2014-2015	01/03/2014	01/12/2016	33	-1,57	-27,03	01/03/2014	01/12/2016	33	-1,54	-29,59
	2015-2016	01/12/2015	01/12/2016	1	-1,29	-3,88	01/02/2018	01/10/2018	8	-1,26	-1,91
	2018-2018	01/02/2018	01/10/2018	8	-1,29	-3,88	-	-	-	-	-
	2019-2020	-	-	-	-	-	01/04/2019	01/06/2023	50	-2,67	-55,47
	2020-2021	01/03/2019	01/02/2023	47	-2,44	-42,62	-	-	-	-	-
	2021-2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2022-2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SAN PEDRO DE ALCÁNTARA	1999-2000	01/02/1999	01/12/2000	22	-1,23	-13,08	-	-	-	-
2005-2006		01/12/2005	01/01/2006	1	-1,14	-1,14	-	-	-	-	-
2009-2010		01/11/2009	01/12/2009	1	-1,20	-1,20	01/11/2009	01/12/2009	1	-1,33	-1,33
2012-2013		01/07/2012	01/02/2013	7	-1,03	-4,03	01/06/2012	01/02/2013	8	-1,10	-5,22
2014-2015		01/03/2014	01/12/2016	33	-1,89	-34,00	01/03/2014	01/12/2016	33	-1,92	-35,82
2015-2016		01/12/2015	01/12/2016	1	-1,32	-6,44	01/12/2017	01/10/2018	10	-1,22	-4,26
2017-2018		01/12/2017	01/10/2018	10	-1,32	-6,44	-	-	-	-	-
2019-2020		-	-	-	-	-	01/06/2019	01/06/2023	48	-2,48	-48,63
2020-2021		01/05/2019	01/02/2023	45	-2,18	-37,15	-	-	-	-	-
2021-2022		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2022-2023		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PUERTO BANÚS	1999-2000	01/02/1999	01/12/2000	22	-1,32	-15,61	-	-	-	-	-
	2005-2006	01/06/2005	01/10/2006	16	-1,49	-9,42	01/12/2005	01/09/2006	9	-1,18	-2,49
	2009-2010	01/11/2009	01/12/2009	1	-1,09	-1,09	-	-	-	-	-
	2014-2015	01/03/2014	01/03/2015	12	-1,77	-14,39	01/03/2014	01/03/2015	12	-1,56	-11,82
	2015-2016	01/12/2015	01/12/2016	12	-1,70	-16,28	01/12/2015	01/12/2016	12	-1,77	-17,76
	2017-2018	01/12/2017	01/10/2018	10	-1,20	-5,22	01/12/2017	01/10/2018	10	-1,35	-5,53
	2019-2020	01/04/2019	01/10/2020	18	-2,03	-14,81	01/06/2019	01/10/2020	16	-1,83	-13,15
	2021-2022	-	-	-	-	-	01/11/2021	01/06/2023	19	-2,409	-28,657
	2022-2023	01/11/2021	01/02/2023	15	-3,18	-22,96	-	-	-	-	-

Tabla 16. Características de las sequías identificadas por el SPI y el SPEI para el periodo de estudio.
(* Algunas sequías no se corresponden con el año hidrológico exacto).

En la Tabla 17 se ha esquematizado gran parte de la información de la Tabla 16, de manera que se puedan contabilizar el número de sequías a lo largo del periodo de estudio y la tipología asociada a las mismas. La categoría “extremadamente seco” se corresponde con aquel periodo en el cual se alcance un valor mínimo de SPI igual o inferior a 2. La categoría “severamente seco” se refiere a aquel periodo en el cual se alcance un valor mínimo de SPI entre -1,99 y -1,50, ambos inclusive. Y, por último, la categoría “moderadamente seco” se asocia con el periodo en el que se alcanza un valor mínimo de SPI entre -1 y -1,49, ambos inclusive.

Para evitar que las sequías que abarcan varios años hidrológicos sean contabilizadas múltiples veces, se las ha asignado al año de inicio de la sequía. Esto asegura que cada período de sequía sea registrado una sola vez, lo que evita una duplicación en los registros y proporciona una representación más precisa y coherente de los eventos de sequía en el análisis.

Año hidrológico*	Benahavis				Fitosanitaria				IFAPA				Manilva				San Pedro de Alcántara				Puerto Banús																											
	SPI 12		SPEI 12		SPI 12		SPEI 12		SPI 12		SPEI 12		SPI 12		SPEI 12		SPI 12		SPEI 12		SPI 12		SPEI 12																									
	Extrem. seco	Sever. seco	Moder. seco	Σ	Extrem. seco	Sever. seco	Moder. seco	Σ	Extrem. seco	Sever. seco	Moder. seco	Σ	Extrem. seco	Sever. seco	Moder. seco	Σ	Extrem. seco	Sever. seco	Moder. seco	Σ	Extrem. seco	Sever. seco	Moder. seco	Σ																								
1999-2000			1	1				0			1	1				0							1	1																								
2000-2001				0				0				0				0								0	0																							
2001-2002				0				0				0				0								0	0																							
2002-2003				0				0				0				0								0	0																							
2003-2004				0				0				0				0								0	0																							
2004-2005				0				0				0	1	1		1								0	0																							
2005-2006			1	1			1	1			1	1			0	1	0				1	1		1	1																							
2006-2007				0				0				0				0								0	0																							
2007-2008			1	1				0				0				0								0	0																							
2008-2009				0				0				0				0								0	0																							
2009-2010			1	1				1	1			1	1			1	0				1	1		1	1																							
2010-2011				0				0				0				0								0	0																							
2011-2012				0				0				0				0								0	0																							
2012-2013			1	1			1	1			1	1			1	1				1	1		1	1																								
2013-2014				0				0				0				0								0	0																							
2014-2015			1	1			1	1			1	1			1	1				1	1		1	1																								
2015-2016				0				0				1	1			1							1	1																								
2016-2017			1	1			1	1				0				0								0	0																							
2017-2018				1	1			1	1			1	1			0					1	1		1	1																							
2018-2019				0				0				1	1			1	1				1	1		1	1																							
2019-2020			1	1			1	1			1	1			1	1				1	1		1	1																								
2020-2021				0				0				0				0								0	0																							
2021-2022				0				0				0				0							1	1																								
2022-2023				0				0				1	1			0								0	0																							
TOTAL	1	3	5	9	2	2	3	7	1	2	3	6	1	2	2	5	1	3	4	8	1	5	1	7																								
	E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M		E	S	M					
%	11	33	56		29	29	43		17	33	50		20	40	40		13	38	50		14	71	14		20	40	40		20	20	60		20	20	60		14	14	71		17	50	33		25	25	50	

Tabla 17. Número de eventos de sequía y su tipología identificadas por los índices SPI y SPEI en las estaciones seleccionadas de la zona de estudio.

En la Tabla 17 se puede apreciar que, el número de eventos que permite detectar el SPI (representados con color azul) en las distintas estaciones difiere del número de eventos identificados mediante el uso del SPEI (representados con color naranja).

A excepción de la estación de Manilva, en la que ambos índices permiten detectar el mismo número de eventos, en el resto de las estaciones se ha podido contabilizar un mayor número de eventos de sequía con el SPI a lo largo del periodo de estudio.

Cabe señalar que este cómputo global de eventos de sequía que permiten realizar los índices de sequía no es del todo representativo por dos razones. La primera es que el hecho de que el cálculo del SPEI se haya realizado con un registro de datos menos extenso que el SPI hace que en ninguna de las estaciones se haya podido detectar la sequía del periodo 1999/00, la cual sí es detectada con el uso SPI. La segunda es que algunos eventos identificados no han tenido una duración de más de un mes, por lo que no deberían tenerse en consideración ya que se estaría contando un número de eventos de sequía sobrestimado y lejano a la realidad.

Por esta razón se ha optado por contabilizar de nuevo los eventos de manera más simplificada, omitiendo las sequías con duración menor a un mes y la sequía que ha permitido detectar el SPI en el año 1999/00 (Tabla 18).

	SPI			SPEI		
	Todas	No 1999/00	> 1 mes	Todas	No 1999/00	> 1 mes
Benahavís	9	8	7	7	7	6
Fitosanitaria	6	5	5	5	5	4
IFAPA	8	7	6	7	7	6
Manilva	5	4	4	5	5	4
San Pedro de Alcántara	7	6	4	5	5	4
Puerto Banús	8	7	6	6	6	6

Tabla 18. Número de eventos de sequías identificados con el uso del SPI y el SPEI durante el periodo de estudio en función de las limitaciones. **No 1999/00**: sin contabilizar la sequía de este año. **> 1 mes**: contabilizadas únicamente las sequías con duración de más de un mes.

Con esta simplificación (Tabla 18) se puede observar que el número de eventos de sequías identificados con el SPI y SPEI sólo difieren en las estaciones de Benahavís y la de Fitosanitaria. Para el resto de las estaciones se han podido detectar el mismo número de eventos de sequías con ambos índices.

Además de tener en cuenta la identificación del número de eventos de sequía se han calculado los porcentajes de estos correspondientes a las tres tipologías de sequía (extremadamente seco, severamente seco y moderadamente seco).

Se pueden observar diferencias entre las estaciones y entre los índices, las cuales no permiten ofrecer un patrón concreto en cuanto al tipo de índice utilizado.

Existen estaciones en las que el SPI ha permitido detectar un porcentaje de eventos correspondientes a la tipología “moderadamente seco” mayor que de las otras dos categorías, como es el caso de las estaciones de Benahavís (56%), de Fitosanitaria (50 %), del IFAPA (50%) y San Pedro de Alcántara (60%). En el caso de la estación de Manilva, el porcentaje de la categoría “moderadamente seco” es igual al de “severamente seco” (40%). Por último, en la estación Puerto Banús, el SPI ha permitido identificar un mayor porcentaje de eventos de tipología “severamente seco” (50%).

En cuanto a las sequías identificadas por el SPEI, se han detectado mayor porcentaje de sequías de “moderadamente seco” en las estaciones de Benahavís (43%), Manilva (60%), San Pedro de Alcántara (71%) y Puerto Banús (50%). En la estación de Fitosanitaria (40%), se han identificado el mismo porcentaje de “moderadamente seco” que de “severamente seco”. Por último, en la estación del IFAPA, el SPI ha permitido identificar un mayor porcentaje de eventos de tipología “severamente seco” (71%).

Por tanto, aunque no exista un patrón generalizado, se puede observar que las estaciones que notan un cambio de mayor intensidad en las sequías identificadas durante el periodo de estudio para distintos índices son la de Benahavís, la de Fitosanitaria y la del IFAPA, ya que aumenta con el SPEI el porcentaje las categorías “severamente seco” y “extremadamente seco”. Por el contrario, en las estaciones de Manilva, San Pedro de Alcántara y Puerto Banús aumenta con el SPEI el porcentaje de “moderadamente seco”.

Aunque es interesante realizar un análisis general de todo el periodo de estudio, es aún más relevante observar la tendencia de la tipología de las sequías. En todas las estaciones se observa una tendencia hacia sequías más extremas a medida que avanza el periodo de estudio. Esto es un aspecto a tener en consideración en la gestión de los recursos hídricos para próximas sequías.

Otro aspecto fundamental para considerar, además del número de eventos de sequía y su tipología, es la duración, intensidad y magnitud de dichos eventos. Con objeto de evaluar la duración de las sequías a partir de los dos índices, y para todas las estaciones, se ha representado en la Figura 28 el número de meses de sequías de todos los periodos secos en su conjunto. No obstante, se puede ver todo más detallado en la Tabla 16 ya mostrada anteriormente.

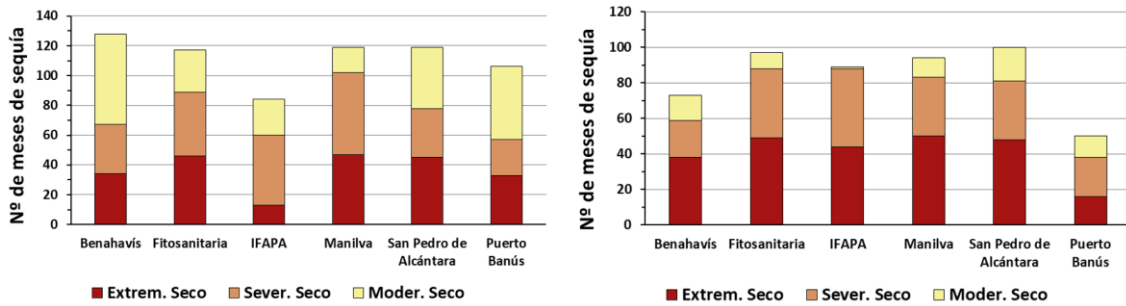


Figura 28. Número de meses que se encuentran dentro de una sequía durante el periodo de estudio para las diferentes estaciones. En la izquierda se muestra el SPI y en la derecha el SPEI.

A excepción de la estación del IFAPA, para el resto de las estaciones el SPI ha permitido detectar un mayor número de meses de sequía que el SPEI. Como se ha comentado anteriormente, el SPI y el SPEI difieren en la longitud de registro en casi dos años. Esto hace que el SPEI detecte automáticamente una sequía menos, la correspondiente con el año 1999/00, lo que afecta a la duración total de los meses de sequía. Por esta razón, se ha optado por representar la duración total en porcentaje, para que el análisis comparativo entre índices sea mejor (Figura 29).

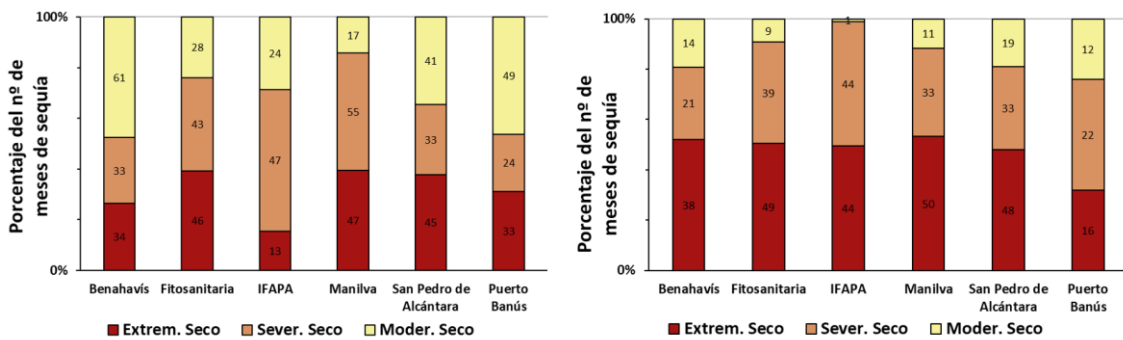


Figura 29. Porcentaje del número de meses de sequía durante el periodo de estudio para las diferentes estaciones. En la izquierda se muestra el SPI y en la derecha el SPEI.

El SPEI ha permitido detectar en todas las estaciones, excepto en la de Puerto Banús, un mayor porcentaje de número de meses correspondientes a la categoría “extremadamente seco”. Por el contrario, el SPI ha permitido identificar en todas las estaciones, mayores porcentajes en las categorías “severamente seco” y “moderadamente seco”, a excepción de la estación de San Pedro de Alcántara, en la cual el porcentaje de la categoría “severamente seco” es igual para ambos índices.

Por tanto, se puede concluir que, en términos generales, el SPEI ha permitido detectar un mayor número de meses caracterizados por sequías de carácter extremo en comparación con el SPI, el cual ha sido más efectivo en la identificación de meses afectados por sequías severas y moderadas.

Estos resultados difieren de algunos estudios en los que el SPI ha sido capaz de detectar un mayor número de eventos de sequía en la categoría de sequías extremas y el SPEI, por el contrario, en la categoría de severas a moderadas (Tirivarombo *et al.*,

2018). En dicho trabajo se expone que, aunque el SPI permita detectar sequías más extremas, son de menor duración y que, en oposición, el SPEI permite detectar sequías en categorías más leves, pero de mayor duración.

En este trabajo se ha analizado la duración y la intensidad de cada una de las sequías detectadas mediante el SPI y el SPEI en las distintas estaciones, tal y como se presenta en la Tabla 16. Se ha observado que no existe un patrón generalizado en lo que respecta a las características de estas sequías en términos de su duración e intensidad. Esto contrasta con lo expuesto en el artículo de Tirivarombo *et al.* (2018), en el que se identifica un patrón específico en relación con estas dos variables.

4.1.7. Limitaciones del SPI y SPEI en la identificación de sequías en la zona de estudio

Los dos índices climáticos analizados en este trabajo (SPI y el SPEI) han permitido identificar tanto los periodos húmedos como los periodos de sequía a lo largo del periodo de estudio. No obstante, se han detectado numerosas limitaciones en estos índices.

La diferencia en la longitud de los datos de registro para el cálculo de los dos índices influye de manera significativa a la hora de comparar las sequías identificadas. De esta manera, con el SPEI no se ha podido detectar la sequía de 1999/00 y esto hace que el SPI contabilice un mayor número de sequías a lo largo del periodo de estudio.

Además, en ciertas ocasiones, estos índices pueden inducir a la interpretación de conclusiones erróneas, identificando como secos periodos que no lo son. Ello es debido a que los índices tienden a sobreestimar el número de eventos de sequías al considerar como tales periodos en los que solo un mes presenta valores muy bajos de los índices. Esto se ha podido observar en diferentes años durante el periodo de estudio. El SPI ha permitido detectar eventos de sequía con duración de un mes en las estaciones de Benahavís, San Pedro de Alcántara y Puerto Banús en noviembre de 1999, en la estación del IFAPA en febrero de 1998 y en la estación de San Pedro de Alcántara en diciembre de 2015. Situaciones similares se han detectado con el SPEI, como por ejemplo en la estación de Benahavís y Fitosanitaria en noviembre de 1999 o en la del IFAPA en febrero de 1998.

Por otro lado, no siempre ambos índices permiten detectar un periodo seco de manera individual ya que dividen este en dos sequías diferentes. Ello ocurre en el caso del SPI en las estaciones del IFAPA y de Puerto Banús, en las que el periodo seco que se está sufriendo en la actualidad desde 2019 se identifique como dos eventos de sequía individuales, uno en 2019/20 y otro en 2021/22-2022/23 o simplemente 2022/23. Todo ello influye en el análisis de la duración de las sequías.

A la hora de comparar la magnitud que ha permitido determinar cada índice para un mismo evento de sequía, hay que tener en cuenta la duración y la intensidad de la

misma, ya que en ocasiones no se pueden hacer comparativas de tipología de sequía por la diferencia de estas variables. Esto se observa en la estación de Fitosanitaria en la sequía del año 2014/15-2015/16, en la que ambos índices permiten detectarla con una duración de 33 meses y una categoría de “severamente seco”, pero con el SPEI se detecta una mayor magnitud que con el SPI. Sin embargo, en otras ocasiones ocurre lo contrario. En la estación del IFAPA, durante la sequía de 2014/15, a igualdad de intensidad y duración, el SPI permite detectar una sequía de mayor magnitud que el SPEI.

En la zona de estudio no se ha podido establecer un patrón uniforme que indique que el SPEI permita detectar sequías de mayor o menor magnitud o intensidad que el SPI en todas las estaciones. Esta observación se encuentra en concordancia con los gráficos que muestran las evoluciones de los índices en las diferentes estaciones. No siempre el SPEI ha quedado por debajo del SPI, lo cual refleja que, dependiendo del periodo seco, un índice o el otro es el que permite detectar una sequía más intensa. Estos resultados discrepan de los obtenidos en otros estudios en los que el SPEI ha permitido detectar sequías de mayor magnitud y duración (Tirivarombo *et al.*, 2018).

Por todas estas razones comentadas, se puede concluir que estos índices no tienen mucha precisión a la hora de la identificación de las sequías y hay que utilizarlos siempre con precaución. Esta incertidumbre sustancial en los índices SPI y SPEI ha sido observada también por otros autores (Laimighofer *et al.*, 2022).

A pesar de las limitaciones existentes, en la actualidad se emplean estos índices en la elaboración de informes de escasez y sequía de las demarcaciones hidrográficas. En el caso de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, en el informe de septiembre de 2023, se ha usado el SPI₁₂ como indicador de sequía para analizar la evolución del estado de sequía de la Unidad Territorial de Sequía en la que se encuentra la zona de estudio (UTS 03) (CAPADR, 2023). Este informe refleja que el SPI permite detectar en el área de estudio una sequía prolongada actualmente.

Sin embargo, en otras demarcaciones como la del Guadalquivir (CHG, 2023) el SPI refleja una ausencia de sequía desde noviembre de 2022. Este índice no permite detectar en marzo de 2023 el estado de sequía debido a un evento lluvioso ocurrido meses antes. Ello refleja la necesidad de tener precaución en la utilización de estos índices para gestionar los recursos hídricos, especialmente en periodos de sequía.

4.2. Relación entre los índices y el estado cuantitativo

Para analizar el estado cuantitativo de la masa subterránea Marbella-Estepona, se han considerado los puntos seleccionados en el apartado de hidrodinámica, teniendo en consideración la cercanía a los puntos de muestreo comentadas posteriormente en la sección dedicada al estado cualitativo. Este enfoque permitirá realizar las comparaciones pertinentes con los índices que se emplearán en los puntos de muestreo para las correlaciones de los datos de calidad del agua correspondientes.

Las estaciones utilizadas en el cálculo de SPI y SPEI para la correlación con los datos de calidad serán la del IFAPA, la de San Pedro de Alcántara y la de Puerto Puerto Banús, por lo que estas serán las seleccionadas en el análisis con la piezometría.

A pesar de que se han seleccionado los puntos de puntos de control piezométrico con series de registro más extenso, se ha observado que la mayoría de ellos cuentan con un registro menor que el obtenido para el SPI y SPEI. Esto dificulta el análisis de las evoluciones de dichos índices con las evoluciones de los niveles piezométricos.

En las evoluciones de nivel piezométrico de los puntos de control analizados con los índices climáticos calculados en la estación del IFAPA no se han identificado relaciones aparentes entre los niveles piezométricos y los índices. Es decir, la piezometría en estos puntos de control no permite identificar de manera clara los periodos de sequía y los periodos húmedos que han permitido detectar los índices SPI y SPEI (Figura 30). Sí es cierto que la sequía identificada a partir de los índices climáticos, desde 2019 hasta la actualidad, se ve un poco reflejada en los máximos piezométricos, los cuales tienen una tendencia a ser cada vez menores. Ambos piezómetros captan principalmente el acuífero plioceno de Estepona.

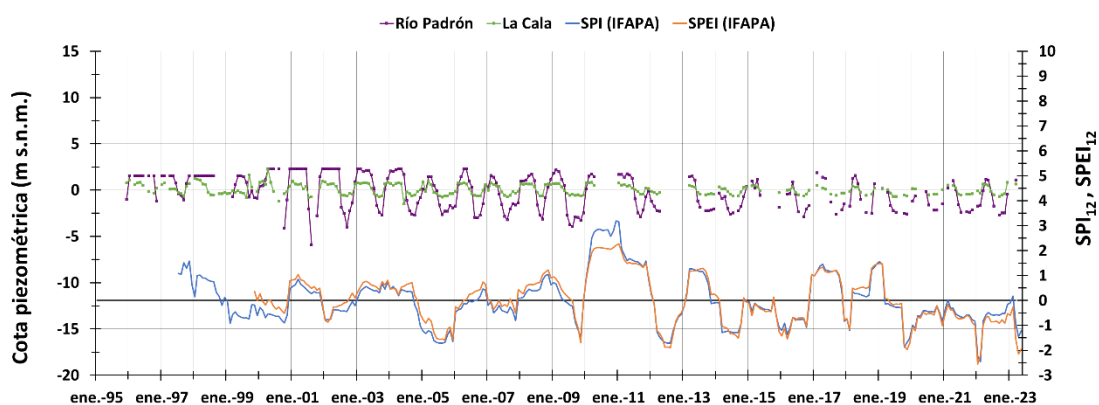


Figura 30. Evoluciones de las series piezométricas de los puntos P-2 y P-3 y de los índices SPI y SPEI de la estación del IFAPA para el periodo de estudio.

En el caso de las evoluciones de los niveles piezométricos de los puntos relacionados con los índices de la estación de San Pedro de Alcántara, sí parecen tener alguna relación con los índices climáticos (Figura 31). Cuando estos (más el SPI que el

SPEI por el mayor registro del primero) permitieron detectar la sequía de 1998/99, el nivel piezométrico del Pz-2 (P-7) desciende considerablemente. Además, el periodo húmedo 2009/10-2010/11 detectado por ambos índices también se ve reflejado en los máximos piezométricos que alcanza la piezometría del punto C.Sky1 (P-17) para esos años. Por otro lado, la sequía detectada desde 2019 hasta el final de registro también se puede apreciar en los valores máximos de ambas evoluciones piezométricas, con una tendencia de estos valores a ser cada vez menores. El sondeo P-17 se encuentra en los materiales pliocenos de San Pedro de Alcántara, en el que se practica explotación en los meses de recarga.

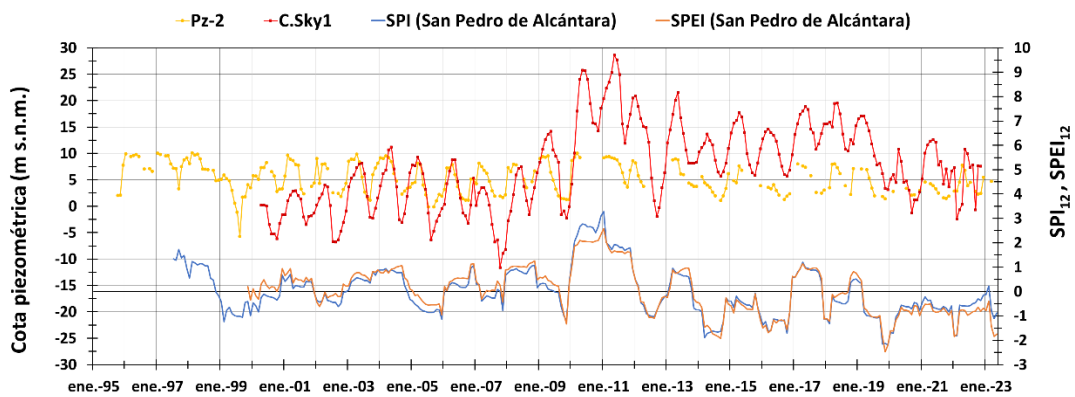


Figura 31. Evoluciones de las series piezométricas de los puntos P-7 y P-17 y de los índices SPI y SPEI de la estación Pedro para el periodo de estudio.

Por último, en el caso de las evoluciones piezométricas de los puntos analizados con los índices en la estación de Puerto Banús, también se pueden apreciar ciertas relaciones (Figura 32). El punto Señorío 2 (P-24) muestra el reflejo de la sequía detectada por el SPI en el año 1998/99 ya que las cotas piezométricas descienden en gran medida. Para el año húmedo 2009/10 también se detecta un máximo piezométrico. Al igual que en la figura anterior, se observa una tendencia generalizada descendente de los máximos piezométricos a medida que empieza el periodo seco desde 2019. Para los otros dos puntos de control, Real Zaragoza (P-15) y RVMB3 (P-21) no son tan evidentes, sobre todo en el segundo por su discontinuidad en el registro.

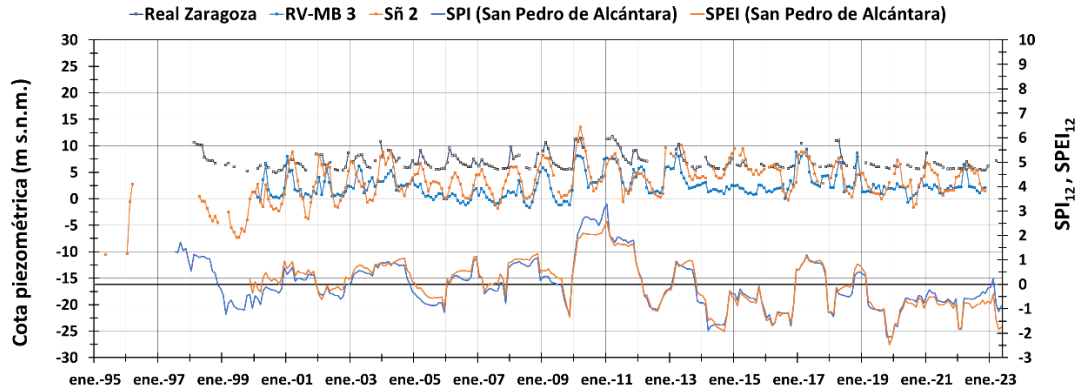


Figura 32. Evoluciones de las series piezométricas de los puntos P-15, P-21 y P-24 de los índices SPI y SPEI de la estación Puerto para el periodo de estudio.

A pesar de las posibles relaciones encontradas, existe un factor a considerar. Algunos puntos de control de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona, como el Señorío 2, ha sido empleado para la recarga artificial del acuífero Señorío de Marbella desde el año 2000. Por tanto, los ascensos piezométricos pueden no estar exclusivamente relacionados con los periodos lluviosos, sino también con los eventos de recarga artificial.

Además, la mayoría de estos acuíferos están sometidos a una intensa explotación de sus recursos, lo que añade otra complejidad al análisis de los mismos en el sentido de que la extracción de agua subterránea puede provocar descensos piezométricos no relacionados necesariamente con épocas secas. Por otra parte, el hecho de que algunos puntos de control sean surgentes en ciertos años, como el caso del pozo del Río Padrón, dificulta aún más las interpretaciones de los niveles piezométricos con respecto a los índices climáticos, especialmente durante los periodos húmedos.

Por ello, la información que ofrecen las evoluciones piezométricas habría que contrastarla con investigaciones posteriores sobre los eventos de recarga artificial y de explotación de los acuíferos por los bombeos, tanto de las empresas distribuidoras como de particulares, ya que estas prácticas pueden estar modificando la señal natural climática.

4.3. Relación entre los índices y el estado cualitativo

Los índices calculados en este trabajo, SPI y SPEI, se han relacionado con diferentes parámetros de calidad de la masa de agua subterránea de estudio con el propósito de tratar de identificar correlaciones entre ellos.

En el análisis del deterioro temporal debido a eventos de sequía se han recopilado 15 parámetros hidroquímicos de cada uno de los seis puntos de muestreo, distribuidos a lo largo de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona. Los datos proceden de una selección de los 34 parámetros existentes con los que se contaba en un principio (Tabla 19), pero que debido a la elevada ausencia de datos o la poca relevancia para el estudio han sido descartados.

	Nº muestras en cada estación						Total nº muestras
	Monterroso	Río Verde	Río Padrón	Señorío	Atalaya	Elviria	
Alcalinidad	8	4	9	5	8	8	42
Amonio	37	11	33	15	12	12	120
Bicarbonatos	23	11	19	15	12	12	92
Calcio	10	5	11	7	10	10	53
Calcio disuelto	13	6	0	0	0	0	19
Carbonatos	8	4	9	5	8	8	42
Carbono Orgánico Total (TOC)	10	5	11	7	10	10	53
Cloruros	37	11	33	15	12	12	120
Coliformes totales	8	4	0	0	0	0	12
Conductividad in situ (20°C)	37	11	33	14	12	12	119
Escherichia Coli	4	2	0	0	0	0	6
Fluoruros	37	11	33	15	12	12	120
Fosfatos	35	10	31	15	10	10	111
Magnesio	10	5	11	7	10	10	53
Magnesio disuelto	27	6	22	8	2	2	67
Magnesio total	14	0	14	0	0	0	28
Materia orgánica	2	1	2	0	2	2	9
Nitratos	74	22	66	30	26	26	244
Nitritos	37	11	33	15	12	12	120
Nitrógeno total	1	0	0	0	0	0	1
Nivel piezométrico	1	6	0	0	0	0	7
Nivel piezométrico (monitorizado)	2	0	0	0	0	0	2
Oxígeno disuelto (in situ)	10	4	34	6	14	9	77
PAHs D. 75/440/CEE Suma Máxima	6	3	7	4	6	6	32
PAHs D. 75/440/CEE Suma Mínima	6	3	7	4	6	6	32
pH	0	0	0	1	0	0	1
pH (in situ)	37	11	33	14	12	12	119
Potasio	10	5	0	0	0	0	15
Potasio disuelto	13	6	0	0	0	0	19
Sodio	10	5	11	7	10	10	53
Sodio Disuelto	13	6	8	8	2	2	39
Sólidos en suspensión	8	4	0	0	0	0	12
Sulfatos	36	11	33	15	12	12	119
Temperatura (in situ)	37	11	33	15	12	12	120

Tabla 19. Número de muestras existentes de cada parámetro en cada una de las estaciones de muestreo durante el registro histórico.

Se ha hecho un análisis detallado de la periodicidad de la toma de muestras para la ayuda de simplificación de parámetros seleccionados, el cual puede verse resumido en la Tabla 20.

		Inicio	Fin	Periodicidad aprox.	Nº muestras
Alcalinidad	Monterroso	08/03/2011	27/10/2015	2 / año	8
	Río Verde	08/03/2011	29/04/2015	1 / año	4
	Río Padrón	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	9
	Señorio	21/05/2013	08/10/2015	2 / año	5
	Atalaya	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	8
Amonio	Elviria	08/03/2011	18/11/2015	2 / año	8
	Monterroso	08/03/2011	17/02/2023	2 / año	37
	Río Verde	08/03/2011	22/02/2023	1 / año	11
	Río Padrón	08/03/2011	16/02/2023	2 / año	33
	Señorio	24/05/2012	18/03/2022	2 / año	15
Bicarbonato	Atalaya	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Elviria	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Monterroso	08/03/2011	17/02/2023	2 / año	23
	Río Verde	08/03/2011	22/02/2023	1 / año	11
	Río Padrón	08/03/2011	16/02/2023	2 / año	19
Calcio	Señorio	24/05/2012	18/03/2022	2 / año	15
	Atalaya	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Elviria	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Monterroso	08/03/2011	27/10/2015	2 / año	10
	Río Verde	08/03/2011	29/04/2015	1 / año	5
Calcio disuelto	Río Padrón	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	11
	Señorio	24/05/2012	08/10/2015	2 / año	7
	Atalaya	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	10
	Elviria	08/03/2011	18/11/2015	2 / año	10
	Monterroso	23/03/2017	17/02/2023	2 / año	13
E. Coli	Río Verde	23/03/2017	22/02/2023	1 / año	6
	Río Padrón	-	-	-	0
	Señorio	-	-	-	0
	Atalaya	-	-	-	0
	Elviria	-	-	-	0
Fluoruros	Monterroso	08/03/2011	17/02/2023	2 / año	37
	Río Verde	08/03/2011	22/02/2023	1 / año	11
	Río Padrón	08/03/2011	16/02/2023	2 / año	33
	Señorio	24/05/2012	18/03/2022	2 / año	15
	Atalaya	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
Fosfatos	Elviria	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Monterroso	24/05/2012	17/02/2023	2 / año	35
	Río Verde	29/05/2012	22/02/2023	1 / año	10
	Río Padrón	23/05/2012	16/02/2023	2 / año	31
	Señorio	24/05/2012	18/03/2022	2 / año	15
Magnesio	Atalaya	23/05/2012	18/10/2017	2 / año	10
	Elviria	28/05/2012	18/10/2017	2 / año	10
	Monterroso	08/03/2011	27/10/2015	2 / año	10
	Río Verde	08/03/2011	29/04/2015	1 / año	5
	Río Padrón	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	11
Magnesio disuelto	Señorio	24/05/2012	08/10/2015	2 / año	7
	Atalaya	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	10
	Elviria	08/03/2011	18/11/2015	2 / año	10
	Monterroso	23/03/2017	17/02/2023	2 / año	27
	Río Verde	23/03/2017	22/02/2023	1 / año	6
Magnesio total	Río Padrón	23/03/2017	16/02/2023	2 / año	22
	Señorio	21/03/2017	18/03/2022	2 / año	8
	Atalaya	23/03/2017	18/10/2017	2 / año	2
	Elviria	21/03/2017	18/10/2017	2 / año	2
	Monterroso	20/09/2021	06/07/2022	7 / año	14
M.I.O.	Río Verde	20/09/2021	06/07/2022	7 / año	0
	Río Padrón	-	-	-	14
	Señorio	-	-	-	0
	Atalaya	-	-	-	0
	Elviria	-	-	-	0
CE in situ (25°C)	Monterroso	08/03/2011	17/02/2023	2 / año	37
	Río Verde	08/03/2011	22/02/2023	1 / año	11
	Río Padrón	08/03/2011	16/02/2023	2 / año	33
	Señorio	24/05/2012	18/03/2022	2 / año	14
	Atalaya	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
Cloruros	Elviria	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Monterroso	08/03/2011	17/02/2023	2 / año	37
	Río Verde	08/03/2011	22/02/2023	1 / año	11
	Río Padrón	08/03/2011	16/02/2023	2 / año	33
	Señorio	24/05/2012	18/03/2022	2 / año	15
Carbonatos	Atalaya	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Elviria	08/03/2011	18/10/2017	2 / año	12
	Monterroso	08/03/2011	27/10/2015	2 / año	8
	Río Verde	08/03/2011	29/04/2015	1 / año	4
	Río Padrón	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	9
TOC	Señorio	21/05/2013	08/10/2015	2 / año	5
	Atalaya	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	8
	Elviria	08/03/2011	18/11/2015	2 / año	8
	Monterroso	08/03/2011	27/10/2015	2 / año	10
	Río Verde	08/03/2011	29/04/2015	1 / año	5
Coliformes totales	Río Padrón	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	11
	Señorio	24/05/2012	08/10/2015	2 / año	7
	Atalaya	08/03/2011	29/10/2015	2 / año	10
	Elviria	08/03/2011	18/11/2015	2 / año	10
	Monterroso	08/03/2011	27/10/2015	2 / año	8
M.I.O.	Río Verde	08/03/2011	29/04/2015	1 / año	4
	Río Padrón	-	-	-	0
	Señorio	-	-	-	0
	Atalaya	-	-	-	0
	Elviria	-	-	-	0

Tabla 20. Periodo de registro y periodicidad aproximada para parámetro y estación. Se representa con un guion donde no hay dato.

Las correlaciones entre los parámetros seleccionados y los índices de este estudio, calculadas por el departamento digital de CETAQUA, se muestran en las Tablas 21-26. Los valores con tonos rojos representan correlación negativa y los que tienen tonos verdes, correlación positiva. Las correlaciones significativas (moderadas y altas) son identificadas con un límite de correlación Pearson $r > 0,5$ y $r < -0,5$ y las correlaciones

de baja magnitud con $r > 0,3$ y $r < - 0,3$. Para el cálculo de las correlaciones se ha usado un nivel de significancia de 0,05.

Cabe destacar la limitada disponibilidad de muestras. En este estudio solo se han tenido en consideración los parámetros que contaban con un número total de observaciones igual o superior a 10 muestras, pues con un número inferior el resultado apenas es representativo.

Para el caso concreto del punto de muestreo “Atalaya”, se han identificado correlaciones significativas entre ciertas variables (Tabla 21). Las correlaciones de los índices, tanto el SPI como el SPEI, con las variables son muy similares. Las mayores correlaciones significativas corresponden a cloruro, conductividad eléctrica (CE), sodio, a la temperatura y sulfato, todos ellos además con significancia estadística (SE) a excepción de este último. Las estas correlaciones mencionadas son negativas, es decir, que valores de índices climáticos mayores (episodios con ausencia de sequía prolongada) están asociados a valores más bajos de las citadas variables y viceversa. El primer caso podría explicarse por el efecto de dilución del agua subterránea por infiltración de agua de lluvia. Hay otras variables con correlaciones de magnitud menor, como calcio, fluoruros y nitratos. Cabe destacar que la única correlación que resulta positiva es la de nitratos, y esta podría explicarse por el hecho de que, durante los eventos de lluvia, se produce un arrastre de nutrientes (lavado del suelo) y estos penetran finalmente en el acuífero.

El hecho de que la CE y los contenidos de cloruro y sodio, relacionados con procesos de intrusión marina, sean menores en periodos húmedos podrían también explicarse por la extrusión de agua salada hacia el mar por la recarga de los acuíferos durante estos periodos.

	SPI (Pedro)	SPEI (Pedro)	Nº muestras
Bicarbonatos	-0.20	-0.16	12
Calcio	-0.39	-0.33	10
Carbono Orgánico Total (COT)	-0.30	-0.28	10
Cloruros	-0.6 (SE)	-0.58 (SE)	12
Conductividad (in situ) (20°C)	-0.76 (SE)	-0.73 (SE)	12
Fluoruros	-0.48	-0.45	12
Fosfatos	0.18	0.15	10
Magnesio	-0.29	-0.29	12
Nitratos	0.42	0.37	14
Oxígeno Disuelto (in situ)	Cantidad de datos insuficiente		7
pH (in situ)	-0.27	-0.27	12
Potasio	Cantidad de datos insuficiente		0
Sodio	-0.65 (SE)	-0.63 (SE)	12
Sulfatos	-0.52	-0.50	12
Temperatura (in situ) (20°C)	-0.64 (SE)	-0.6 (SE)	12

Tabla 21. Correlaciones existentes entre los dos índices climáticos calculados en este trabajo y las variables de estado químico (parámetros físico-químicos) del punto de muestreo “Atalaya”.

En el caso de la estación de muestreo “Elviria”, las mayores correlaciones se han detectado en los bicarbonatos, además con significancia estadística (Tabla 22). Otras variables que también presentan correlaciones moderadas y altas son calcio, carbono orgánico total y sodio. Entre las correlaciones de baja magnitud se encuentra la CE. Todas las correlaciones citadas son negativas. Al igual que en la estación Atalaya, las correlaciones obtenidas son muy similares para el SPI y el SPEI. Esto puede deberse a la gran correlación entre ambos índices.

	SPI (Puerto)	SPEI (Puerto)	Nº muestras
Bicarbonatos	-0.79 (SE)	-0.78 (SE)	12
Calcio	-0.59	-0.61	10
Carbono Orgánico Total (COT)	-0.50	-0.46	10
Cloruros	-0.19	-0.22	12
Conductividad (in situ) (20°C)	-0.40	-0.39	12
Fluoruros	0.16	0.18	12
Fosfatos	0.00	0.08	10
Magnesio	0.12	0.07	12
Nitratos	-0.12	-0.02	14
Oxígeno Disuelto (in situ)	Cantidad de datos insuficiente		4
pH (in situ)	0.17	0.15	12
Potasio	Cantidad de datos insuficiente		0
Sodio	-0.62	-0.62	10
Sulfatos	-0.21	-0.22	12
Temperatura (in situ) (20°C)	-0.02	-0.04	12

Tabla 22. Correlaciones existentes entre los dos índices climáticos calculados en este trabajo y las variables de estado químico (parámetros físico-químicos) de la estación de muestreo “Elviria”.

En el punto de muestreo “Monterroso”, las mayores correlaciones se han detectado en el calcio (negativa) y el potasio (positiva) (Tabla 23). Aunque sólo la del calcio con el SPEI sea la única que sobrepasa $r < -0,5$, en todas se ha detectado significancia estadística. También se han detectados correlaciones de baja magnitud en el cloruro, magnesio, CE, sodio y sulfatos, estas tres últimas sólo con un índice, pero con ambos cercano a 0,3. En este caso las correlaciones de todas las variables mencionadas, a excepción del calcio, CE y magnesio, son correlaciones positivas, es decir que con valores menores de los índices (más periodo seco) los valores de las variables son menores, y viceversa.

	SPI (IFAPA)	SPEI (IFAPA)	Nº muestras
Bicarbonatos	-0.19	-0.27	23
Calcio	-0.47 (SE)	-0.53 (SE)	23
Carbono Orgánico Total (COT)	-0.24	-0.23	10
Cloruros	0.32	0.33	32
Conductividad (in situ) (20°C)	-0.30	-0.38 (SE)	32
Fluoruros	0.25	0.27	32
Fosfatos	0.18	0.21	30
Magnesio	-0.31	-0.34	32
Nitratos	0.21	0.24	32
Oxígeno Disuelto (in situ)	Cantidad de datos insuficiente		5
pH (in situ)	0.13	0.12	32
Potasio	0.49 (SE)	0.47 (SE)	23
Sodio	0.31	0.29	23
Sulfatos	0.27	0.32	32
Temperatura (in situ) (20°C)	0.06	0.04	32

Tabla 23. Correlaciones existentes entre los dos índices climáticos calculados en este trabajo y las variables de estado químico (parámetros físico-químicos) del punto de muestreo “Monterroso”.

En el punto de muestreo “Río Verde” hay correlación significativa ($r > 0,5$) en el pH mediante el SPI, de tipo positiva (Tabla 24). También se han detectado correlaciones de baja magnitud en TOC y temperatura, con signo negativo, y para el sulfato, de manera negativa para ambos índices. El SPEI ha detectado una correlación negativa de bicarbonatos de baja magnitud, donde el SPI no ha detectado ninguna. En cambio, el SPI detectaba una correlación significativa de pH y el SPEI lo hacía pero de baja magnitud.

	SPI (Puerto)	SPEI (Puerto)	Nº muestras
Bicarbonatos	-0.16	-0.33	11
Calcio	-0.10	-0.22	11
Carbono Orgánico Total (COT)	-0.37	-0.38	5
Cloruros	0.17	0.18	11
Conductividad (in situ) (20°C)	-0.04	-0.17	11
Fluoruros	0.05	0.13	11
Fosfatos	0.01	0.09	10
Magnesio	-0.10	-0.24	11
Nitratos	0.16	0.05	11
Oxígeno Disuelto (in situ)	Cantidad de datos insuficiente		2
pH (in situ)	0.53	0.42	11
Potasio	0.16	0.00	11
Sodio	0.07	-0.05	11
Sulfatos	0.34	0.47	11
Temperatura (in situ) (20°C)	-0.32	-0.34	11

Tabla 24. Correlaciones existentes entre los dos índices climáticos calculados en este trabajo y las variables de estado químico (parámetros físico-químicos) del punto de muestreo “Río Verde”.

En el punto de muestreo “Río Padrón” se han detectado muy pocas correlaciones, pero significativas, para los nitratos y el pH, con ambos índices (Tabla 25), y positivas, es decir, que a mayores valores de los índices mayores valores de las variables. Al igual que ocurría en el punto “Atalaya”, la correlación de los nitratos puede

deberse al lavado del suelo durante episodios de lluvia. También se ha detectado una correlación negativa de baja magnitud del sodio con el SPI.

	SPI (IFAPA)	SPEI (IFAPA)	Nº muestras
Bicarbonatos	0.03	-0.06	17
Calcio	Cantidad de datos insuficiente		9
Carbono Orgánico Total (COT)	Cantidad de datos insuficiente		9
Cloruros	-0.12	-0.10	25
Conductividad (in situ) (20°C)	-0.25	-0.23	25
Fluoruros	0.11	0.18	25
Fosfatos	0.09	0.13	23
Magnesio	-0.26	-0.24	25
Nitratos	0.59 (SE)	0.62 (SE)	25
Oxígeno Disuelto (in situ)	Cantidad de datos insuficiente		0
pH (in situ)	0.51 (SE)	0.52 (SE)	25
Potasio	Cantidad de datos insuficiente		0
Sodio	-0.31	-0.29	17
Sulfatos	-0.08	-0.04	25
Temperatura (in situ) (20°C)	0.18	0.18	25

Tabla 25. Correlaciones existentes entre los dos índices climáticos calculados en este trabajo y las variables de estado químico (parámetros físico-químicos) del punto de muestreo “Río Padrón”.

Por último, en el punto de muestreo “Señorío” no se han identificado correlaciones significativas (límite: correlación Pearson $r > 0,5$ y $r < - 0,5$) entre las diferentes variables (Tabla 26). Aun así, sí se han detectado varias correlaciones de baja magnitud ($r > +/- 0,3$), algunas de ellas cercanas al límite de 0,5, representativo de correlaciones moderadas (ej., pH para el SPI). Otras correlaciones de baja magnitud son la de magnesio y CE para ambos índices y el cloruro para el SPEI.

	SPI (Puerto)	SPEI (Puerto)	Nº muestras
Bicarbonatos	-0.10	-0.18	15
Calcio	Cantidad de datos insuficiente		7
Carbono Orgánico Total (COT)	Cantidad de datos insuficiente		7
Cloruros	-0.26	-0.31	15
Conductividad (in situ) (20°C)	-0.36	-0.34	14
Fluoruros	-0.23	-0.11	15
Fosfatos	-0.12	-0.07	15
Magnesio	-0.41	-0.36	15
Nitratos	0.23	0.20	15
Oxígeno Disuelto (in situ)	Cantidad de datos insuficiente		0
pH (in situ)	0.43	0.30	14
Potasio	Cantidad de datos insuficiente		0
Sodio	-0.04	-0.01	15
Sulfatos	-0.13	-0.11	15
Temperatura (in situ) (20°C)	0.26	0.24	15

Tabla 26. Correlaciones existentes entre los dos índices climáticos calculados en este trabajo y las variables de estado químico (parámetros físico-químicos) del punto de muestreo “Señorío”.

Una vez descritas todas las correlaciones encontradas entre los parámetros seleccionados y los índices SPI y SPEI en las estaciones de muestreo, se ha realizado un

estudio más detallado para analizar las correlaciones más significativas. Se ha ido analizando en cada estación las fechas específicas en las que se tomaron las muestras y sus correspondientes valores de SPI y SPEI.

Se puede observar un patrón generalizado en cuanto al comportamiento de las variables en relación con los valores de los índices. De forma generalizada, en las fechas en las que existen valores elevados de SPI y SPEI (relacionado con años húmedos) como por ejemplo el año 2011, perteneciente al periodo más húmedo detectado durante el periodo de estudio, o el 2017, perteneciente al segundo año más húmedo (si no se tiene en cuenta el año 1998/99 o 2003/04, ya que no se dispone de datos de registro hasta el año 2011), se han detectado valores menores de las siguientes variables: cloruros, conductividad eléctrica, sulfato, sodio, temperatura, bicarbonatos (sólo en Elviria) y calcio. Esto puede deberse a que durante esos periodos húmedos el acuífero se recarga y como consecuencia de ello se produce un efecto de dilución de los iones comentados, disminuye la mineralización y la CE. La disminución de la temperatura puede ser el resultado de que la entrada de agua de lluvia (más fría que la que permanece en el acuífero) haga que el agua de mezcla reduzca su temperatura.

Para los periodos secos, como los años 2011/12, 2013/14, o el último periodo seco del periodo de estudio, que comienza en 2019 y continúa hasta el final del registro, se ha observado que, por lo general, en los años 2012, 2011, 2019 y 2022 ocurre lo contrario a lo explicado para los periodos húmedos. En estos casos los iones aumentan su concentración, y aumenta la mineralización y CE.

Por otro lado, se ha observado que tanto en “Atalaya” como en “Río Padrón” existe una correlación positiva entre los nitratos y el SPI y SPEI. En el año 2011, periodo húmedo, ha sido donde se ha notado una mayor concentración de nitratos. Esto puede estar relacionado con el hecho de que cuando existe un evento de lluvia, se produce un arrastre de nutrientes (lavado del suelo) y alcanzan el acuífero. Estos dos puntos de muestreo son los que se encuentran más cercanos a los ríos, Padrón y Guadalmina, respectivamente. La influencia puede ser significativa si existe alguna conexión entre el río y el acuífero, lo que podría explicar la mayor concentración de nitratos. Los nitratos podrían ser arrastrados por el río y terminar en el acuífero durante ciertos periodos.

A continuación, se muestran algunas figuras en las que se pueden observar varios patrones comentados en el punto de muestreo “Atalaya” (Figura 33).

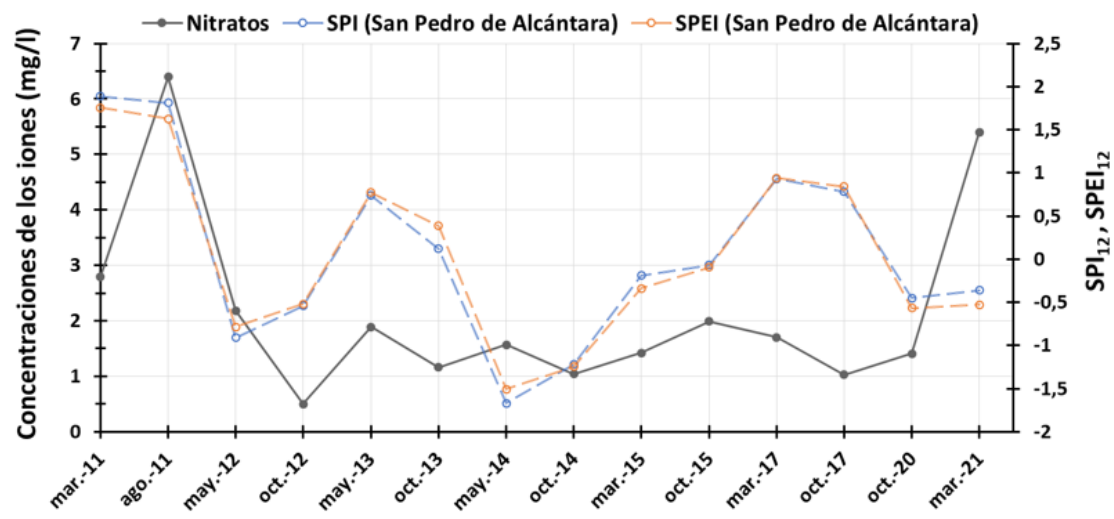
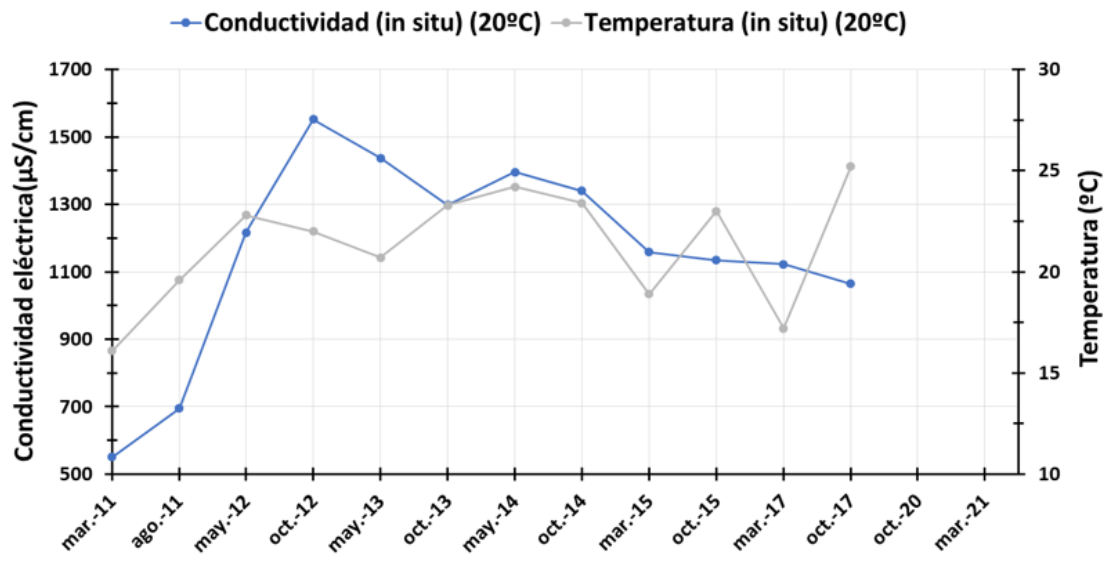
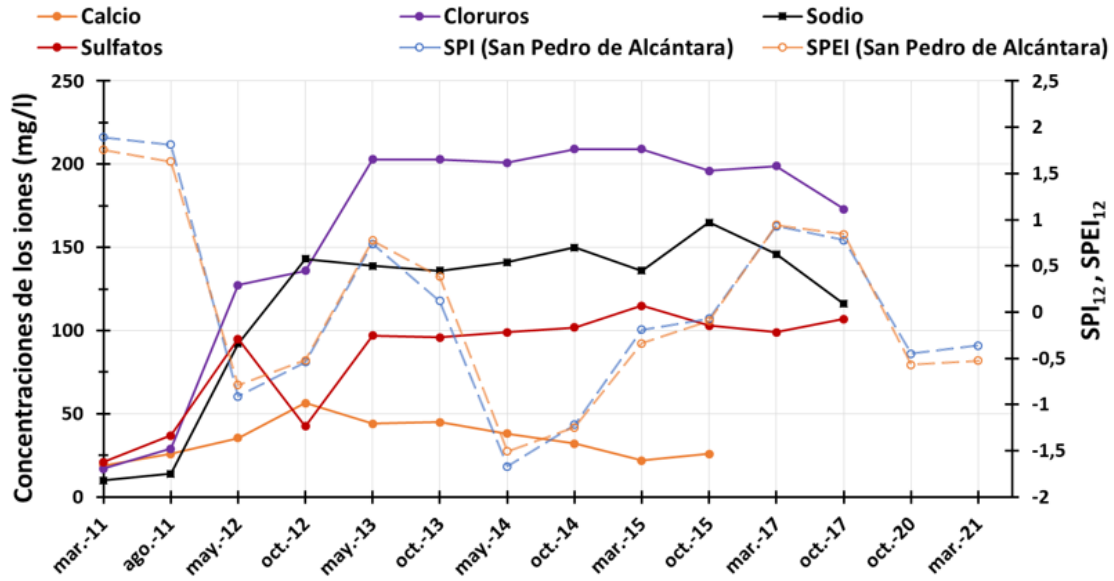


Figura 33. Evolución mensual de los principales parámetros físicos-químicos de las muestras de agua de la estación de muestreo "Atalaya" junto con la representación del SPI y SPEI para las fechas de muestreo.

En la Figura 33 se observa cómo en los periodos más húmedos (2011, 2017) existen concentraciones menores de calcio, sulfato, cloruro y sodio, lo que provoca que la CE sea menor. Además, la temperatura del agua del acuífero es menor, por la entrada más fría del agua de lluvia. En cambio, para periodos más secos (2013-2016), estos iones aumentan su concentración, y por tanto la CE aumenta también. La temperatura en este caso aumenta. Esto se puede deberse a que en episodios húmedos el agua diluye los iones y en episodios secos no existe dicha dilución. Además, el aumento de cationes como el sodio o aniones como el cloruro pueden indicar procesos de intrusión marina, ya que cuando existen periodos de sequía, el agua de lluvia no es suficiente para recargar el acuífero y es más probable que se produzca el avance de la cuña salina.

En otras estaciones no se ve el patrón generalizado tan claro. Este es el caso por ejemplo del pozo de Elviria (Figura 34), en el que se pueden apreciar “anomalías” para algunos meses concretos en el cloruro o en el sulfato para mayo de 2012. En cuanto al nitrato, este sigue el patrón comentado anteriormente, aunque para junio de 2015 asciende la concentración y supera incluso a la del año húmedo de 2011.

Es importante señalar que la comparación de puntos de agua entre sí no es una tarea sencilla, dado que existe una discrepancia en las fechas de muestreo para cada una de ellas, aunque en algunos casos estas fechas coincidan. La divergencia en los momentos de muestreo contribuye a que el análisis conjunto carezca de una fiabilidad y representatividad al cien por cien.

Al factor condicionante de la disponibilidad de muestras, se añade la complejidad de estos acuíferos, ya que se trata de acuíferos costeros de pequeño tamaño, que están sometidos en su mayoría a una explotación intensiva. Esto hace que sea complejo discriminar el origen de la salinidad en el acuífero en ciertos periodos, ya que puede estar provocada por varios factores: bombeos intensivos, avance del agua de mar hacia el continente o a una disminución de la recarga en el acuífero por la presencia de periodos secos climáticos en los que las lluvias disminuyan considerablemente, o incluso a una combinación de todos estos factores.

Las evoluciones de los parámetros de calidad e índices climáticos del resto de punto de muestreo se muestran en los anexos III-VI.

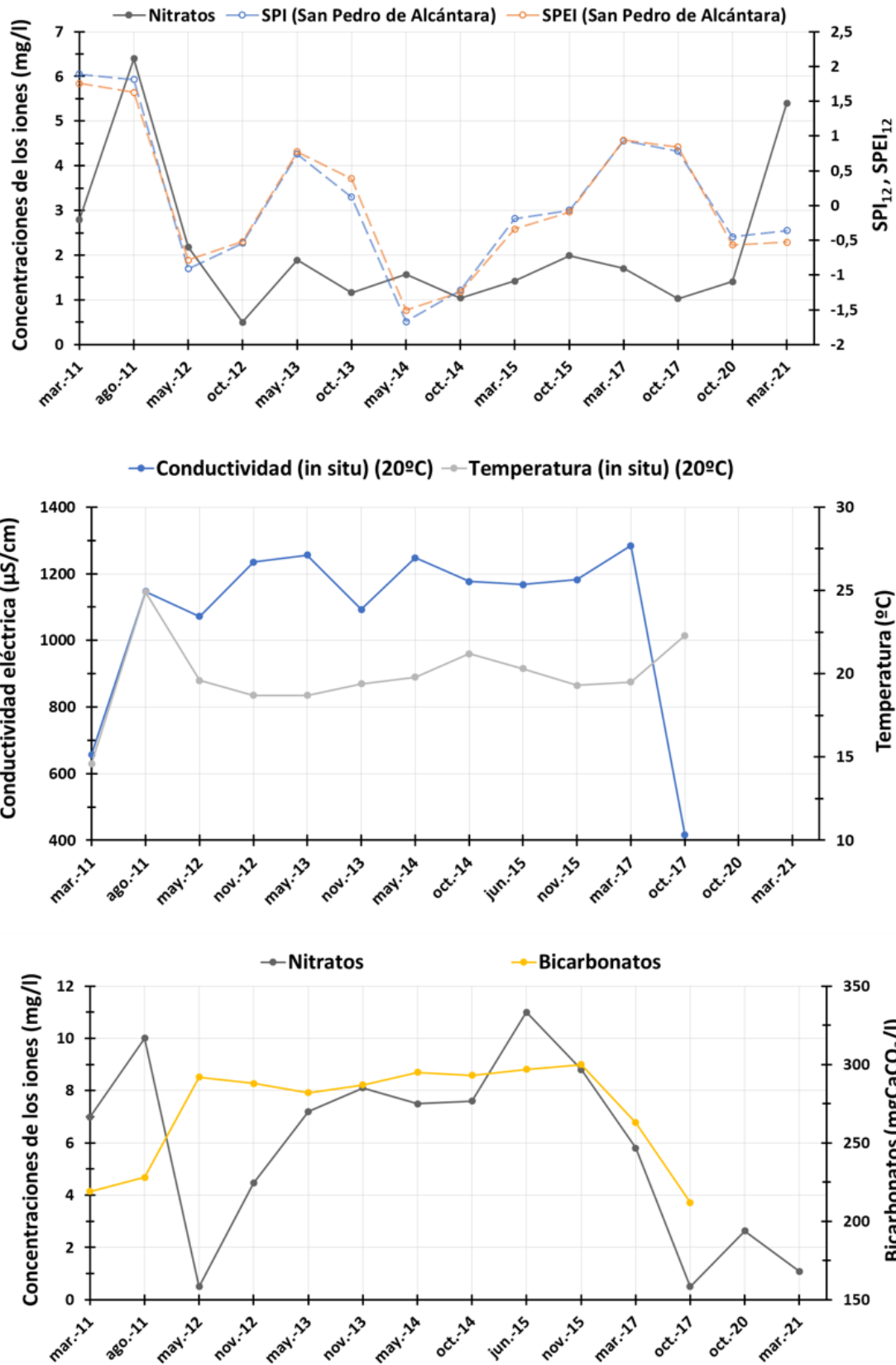


Figura 34. Evolución mensual de los principales parámetros físico-químicos de las muestras de agua de la estación de muestreo "Elviria" junto con la representación del SPI y SPEI para las fechas de muestreo.

5. CONCLUSIONES

El aumento demográfico que ha experimentado la Costa del Sol en las últimas décadas ha provocado un aumento en la demanda de agua para abastecimiento. Ello se ha visto agravado por la actividad turística, que se intensifica en el periodo estival, debido las condiciones climáticas y la calidad de vida que ofrece la región. En este contexto, la gestión adecuada de los recursos hídricos se convierte en un elemento de vital importancia para asegurar el suministro de agua a la población.

El análisis hidrometeorológico llevado a cabo en el área de estudio ha permitido identificar una cierta variabilidad climática interanual en lo que respecta a las precipitaciones, caracterizada por periodos húmedos, secos y medios. En este tipo de clima es necesario tener un conocimiento profundo del entorno y realizar una buena gestión de los recursos disponibles para satisfacer las demandas en los periodos secos y aprovechar los recursos excedentarios en los periodos húmedos.

En este Trabajo Fin de Máster se ha tratado de identificar periodos secos y húmedos a partir de dos índices climáticos, el SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) y el SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración). Posteriormente, se han realizado correlaciones entre estos índices y variables de tipo cuantitativo (niveles piezométricos) y cualitativo (parámetros físico-químicos del agua) con el objetivo de detectar un posible deterioro temporal de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona (M.A.S. 060.040) debido a eventos de sequía.

Los resultados del análisis comparativo del SPI y SPEI muestran que ambos índices han permitido la identificación de los periodos secos y húmedos a lo largo del periodo de estudio. No obstante, estos índices presentan numerosas limitaciones. Entre ellas, la discrepancia en la longitud de los registros para el cálculo de ambos índices y en consecuencia la sobreestimación del SPI (registro más largo) del número de eventos de sequía.

En cuanto a la tipología de los periodos secos identificados, se ha observado que varía en función de las estaciones y de los índices utilizados. Sin embargo, si se tiene en cuenta el porcentaje del número de meses secos durante todo el periodo de estudio, se observa una tendencia generalizada en la mayoría de las estaciones a la detección a partir del SPEI de un mayor porcentaje de meses categorizados como “extremadamente secos”.

No obstante, en términos generales, no se observa un patrón uniforme en cuanto a los índices en las diferentes estaciones. Por lo tanto, no ha sido posible determinar de manera concluyente cuál de los dos índices refleja de manera más precisa la realidad climática en la zona de estudio.

Las relaciones de estos índices con la piezometría de algunos puntos representativos de la zona de estudio indican que las evoluciones piezométricas de la

mayoría de los puntos no muestran de forma clara las sequías identificadas por los índices. No obstante, determinados puntos con un periodo de registro más extenso sí han reflejado algunos períodos más relevantes de tipo seco y húmedo, como el año 1998/99 y el 2009/10, respectivamente.

Los resultados de las correlaciones entre los índices climáticos y los parámetros físico-químicos han mostrado en algunas ocasiones altas correlaciones para algunos parámetros. El análisis más detallado de dichas correlaciones ha puesto de manifiesto que sí existen ciertos cambios en los valores de los parámetros cuando ocurren episodios lluviosos y secos. Sin embargo, se ha detectado una gran limitación en cuanto al escaso número de muestras y, sobre todo, la periodicidad con la que estas son tomadas. No todas las muestras que se han comparado se toman en la misma fecha, lo que hace aún más complejo un análisis certero. En consecuencia, es evidente la necesidad de mejorar la red de muestreo cuantitativa y cualitativa en la masa de agua Marbella-Estepona por parte de la Junta de Andalucía, en cuanto a puntos de muestreo y periodicidad en la toma de muestras.

Además, se plantea mejorar el registro de las estaciones meteorológicas de control. Durante este trabajo, se pudo constatar que un número elevado de datos faltantes en las series de variables meteorológicas, en particular la precipitación y la temperatura, afecta significativamente a los análisis en los que se utilizan índices climáticos. Por este motivo, se recomienda una mayor atención a la calidad y continuidad de los registros meteorológicos, especialmente si se pretenden realizar predicciones relacionadas con el cambio climático en la zona de estudio.

Aparte de las limitaciones encontradas en el análisis de correlación entre los índices climáticos y las variables de estado tanto cualitativo como cuantitativo en relación con el escaso registro de datos y la periodicidad de las muestras, sobre todo en el caso de los parámetros físico-químicos, existen varios factores que añaden complejidad a este análisis en la zona de estudio.

El análisis de índices de sequía basados en una señal natural como es la climatología no presenta una buena adecuación para la masa de agua subterránea Marbella-Estepona. En el ámbito climático mediterráneo, no se deberían contabilizar sequías por debajo del año y menos por debajo del mes, como es el caso de los índices objeto de este estudio.

A pesar de esas limitaciones, se ha tratado de analizar hasta qué punto los sectores acuíferos de esta masa de agua subterránea están marcados por la señal climática a partir de estos índices. Aunque se hayan detectado algunas relaciones de los mismos en las evoluciones de los niveles piezométricos y parámetros físico-químicos, la zona de estudio presenta cierta complejidad, ya que los acuíferos que componen la masa de agua subterránea son costeros y de pequeño tamaño, sometidos en su mayoría a una explotación intensiva. Todo esto contribuye a que no resulte sencillo afirmar que

el descenso de niveles piezométricos y el deterioro de la calidad del agua sea consecuencia de la señal climática (detección de periodos de sequía) en lugar de la influencia de los bombeos o de la intrusión marina dada la cercanía al mar.

Por todo ello, con este trabajo se plantea la necesidad de contrastar la información de las correlaciones obtenidas con investigaciones posteriores sobre la influencia de los bombeos, la intrusión marina y la recarga artificial en el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas, además de tratar de analizar la influencia de la señal climática. Adicionalmente, se propone una mejora en los índices climáticos ya que estos son los usados en la mayoría de los organismos que llevan a cabo la gestión de los recursos hídricos y no siempre reflejan la realidad climática con total certeza.

BIBLIOGRAFÍA

Aguado, R., Feinberg, H., Durand-Delga, M., Martín-Algarra, A., Esteras, M., Didon, J., 1990. Nuevos datos sobre la edad de las formaciones miocenas transgresivas sobre las Zonas Internas Béticas: la Formación de San Pedro de Alcántara (Provincia de Málaga). *Rev. Soc. Geol. Esp.* 3 (1-2), 79–85.

Andreu, J., Haro, D., Solera, A., Paredes, J., Assimacopoulos, D., Wolters, W. et al., 2015. Drought indicators: monitoring, forecasting and early warning at the case study scale. DROUGHT-R-SPI Technical Report no. 33, Valencia, Spain.

Argamasilla Ruiz, M. (2017). Desarrollo metodológico para la planificación y gestión del agua en áreas turísticas costeras sometidas a clima mediterráneo ya grandes variaciones estacionales de la demanda. Caso de la Costa del Sol Occidental.

Argamasilla, M., Barberá, J. A., & Andreo, B. (2017). Factors controlling groundwater salinization and hydrogeochemical processes in coastal aquifers from southern Spain. *Science of the Total Environment*, 580, 50-68.

CAPADR (2023). Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Informe de escasez y sequía. Junta de Andalucía. Dirección Genreal de Infraestructuras del Agua.

CETAQUA (2023). Informe diagnóstico sobre el Análisis del deterioro temporal debido a eventos de sequía. Centro Tecnológico del Agua en Andalucía. Versión 1.0.

CHG (2023). Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Informe de escasez y sequía.

DIDON, J., 1969. Etude géologique du Campo de Gibraltar (Espagne méridionale). Thèse. Université Paris: 539 pp.

Dikshit, A., Pradhan, B., & Huete, A. (2021). An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network. *Journal of environmental management*, 283, 111979.

Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

HISDAL, H.; TALLAKSEN, L.M.; PETERS, E.; STAHL, K.; ZAIDMAN, M. (2001). Drought event definition. In *Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Final Report to the European Union ENV-CT97- 0553*, Demuth S, Stahl K (eds). Institute of Hydrology, University of Freiburg; 17–26.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate (Handbuch der Klimatologie, Bd. 1, Teil C). Apud. Beck, C.

Laimighofer, J., & Laaha, G. (2022). How standard are standardized drought indices? Uncertainty components for the SPI & SPEI case. *Journal of Hydrology*, 613, 128385.

Lupiani, E., 2007. Marbella – Estepona (M.A.S. 060.040). Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga. Diputación de Málaga – IGME. Tomo II. pp. 155–160.

Martin, J., Argamasilla, M., Andreo-Navarro, B., & Martinez, P. (2016). Análisis preliminar de diferentes índices de sequía en el marco de la planificación hidrológica. El caso del sistema de explotación de la Costa del Sol occidental.

Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. AMS 8th Conf. Appl. Climatol. 179–184.

NDMC (2018) National Drought Mitigation Center. (s. f.). (2018). <https://drought.unl.edu/monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>

Padilla, A. y Delgado, J. (2013): Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Programa TRASERO 2.0. Departamento de ciclo hídrico, Diputación Provincial de Alicante, 87 p.

Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.

Pérez, J. M., Rodríguez, N. L., & Lama, A. V. Grazalema-Benamahoma-BenaocazVillaluenga-Grazalema (Cádiz), 2014.

PES, 2021. Plan Especial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible.

Raposo, V. D. M. B., Costa, V. A. F., & Rodrigues, A. F. (2023). A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors. *Science of The Total Environment*, 165550.

Rhee, J., & Im, J. (2017). Meteorological drought forecasting for ungauged areas based on machine learning: Using long-range climate forecast and remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237, 105-122.

Sánchez García, D., Galindo Zaldívar, J., Martínez-Moreno, F. J., Barrera García, A., Ortuño Morales, A., Calero Díaz, G., ... & Arnaldos, M. (2018). Contribución al

conocimiento de la geometría y límites de los acuíferos pliocenos de Marbella y Estepona (provincia de Málaga) mediante la aplicación de técnicas geofísicas.

Senciales, J.M., 2007. El clima en la provincia de Málaga. Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga. Diputación de Málaga – IGME. Tomo I. pp. 49–58.

Serrano, F., & Guerra-Merchán, A. (2004). Geología de la provincia de Málaga. Diputación de Málaga.

Smakhtin, V. U., & Hughes, D. A. (2007). Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 880-890.

Tigkas, Dimitris & Vangelis, Harris & Tsakiris, George. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*. 8. 697–709. 10.1007/s12145-014-0178-y.

Tirivarombo, S., Osupile, D., & Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106, 1-10.

Vera, J. A., Martín-Algarra, A., Sánchez-Gómez, M., Fornós, J. J., & Gelabert, B. (2004). Cordillera Bética y Baleares. *Geología de España*, 347-464.

Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J.I., Beguería S., (2009) 'A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index - SPEI' (in prep.).

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

World Meteorological Organization. (2012). Standardized Precipitation Index User Guide (WMO-No. 1090). Authors: Svoboda, Mark; Hayes, Michael; Wood, Deborah A.; World Meteorological Organization (WMO)

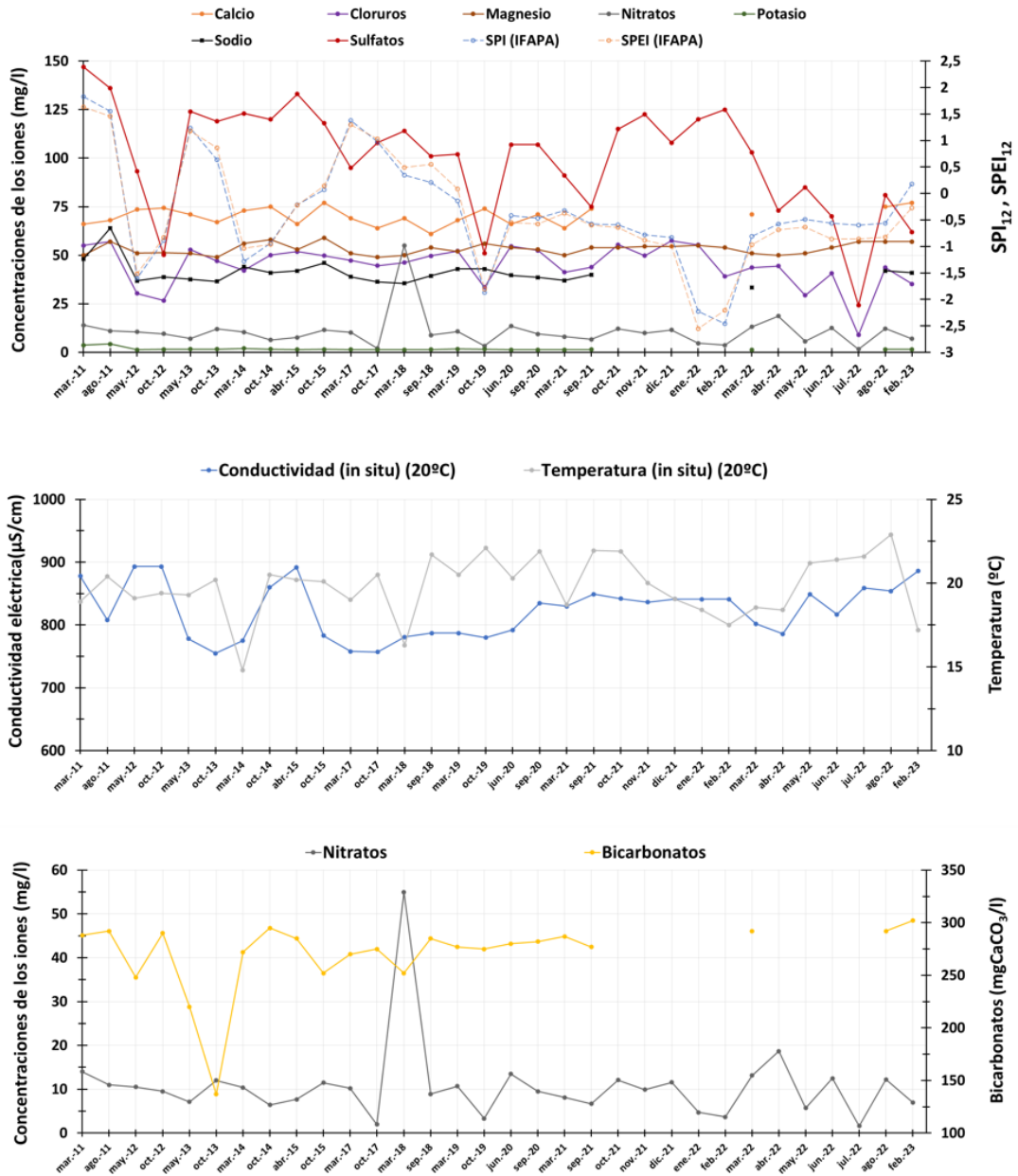
Recursos web

CSMAEA, 2023. Formulario de consulta de resultados analíticos de la Red DMA de la Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul, Junta de Andalucía. <http://dma.agenciamedioambiente.yagua.es/> (Consulta: 31/05/23).

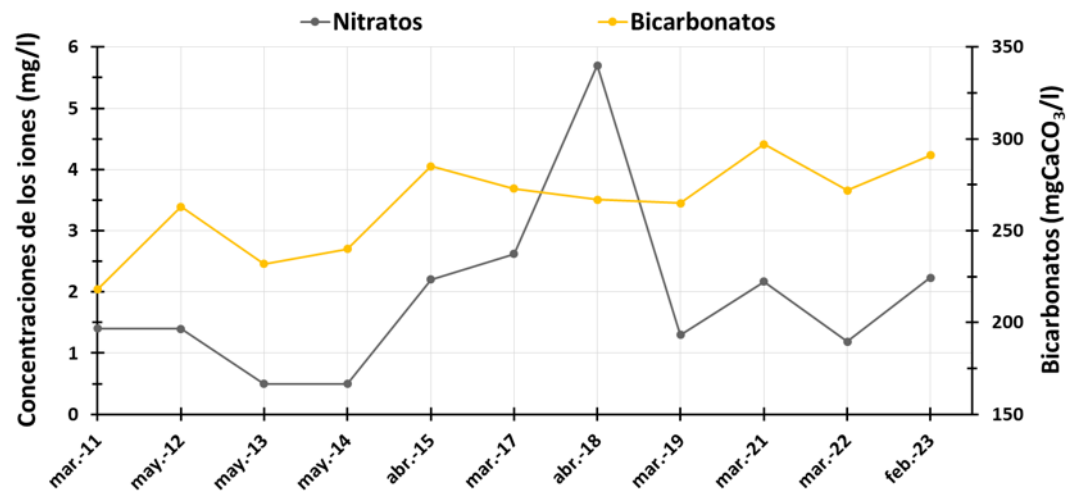
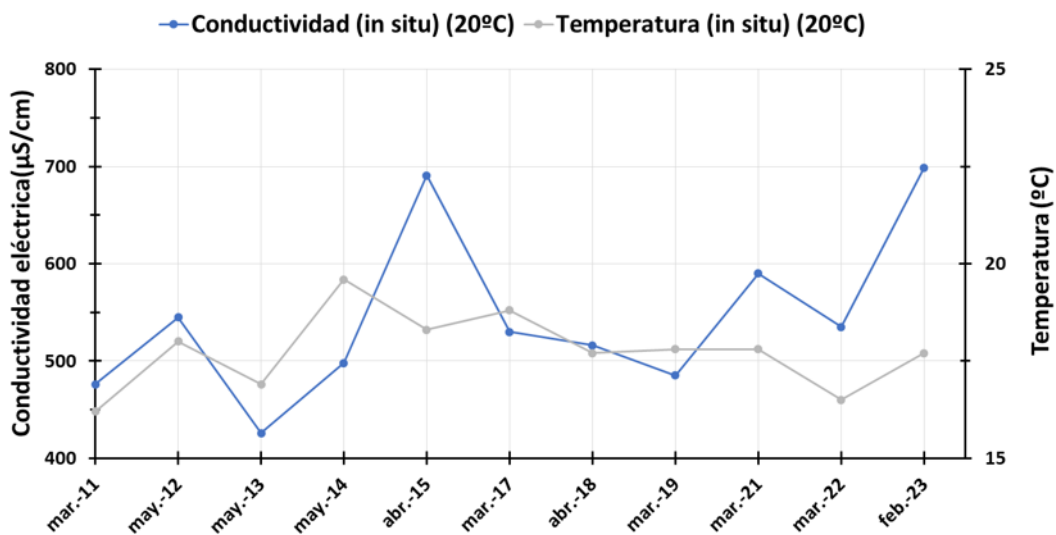
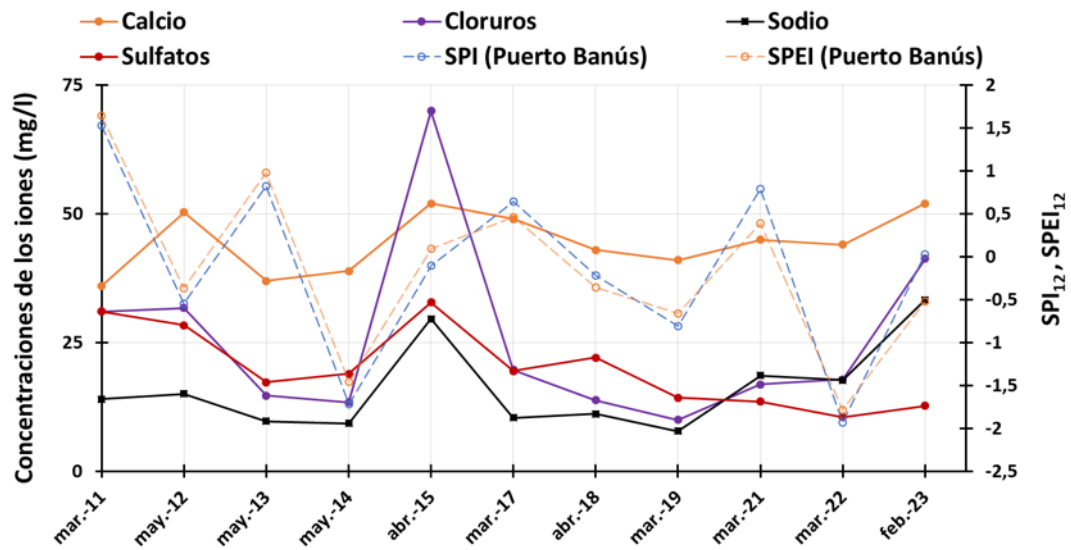
Red S.A.I.H. HIDROSUR: Sistema automático de Información Hidrológica de la Junta de Andalucía. <http://www.redhidrosurmedioambiente.es/saih/datos/a/la/carta> (Consulta: 06/06/2023).

Visor cartográfico del Sistema de información sobre redes de seguimiento del estado e información hidrológica, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.<https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/index.html?herramienta=Piezometros> Consulta: 14/06/2023).

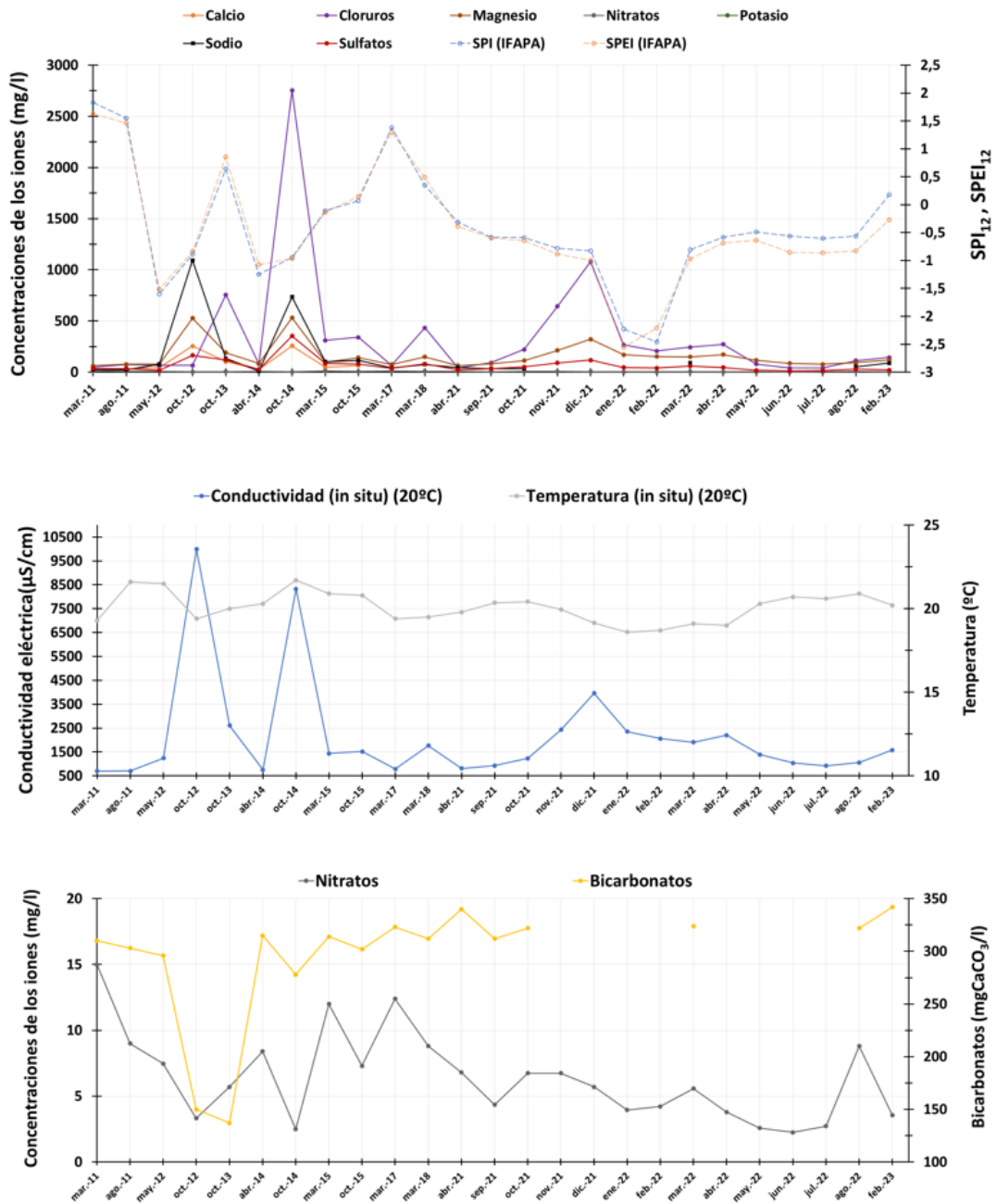
ANEXO III: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo “Monterroso”



ANEXO IV: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo "Río Verde"



ANEXO V: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo “Río Padrón”



ANEXO VI: Evoluciones de los parámetros físico-químicos en el punto de muestreo “Señorío”

