

# **Trabajo Fin de Máster**

**Máster en Geología: Técnicas y Aplicaciones**

## **Análisis espectral del régimen de explotación de Sistemas Geotérmicos Someros en el Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza**



**Sylvia Muela Maya**

**Noviembre 2018**

Directores:

José Ángel Sánchez

Alejandro García Gil

Enric Vázquez

# ÍNDICE

## RESÚMEN – ABSTRACT

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
2.	OBJETIVOS .....	5
3.	SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA .....	6
3.1.	Situación geográfica.....	6
3.2.	Situación geológica .....	7
4.	CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO Y GEOTÉRMICO .....	9
4.1.	Contexto hidrogeológico .....	9
4.2.	Contexto geotérmico .....	10
5.	METODOLOGÍA .....	11
5.1.	Registro de datos del régimen de explotación de sistemas geotérmicos .....	12
5.2.	Tratamiento de datos .....	12
5.2.1.	Depuración y sincronización.....	12
5.2.2.	Cálculo de la potencia térmica diaria disipada .....	14
5.3.	Análisis estadístico del régimen de explotación de sistemas geotérmicos someros....	15
5.4.	Análisis espectral de series temporales y regresión sinusoidal .....	16
5.5.	Ajuste de las funciones para obtener las curvas tipo .....	20
6.	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN .....	22
6.1.	Resultados del análisis estadístico del régimen de explotación de los sistemas geotérmicos someros.....	22
6.2.	Resultados del análisis espectral y regresión sinusoidal de las series temporales.....	28
6.3.	Resultados del ajuste para obtener la curva tipo .....	31
7.	DISCUSIÓN .....	38
8.	CONCLUSIONES .....	41
9.	BIBIOGRAFÍA.....	43
10.	ANEXO I. Funciones de ajuste realizadas para la obtención de las curva tipo cada una de las variables analizadas .....	46
11.	ANEXO 2. Curvas tipo diferenciadas en función de la tipología. ....	48

## **RESÚMEN**

Actualmente la gestión de los sistemas geotérmicos someros se encuentra en fase de desarrollo. Se trata de una tecnología que, aunque ha sido utilizada desde hace mucho tiempo, la implementación masiva producida ha suscitado en los últimos años una mayor incertidumbre y preocupación. La recopilación y registro de los datos de explotación de los sistemas geotérmicos someros resultan necesarios para evaluar el buen funcionamiento y eficiencia de estos sistemas. En este trabajo se muestra un novedoso estudio realizado en 15 instalaciones de geotermia somera de la ciudad de Zaragoza mediante el cual se han podido conocer los regímenes de explotación y por tanto establecer pautas en el comportamiento de estos sistemas, que permitan desarrollar una mejor una gestión de los mismos. El ajuste llevado a cabo mediante análisis espectral y regresión sinusoidal ha demostrado la presencia en los regímenes de explotación de los sistemas, de ciclos de periodicidad basados tanto en eventos a pequeña escala, como puede ser una jornada laboral, como a gran escala con la estacionalidad, obteniendo ciclos de cadencia horaria y de cadencia mensual respectivamente.

## ***ABSTRACT***

*The management of shallow geothermal systems is currently under development. Although it has been used for a long time, this technology has raised big doubts and concerns in the last years due to the massive implementation. The collection and analysis of exploitation regime datasets of shallow geothermal systems results necessary to assess the good performance and efficiency of these systems. This dissertation shows a novel study carried out in 15 shallow geothermal installations in the city of Zaragoza which has allotted to the definition of existent exploitation regimes and, therefore, to establish patterns of the behavior of the systems, enabling a better management performance for them. The adjustments carried out by spectral analysis and sinusoidal regression has demonstrated the presence of periodic cycles based on both small-scale events, e.g. working days, and on a large scale cycles related to seasonality in the operating regimes of the systems, obtaining respectively hourly and monthly cadence cycles.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la explotación de los recursos geotérmicos someros está sufriendo un gran apogeo (Epting *et al.*, 2017) debido a la implementación de este tipo de energía renovable para la climatización de las edificaciones, siendo Zaragoza una de las ciudades consideradas pioneras en su implantación (Garrido *et al.*, 2010). Se espera que la demanda de este recurso siga aumentando en los próximos años (Jaudin, 2013), por lo que resulta necesario desarrollar una gestión sostenible de esta tecnología. La implementación masiva ha causado problemas derivados de una falta de sostenibilidad energética de las explotaciones provocada por eventos de interferencia térmica, así como la incertidumbre de los usuarios por la presencia de un marco legal escaso que todavía está siendo desarrollado por parte de la administración competente (García Gil, 2015). Las estrategias eficaces de gestión van encaminadas a la utilización de modelos numéricos para la simulación del régimen térmico del acuífero urbano (Banks, 2009), debido a la elevada complejidad de los datos de las explotaciones, la heterogeneidad del medio y la variabilidad temporal de funcionamiento de las mismas. Actualmente la existencia de redes de control adecuadas con medidores en continuo hace posible la obtención de los datos suficientes como para obtener los parámetros necesarios que permiten la calibración de los modelos con medidas reales.

Los sistemas geotérmicos someros se basan en la obtención de la energía calorífica contenida en los materiales que componen las capas más superficiales (<250 m) de la corteza terrestre y en el agua que circula a través de estos. El proceso de transmisión de calor desde el núcleo de la Tierra hacia las zonas externas de la corteza junto con la capacidad del terreno para amortiguar las oscilaciones térmicas que se dan en superficie, hace posible que a partir de aproximadamente 15 m de profundidad exista una estabilidad térmica cuya temperatura es aproximada a la media anual de la región + 1 o 2 °C (Parsons, 1970), característica que justifica el rápido desarrollo de estos sistemas. La explotación se lleva a cabo mediante sistemas abiertos o cerrados, con el uso de bombas de calor geotérmicas (GHP) e intercambiadores térmicos. En los sistemas cerrados la bomba de calor se encuentra conectada a un circuito de intercambio de calor situado en el terreno constituido por unas tuberías por las cuales circula el fluido calorportador de la energía. Los sistemas abiertos en cambio aprovechan el calor directamente del agua subterránea haciéndola pasar por un intercambiador localizado en superficie para posteriormente ser devuelta de nuevo al acuífero.

En Zaragoza la explotación geotérmica se realiza mediante bombas de calor por medio de sistemas abiertos debido a la existencia de importantes reservas de agua subterránea en la zona. En condiciones naturales (no impactadas) el agua se capta del acuífero a una temperatura en torno a  $17 \pm 0,5$  °C y es transferida a un intercambiador térmico el cual modifica la temperatura del agua en función del uso deseado, para posteriormente devolverla al acuífero, existiendo una renovación constante del fluido encargado del transporte de energía. En el proceso interviene también una bomba de calor que aporta la potencia térmica necesaria que no se puede obtener únicamente con el intercambiador, mejorando la eficiencia del proceso de transferencia de temperatura tanto de un cuerpo frío a otro caliente como en el sentido contrario. La climatización es por tanto el uso más común de la geotermia somera, tanto para calefacción en invierno donde se extrae el calor del agua subterránea devolviéndola al acuífero con una temperatura inferior a la de captación, como para refrigeración en verano invirtiéndose el proceso y produciendo un vertido con una temperatura más alta que la inicial.

El crecimiento de la implantación de esta tecnología en el Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza ha creado una variación en la temperatura del agua subterránea provocada por la interferencia térmica tanto entre instalaciones como efectos de autointerferencia en las propias instalaciones (Garrido *et al.*, 2010). La geotermia somera no produce consumo hídrico por lo que la citada contaminación térmica es el principal impacto que sufre el acuífero. Esto provoca que se deba llevar a cabo un seguimiento mediante la supervisión y valoración de los puntos de agua existentes en la zona de estudio.

Existe una Red de Control Geotérmico en Zaragoza, establecida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) en colaboración con otras instituciones, donde se encuentran monitorizados los 46 piezómetros que constituyen la red proporcionando medidas en continuo de nivel piezométrico y temperatura del agua registradas cada 15 minutos (BARO-DIVER Schlumberger datalogger) (García-Gil, 2015). Se dispone también de un catálogo de aprovechamientos geotérmicos que incluye los datos hidrogeológicos de las instalaciones, así como de su infraestructura, donde cada explotación tiene como mínimo un pozo de vertido y otro de captación, constando de más pozos en función de la demanda de potencia térmica requerida y el tamaño de la explotación.

Actualmente los citados sistemas geotérmicos de la ciudad de Zaragoza están siendo monitorizados en continuo, registrando medidas cada 15 minutos de caudal [L/s] y

temperatura [°C] tanto de captación como de vertido. Este gran volumen de datos generado conduce necesariamente a elaborar una metodología que permita su tratamiento y clasificación para poder ser estudiados con el fin de entender los regímenes de funcionamiento y comportamiento de estos sistemas, conseguir este proceso será el objetivo principal del presente trabajo.

El análisis espectral, basado en el análisis de Fourier (Chatfield, 2003; Brigham, 1988), junto con el análisis de regresión sinusoidal de las series temporales de distintas variables que conforman el régimen de explotación de los sistemas (temperatura de vertido equivalente diaria, caudal acumulado diario y potencia disipada diaria), van a permitir la obtención de la periodicidad y los rangos de amplitud presentes en cada una de las instalaciones estudiadas, seleccionando las frecuencias más representativas asociadas en cada caso a una periodicidad determinada. A partir de los datos de periodo, amplitud y fase obtenidos por medio de los citados análisis de las series estudiadas para cada instalación, se va a proceder a la creación de una curva tipo que se ajuste mediante el cálculo de una función a los datos brutos disponibles. Mediante dichas funciones y la representación gráfica de las curvas tipo se podrán analizar las amplitudes y periodicidades que van a permitir describir los regímenes de explotación de los distintos sistemas geotérmicos, realizando una agrupación en función de su tipología y procediendo a un análisis comparativo de los mismos.

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo principal del presente trabajo es el análisis del régimen de explotación y definición de una curva tipo de funcionamiento de los sistemas geotérmicos someros a partir de los datos de 15 de las 33 instalaciones presentes en el Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza. Este análisis va a permitir obtener una visión global del funcionamiento de estos sistemas e identificación de anomalías, consiguiendo la definición de un régimen estándar en cada caso que sirva como herramienta de diagnóstico derivando en el futuro en una mejor gestión.

Para ello se procederá al tratamiento de los datos de las instalaciones con el fin de obtener series filtradas y homogéneas de cadencia diaria que puedan ser fácilmente implementables en los métodos de análisis.

Estos métodos parten de un estudio global mediante estadísticos descriptivos básicos, seguido del análisis espectral para la predicción de la periodicidad por medio de los ciclos obtenidos más significativos y por último la regresión sinusoidal que permitirá validar los ciclos anteriores y obtener los valores de amplitud y fase necesarios para la realización del ajuste a la curva de funcionamiento tipo de las variables analizadas en cada una de las instalaciones.

A partir de la recopilación de los resultados obtenidos por medio de los análisis anteriores se van a comparar los regímenes de funcionamiento de los sistemas en función de su tipología, permitiendo obtener una visión general de su comportamiento atendiendo a la estacionalidad.

### **3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA**

#### **3.1. Situación geográfica**

El área de estudio de este trabajo se enmarca dentro del Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza, sobre el cual se asienta el casco urbano de la ciudad (**Fig. 1**). Zaragoza se encuentra ubicada al NE de la Península Ibérica, siendo la capital de la Comunidad Autónoma de Aragón. Se sitúa a una altitud de 217 m.s.n.m. y es atravesada por el Ebro, en dirección NW-SE, que actúa de río principal, además de ser el lugar de confluencia de dos de sus afluentes. Desembocando el río Gállego por su margen izquierda y el río Huerva por la derecha. La topografía de la ciudad es plana en su mayoría, aunque tiene cierto gradiente provocado por la transición de la divisoria entre las cuencas del Ebro y Huerva a las diferentes terrazas existentes (Moreno *et al.*, 2008).

Teniendo en cuenta el contenido del estudio es importante destacar que el clima es mediterráneo con una acusada influencia continental, causante de los grandes contrastes térmicos tanto diarios como estacionales que tienen lugar en éste área. Los inviernos son relativamente fríos con valores mínimos diarios menores de 5 °C y en verano se pueden alcanzar temperaturas de hasta 40 °C, siendo la temperatura media anual de 15 °C. Las precipitaciones tienen una media de 325 mm al año (Moreno *et al.*, 2008), considerando el mes más seco julio y el más húmedo mayo.

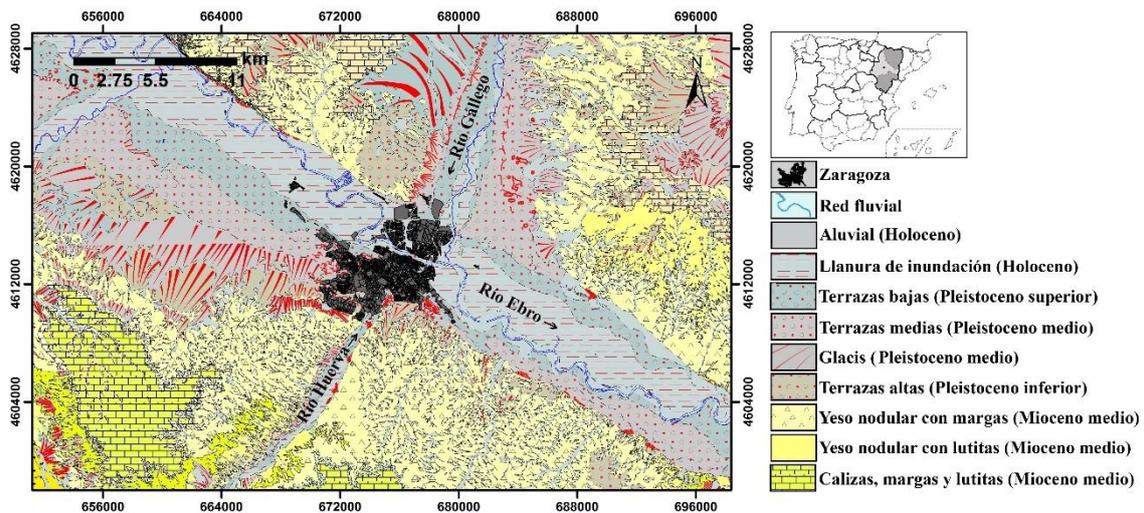


Fig. 1. Situación geográfica de Zaragoza al NE de la Península Ibérica y situación geológica del área de estudio y su entorno con una visión global de la red fluvial y el núcleo urbano.

Esta amplia variabilidad térmica hace que el uso de la climatización (calefacción-refrigeración) tenga un papel esencial para la obtención de unas condiciones ambientales óptimas en el interior de las edificaciones. Debido a la continentalidad climática es la refrigeración el uso que ocupa dos tercios del aprovechamiento geotérmico de la ciudad (Garrido *et al.*, 2010), siendo lo restante para calefacción.

### 3.2. Situación geológica

La ciudad de Zaragoza se encuentra situada (**Fig. 1**) en el sector central de la cuenca del Ebro, depresión cenozoica que representa los últimos estadios de evolución de la cuenca de antepaís meridional del orógeno Pirenaico (Barnolas y Robador, 1991; Pardo *et al.*, 2004), con forma triangular está limitada por este sistema al norte, por la Cordillera Costero Catalana al noreste y al sur por la Cordillera Ibérica. Estos límites y su actual estructura se establecieron cuando los cabalgamientos surpirenaicos alcanzaron su emplazamiento definitivo, entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior (Pardo *et al.*, 2004; Riba *et al.*, 1983).

La cuenca tiene un sustrato constituido por un zócalo paleozoico con cobertera mesozoica, en cuyo interior se produjo la sedimentación de materiales continentales cenozoicos, conglomerados, lutitas, areniscas, margas, además de carbonatos y evaporitas provenientes de los relieves cercanos, actuando en forma de relleno y distribuyéndose de forma que los materiales más finos se sitúan en el centro de la cuenca. El depósito de estos materiales en el margen meridional de la cuenca se produjo durante el Paleoceno,

produciéndose un cambio durante el Eoceno que conllevó a una transgresión generalizada dando lugar a una sedimentación de carácter marino (Barnolas y Robador, 1991). En este momento se rellenaron las zonas más septentrionales de la cuenca y finalmente se produjo el cambio a condiciones endorreicas dando lugar a un largo periodo de sedimentación lacustre (Riba *et al.*, 1983).

Estas condiciones se extendieron hasta el Mioceno favoreciendo la acumulación de importantes espesores de sedimentos evaporíticos, principalmente halita y yeso. Los materiales predominantes son de naturaleza margo-yesífera con intercalaciones de margas y arcillas cuyo conjunto da nombre a la Fm. Zaragoza de edad Oligoceno-Mioceno (Quirantes, 1978). Se produce un cambio durante el tránsito Mioceno-Plioceno a unas condiciones de depósito exorreicas, donde el material es transportado hasta el Mediterráneo a través de una red de drenaje que tiene al río Ebro como colector principal y se configura a lo largo del Cuaternario (García Castellanos *et al.*, 2003; Moreno *et al.*, 2008).

Los materiales son arrastrados a través de esta red fluvial provenientes de los relieves más cercanos dando lugar a su depósito y produciendo la formación de terrazas fluviales y glacis (Soriano, 1990; Soriano, 2011), alternando periodos de acumulación con episodios erosivos debido a las variaciones climáticas que se produjeron durante el Pleistoceno y a lo largo del Cuaternario. Dentro de los depósitos aluviales que componen el acuífero estudiado se distinguen dos dominios sedimentarios cuaternarios principales, una zona de abanico aluvial relacionada genéticamente con el río Huerva y las terrazas aluviales producto de la dinámica fluvial de los ríos Ebro y Gállego. Los depósitos de terraza presentan facies de canal compuestos por gravas granosostenidas con cantos silíceos y carbonatados, forman cuerpos sedimentarios de geometría tabular con estratificación cruzada planar, tienen varios metros de grosor y se pueden extender lateralmente más de 100 m. Estos cuerpos pueden presentar localmente estratificación cruzada en surco y/o intercalaciones de cuerpos lenticulares arenosos (Luzón *et al.*, 2010).

Afectando a los materiales depositados durante el Cuaternario se produjeron una serie de fenómenos de subsidencia kárstica que afectaron de forma importante a la geometría de los cuerpos detríticos recientes (Simón *et al.*, 2014). Dicha subsidencia y los demás fenómenos de disolución kársticos continúan hasta la actualidad debido a la presencia de los materiales evaporíticos que rellenan los primeros estadios de la cuenca y sobre los que

se asientan los depósitos cuaternarios, hecho que provoca la elevada aparición de estos eventos en el entorno de Zaragoza (Simón *et al.*, 2009).

## **4. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO Y GEOTÉRMICO**

### **4.1. Contexto hidrogeológico**

Durante el Pleistoceno se produjeron cambios en el nivel de base de los ríos que dieron lugar a la formación de terrazas distribuidas a distintas alturas, las cuales conectan lateralmente con sistemas de glacis procedentes de los relieves cercanos, siendo los de mayor entidad los derivados del entorno de La Muela situada al suroeste de Zaragoza (**Fig. 1**). En continuidad con los relieves cenozoicos aparecen conos de deyección de edad Holoceno y menor extensión, además del desarrollo de valles de fondo plano sobre los materiales cenozoicos, formando el relleno y actuando como red de drenaje secundaria del sistema acuífero.

Según la terminología de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000) existen dos unidades acuíferas. Por un lado, el aluvial del Ebro, que se extiende desde la localidad de Gelsa hasta la desembocadura del Jalón y el aluvial del Gállego, donde se distingue la porción de acuífero sobre la que se asienta el núcleo urbano de la ciudad de Zaragoza denominada “Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza” (Garrido *et al.*, 2006; Garrido *et al.*, 2010). Cuyas singulares propiedades hidrogeológicas y el elevado aprovechamiento de las aguas subterráneas hacen que este entorno disponga de un tratamiento especial, siendo la geotermia uno de los usos más importantes que se dan en el acuífero.

El espesor del acuífero es variable entre 5 y 60 m, debido a los procesos de karstificación desarrollados como consecuencia del sustrato evaporítico presente (Sánchez Navarro *et al.*, 2004; Soriano *et al.*, 2012), donde cabe destacar la presencia de dos surcos, uno al Sur de la ciudad y otro a lo largo del río Gállego, que se encuentran rellenos por más de 40 m de sedimento. En total el acuífero aluvial ocupa una superficie de 632 km<sup>2</sup>. El espesor saturado medio varía entre 5 y 40 m y se alcanza una profundidad del nivel freático de entre 7 y 34 m, cuyo patrón general de flujo de agua subterránea es noroeste-sureste en el sector sureste de la zona, que oscila a una dirección oeste-este en la parte noroeste (García Gil *et al.*, 2015). Se considera que los parámetros hidrogeológicos son

elevados. La transmisividad, según la estimación realizada mediante un modelo calibrado de flujo subterráneo, está entre 2500 y 3000 m<sup>3</sup>/día (Garrido *et al.*, 2006), siendo puntualmente más alta en la margen izquierda del río Ebro (hasta 21.000 m<sup>3</sup>/día) debido al mayor espesor respecto de la margen derecha. El valor de permeabilidad se establece entre 10 y 1000 m/día (Moreno *et al.*, 2008).

#### **4.2. Contexto geotérmico**

Actualmente el uso principal del acuífero estudiado es su explotación para la obtención de energía geotérmica. Se tiene constancia de la existencia de 150 puntos de agua (Garrido *et al.*, 2010) correspondientes a diferentes aprovechamientos de agua subterránea involucrados en procesos de geotermia. Mediante la clasificación de estos puntos de agua, se realizó un catálogo de aprovechamientos que actualmente tiene registradas 60 instalaciones geotérmicas someras. Debido al crecimiento de la demanda de este recurso, se espera que esta cifra continúe aumentando progresivamente. Según la Plataforma Tecnológica Española de Geotermia (Geoplat, 2010), Zaragoza dispone de una potencia instalada con bombas de calor superior a 30 MW, cifra que se considera elevada teniendo en cuenta que en toda España existe un valor total situado entre 60 y 80 MW.

De las 60 instalaciones que conforman el catálogo de aprovechamientos geotérmicos de la ciudad de Zaragoza (**Fig. 2**), existen datos de registro del funcionamiento de 33 sistemas, cuya información requerida para su análisis ha sido proporcionada por el IGME y la CHE a través de un registro de fichas de los aprovechamientos que se encuentran inventariados donde aparece reflejada la información relativa a la infraestructura de las instalaciones. Además de datos relativos al régimen de explotación como son los caudales [L/s] y temperaturas [°C] tanto de captación como de vertido de cada una de los sistemas geotérmicos, donde como mínimo se requiere la existencia de al menos un pozo de captación y otro de vertido, puesto que se trata exclusivamente de sistemas abiertos.

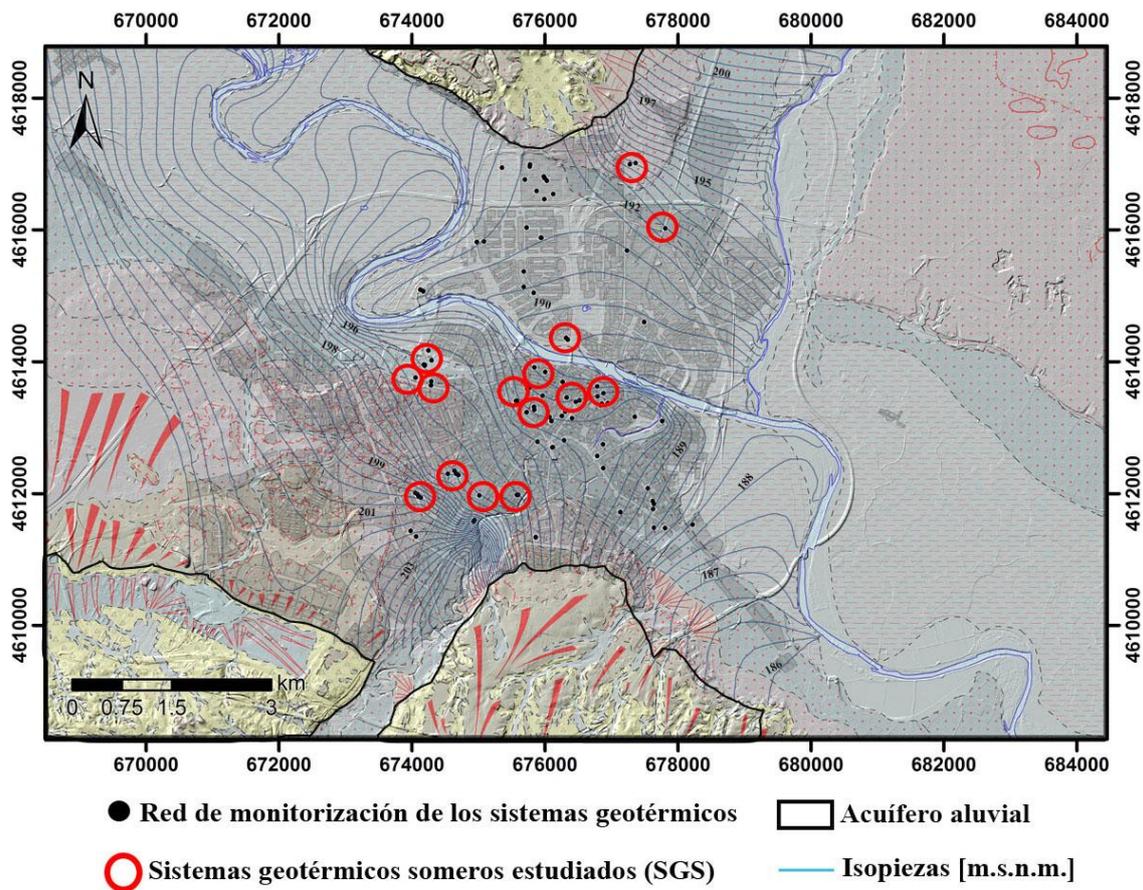


Fig. 2. Situación de los sistemas geotérmicos someros (SGS) involucrados en el estudio y ubicados en la zona de Acuífero Aluvial Urbano sobre el que se asienta el casco urbano de la ciudad de Zaragoza. Se observa además, la Red de monitorización de los sistemas geotérmicos que se encuentran distribuidos por la ciudad.

## 5. METODOLOGÍA

Las pautas seguidas para análisis del régimen de explotación de los sistemas geotérmicos someros, detalladas a continuación, parten de la obtención de las series temporales que han sido objeto de estudio por medio de estadísticos descriptivos básicos, análisis espectral y el método de la regresión sinusoidal. A partir de estos métodos se han obtenido los parámetros necesarios para la creación de una curva tipo del régimen de explotación de cada sistema.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica, tanto del entorno geológico e hidrogeológico del Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza como en general de la Cuenca del Ebro. Además de la revisión de bibliografía sobre el aprovechamiento geotérmico somero del área de estudio y otras zonas y la recopilación de los datos de explotación geotérmica necesarios para su tratamiento y análisis en este trabajo.

## **5.1. Registro de datos del régimen de explotación de sistemas geotérmicos**

Las instalaciones de sistemas geotérmicos someros de la ciudad de Zaragoza, tienen la responsabilidad establecida por la CHE de velar por el buen estado tanto cualitativo como cuantitativo de las masas de agua subterránea como parte del dominio público hidráulico. Por este motivo los usuarios de estos sistemas han establecido un registro continuo del régimen de funcionamiento de las explotaciones, llevado a cabo mediante medidores en continuo (caudalímetros y sondas de temperatura) encargados de registrar los parámetros de caudal [L/s] y temperatura [°C], tanto de captación como de vertido con un intervalo de medida de 15 minutos. Estos datos son transferidos al IGME, a partir del convenio establecido con la CHE, para su utilización en trabajos de investigación, como en este caso, y apoyo técnico para la realización de expedientes de autorización de vertidos térmicos en el Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza.

## **5.2. Tratamiento de datos**

Debido al uso de diferentes sistemas de medida en continuo, existe una amplia variabilidad en los datos proporcionados por los usuarios de las explotaciones, donde los intervalos de medida no siempre son constantes, aparecen valores erróneos o no se dispone de determinados periodos de registro debido a problemas de monitorización u otras causas, por lo que resulta necesario su tratamiento y clasificación para que puedan ser estudiados.

La citada variabilidad existente en los datos adquiridos correspondientes a los 33 sistemas geotérmicos someros hace necesario llevar a cabo un procesado de estos, mediante la hoja de cálculo *Microsoft Excel 2016* (Pérez López y Capella, 2002) que será el punto de partida del estudio.

### **5.2.1. Depuración y sincronización**

A partir de los datos disponibles ha sido posible el tratamiento de 33 instalaciones de geotermia somera (**Tabla 1**). El periodo de monitorización de cada uno de los sistemas y su registro es distinto y el intervalo de las mediciones en continuo realizadas en muchos casos no se ajusta a los 15 minutos establecidos. Por este motivo se han sincronizado conforme una guía temporal de referencia con una cadencia de 15 minutos, con el objetivo de obtener una serie de datos continua y homogénea. Además, se han eliminado los

Tipología	Sistema geotérmico somero	Inicio registro	Final registro	Nº días	Nº registros 15-min.
<b>HOTELES</b>	SGS-HT1	01/08/2015	28/02/2017	578	55486
	SGS-HT2	01/04/2015	30/06/2017	822	78912
	SGS-HT3	01/10/2015	30/06/2017	639	61344
	SGS-HT4	25/06/2015	28/02/2017	615	59040
<b>HOSPITALES</b>	SGS-HP1	01/01/2015	30/11/2016	700	67200
	SGS-HP2	22/01/2016	31/07/2017	557	53471
	SGS-HP3	12/12/2014	30/06/2017	932	89535
	SGS-HP4	01/04/2016	28/02/2017	334	32064
	SGS-HP5	18/04/2016	31/03/2017	347	33354
<b>CENTROS DE OCIO</b>	SGS-CO1	01/01/2016	30/04/2017	486	46657
	SGS-CO2	10/10/2015	28/02/2017	502	48097
	SGS-CO3	01/07/2014	30/04/2017	1035	99360
	SGS-CO4	24/03/2016	31/05/2017	434	41664
	SGS-CO5	02/03/2016	28/02/2017	362	34752
	SGS-CO6	05/10/2015	28/08/2016	328	31538
	SGS-CO7	13/04/2016	30/03/2017	352	33817
	SGS-CO8	15/03/2016	31/01/2017	323	31047
	SGS-CO9	05/01/2017	06/02/2017	33	3169
	SGS-CO10	10/07/2015	31/08/2017	784	72263
	SGS-CO11	11/04/2016	03/04/2017	358	34396
	SGS-CO12	01/06/2016	30/09/2016	122	11712
<b>CENTROS DE TRABAJO</b>	SGS-CT1	04/12/2015	27/02/2017	451	43435
	SGS-CT2	14/04/2015	30/06/2017	808	61632
	SGS-CT3	02/02/2016	01/02/2017	366	35040
	SGS-CT4	01/08/2015	23/09/2016	419	40250
	SGS-CT5	16/04/2016	30/06/2017	441	42336
	SGS-CT6	25/05/2016	03/07/2017	405	38906
	SGS-CT7	01/04/2015	30/04/2017	761	73056
	SGS-CT8	19/09/2015	28/02/2017	529	50785
	SGS-CT9	20/06/2015	25/08/2016	433	41568
	SGS-CT10	16/03/2016	06/09/2016	175	16705
	SGS-CT11	17/11/2016	18/03/2017	123	11855
	SGS-CT12	13/01/2015	30/06/2017	900	86400

Tabla 1. Clasificación de los 33 sistemas geotérmicos someros (SGS) involucrados en el estudio. Se muestra el siglado en función de su tipología (HT: hoteles, HP: hospitales, CO: centros de ocio y CT: centros de trabajo), la fecha de inicio y final del periodo de registro (nº días) y el número de datos 15-minutales que han sido tratados en cada instalación para cada variable.

*outliers* o medidas erróneas consideradas fuera de rango y se han filtrado y eliminado los datos de medida de la temperatura de captación y vertido en los momentos en los que no existe circulación de caudal de agua, puesto que la temperatura presentada corresponde a los valores ambientales de la sala de máquinas o de la conducción y por lo tanto no representa el régimen real de funcionamiento.

Los 33 sistemas geotérmicos someros (SGS) depurados (**Tabla 1**) han sido clasificados y siglados atendiendo a su tipología correspondiente a hoteles (HT), hospitales (HP), centros de ocio (CO) y centros de trabajo (CT). Se puede observar que el periodo de datos registrados de cada instalación varía desde 33 días el menor hasta 1035 días el mayor, variando por tanto en el número de registros 15-minutales a analizar en cada caso, habiéndose tratado un cómputo total de 1.560.846 datos de cada una de las variables estudiadas (temperatura, caudal y potencia).

### 5.2.2. Cálculo de la potencia térmica diaria disipada

Las series de las temperaturas de captación y vertido [°C] depuradas y sincronizadas por medio de una guía temporal con cadencia de 15 minutos, son filtradas con el objetivo de obtener un valor promedio diario de ambas. Estos valores resultan necesarios para los cálculos a realizar y la serie derivada de la temperatura de vertido es parte del análisis de este estudio. Se dispone además de valores de caudal medidos en L/s que son pasados a m<sup>3</sup>/15 min, para obtener mediante filtros un valor de caudal diario [m<sup>3</sup>/día] que representará el régimen de la explotación y será analizado junto con la serie de la temperatura de vertido.

A partir de los valores calculados correspondientes a caudal y temperatura de captación y vertido, se ha realizado la integración de la energía disipada en un día por cada instalación por medio del cálculo de la potencia térmica disipada [J/s] mediante la fórmula siguiente:

$$H = Qc_w\rho_w(T_V - T_C)$$

Donde  $H$  representa el potencial calorífico transferido [J/s],  $Q$  corresponde al caudal de vertido medido en [m<sup>3</sup>/s] de cada instalación,  $c_w$  es la capacidad calorífica del agua [kJ/kg·K],  $\rho_w$  corresponde al valor de densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>] y la diferencia de temperatura [K] entre el valor de temperatura de vertido  $T_V$  y la de captación  $T_C$ .

Con los valores calculados anteriormente y el uso de filtros temporales en la hoja de cálculo, se ha obtenido un valor de potencia térmica disipada diaria [J/día], que junto con

las series del caudal acumulado diario [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] y la temperatura de vertido promedio diaria [ $^{\circ}\text{C}$ ] serán las herramientas para el desarrollo del trabajo.

### **5.3. Análisis estadístico del régimen de explotación de sistemas geotérmicos someros**

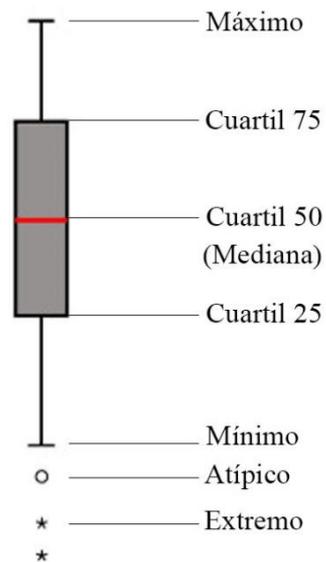
Se han seleccionado 15 de los 33 sistemas geotérmicos someros disponibles, los cuales van a ser objeto de análisis a lo largo del presente trabajo. A partir de las series temporales creadas anteriormente correspondientes a la temperatura de vertido promedio diaria [ $^{\circ}\text{C}$ ], caudal acumulado diario [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] y potencia térmica disipada diaria [ $\text{J}/\text{día}$ ] se ha realizado el estudio de los regímenes de explotación de las instalaciones siguiendo la metodología expuesta.

A partir de las series establecidas se ha realizado un análisis de forma global mediante la representación gráfica en un diagrama de cajas o *boxplot* con ayuda del software de análisis estadístico SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) (Nie et al., 1975).

Los diagramas de caja y bigotes (*boxplots o box and whiskers*) se consideran una representación visual muy práctica para la descripción y síntesis de varios conjuntos de datos (Alperin, 2013) donde se deducen los aspectos más importantes de una distribución de frecuencias, tales como dispersión, simetría, rangos de los valores límite (mínimo y máximo) y estadísticos descriptivos de posición como los diferentes cuartiles (25, 50 o mediana y 75), además de los valores atípicos y extremos.

En el esquema adjunto (**Fig. 3**) se muestra una síntesis de un diagrama de caja, donde se representan los diferentes componentes del gráfico. Cada caja corresponde a un conjunto determinado de datos (en este caso a cada sistema geotérmico somero), donde sus extremos inferior y superior corresponden al cuartil 25 y 75 respectivamente (indicando la posición del 25 y el 75 % de los datos). En el interior de la caja aparece una línea roja que marca la posición de la mediana o cuartil 50, medida de tendencia central que indica que la mitad de los valores son inferiores y la otra mitad se encuentran por encima de esta. A partir de los bordes superior e inferior salen dos líneas o bigotes que se prolongan hasta los valores límite máximo y mínimo pero que no son considerados atípicos. Los valores atípicos aparecen representados por un

círculo (alejados  $>1,5$  longitudes de caja del cuartil 75) y los extremos por una estrella (alejados  $>3$  longitudes de caja del cuartil 75), mediante los cuales se obtiene una idea global de lo limpia o no que se encuentra la serie analizada.



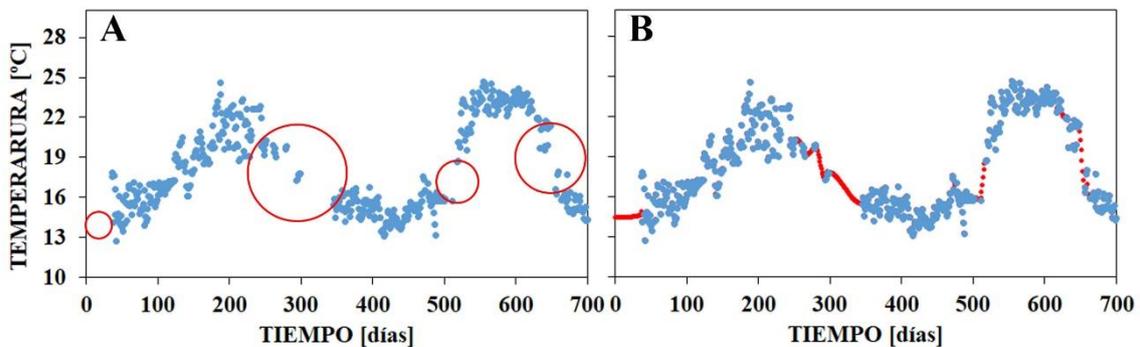
**Fig. 3.** Esquema de un diagrama de caja (*boxplot*) donde se muestra la explicación de sus componentes. La línea roja indica el cuartil 50 y los extremos los cuartiles 25 y 75. Las prolongaciones marcan los valores máximo y mínimo y los círculos y estrellas los datos atípicos y extremos respectivamente.

#### 5.4. Análisis espectral de series temporales y regresión sinusoidal

Se han analizado las series de tiempo de las 15 instalaciones objeto de estudio correspondientes en primer lugar a los datos horarios de temperatura de vertido [°C], caudal [m<sup>3</sup>/hora] y potencia térmica disipada [J/hora] con la finalidad de obtener mediante el análisis espectral la periodicidad de menor rango como es el caso de los ciclos horarios. A continuación, se han analizado las series de tiempo correspondientes a los valores de temperatura de vertido promedio diaria [°C], caudal acumulado diario [m<sup>3</sup>/día] y potencia disipada diaria [J/día] para la obtención de los ciclos mayores de orden mensual.

La serie de la temperatura de vertido diaria ha requerido de nuevo su tratamiento puesto que en el proceso de filtrado anterior se han eliminado los datos de temperatura erróneos o derivados de un caudal de explotación nulo, es decir de los momentos en los que la instalación no se encontraba en funcionamiento. Puesto que para los análisis que se desean realizar a continuación es necesario trabajar con series continuas se va a proceder previamente a su preparación, cuestión que se trata en el siguiente subapartado.

Las series de la temperatura de vertido han sido filtradas de nuevo con la finalidad de conseguir unas series continuas donde no existan intervalos temporales sin un valor de medida. Para ello se ha realizado la interpolación de las series mediante el método de interpolación cuadrática (**Fig. 4**) con la ayuda del software matemático MATLAB (Fernández,2009).



**Fig. 4.** A) Ejemplo de la representación gráfica de una serie de la temperatura de vertido promedio diaria [°C] discontinua donde aparecen periodos que no disponen de dato de medida (círculos rojos), siendo necesario completarla para los análisis posteriores. B) Ejemplo del resultado obtenido mediante la interpolación cuadrática (puntos rojos) de los datos de temperatura representados en la gráfica de forma que la serie queda completada y preparada para ser sometida a los análisis posteriores.

La interpolación cuadrática utiliza tres puntos,  $(x_{n-1}, y_{n-1})$ ,  $(x_n, y_n)$  y  $(x_{n+1}, y_{n+1})$  (Ascheri y Pizarro, 2001) para el proceso de interpolación, considerándose la aproximación más adecuada para este conjunto de datos dentro de los establecidos para medidas unidimensionales. El comando utilizado para la obtención de las series es *interp1* cuyo formato es el siguiente:

$$yy = \text{interp1}(x, y, xx, \text{'método'})$$

Donde  $x$  es la abscisa de los puntos a interpolar, en este caso la serie de tiempo [días],  $y$  es la ordenada de los puntos a interpolar siendo la serie de la temperatura de vertido promedio diaria [°C],  $xx$  corresponde a la serie del eje de abscisas interpolada mediante

el método establecido, siendo en este caso la interpolación cuadrática y de la misma forma yy corresponde a la serie interpolada de la temperatura de vertido promedio diaria, preparada para ser estudiada por medio del análisis espectral.

Las series de la potencia térmica disipada diaria [J/día] y del caudal acumulado diario [m<sup>3</sup>/día] en cambio sí que son continuas, puesto que en los momentos en los que la instalación se encuentra apagada el dato es 0, por lo que no es necesario realizar su interpolación. Además, se ha procedido a la eliminación de la tendencia presente en todas las series de datos de las tres variables analizadas de forma previa a la realización de los análisis.

Una serie de tiempo  $[x_t]$  es una serie de variables en este caso caudal, temperatura y potencia, donde existe un valor de cada una de ellas para cada tiempo  $t$ . Se considera el análisis espectral una herramienta eficaz para el ajuste estacional de series temporales, entendiendo por estacionalidad cuando una serie  $x_t$  tiene componentes periódicas que coinciden con un tiempo de referencia. El método del análisis espectral mediante el periodograma simple tiene su base en la Transformada Discreta de Fourier (FTD) y se le denomina también espectro (Brigham, 1988; Rugerio, 2006), el cual se ha llevado a cabo en este estudio mediante el software PAST 3.15 (Press *et al.*, 1992).

El concepto de periodograma simple o espectro, considerando una serie de datos  $x_t$  con  $t = 1, \dots, N$ ; y frecuencia  $f$ , se aproxima a un modelo simple establecido por:

$$x_t = a \cos(2\pi ft) + b \sin(2\pi ft)$$

que mediante el método de los mínimos cuadrados se obtiene:

$$a = 2 \frac{[\sum_0^N x_t \cos(2\pi ft)]}{N} \quad b = 2 \frac{[\sum_0^N x_t \sin(2\pi ft)]}{N}$$

y el periodograma simple (Chatfield, 2003) queda definido a partir de:

$$Sp(f) = \frac{N}{4\pi} \frac{R_p^2}{2}$$

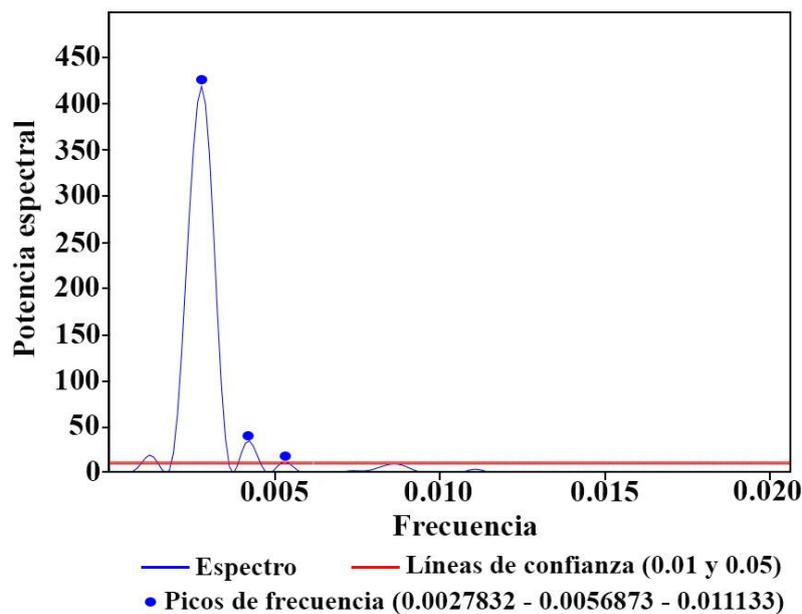
donde  $R_p = \sqrt{a^2 + b^2}$ , motivo por el cual el periodograma proporciona información acerca de la importancia que tiene la frecuencia  $\omega = 2\pi f$  en la descripción de  $x_t$ . De esta forma un pico en la gráfica del espectro indica una contribución importante de esa frecuencia en la serie estudiada  $x_t$ .

La expresión del periodograma en términos de la norma cuadrada de la Transformada Discreta de Fourier de  $x_t$  es la siguiente:

$$Sp(f) = \frac{N}{4\pi} \frac{||\sum_{t=1}^N x_t \exp^{i\omega t}||^2}{2}$$

Este método permite la transformación de señales en el dominio de tiempo a señales en el dominio de la frecuencia.

La representación gráfica del periodograma simple (**Fig. 5**) consta de un eje de abscisas constituido por la frecuencia ( $\omega$ ) cuyas unidades de medida vendrán dadas por el valor de tiempo en el que se encuentre la serie analizada  $x_t$ , correspondiendo a un periodo ( $p$ ) de  $1/\omega$ . El eje de ordenadas indica un valor de potencia espectral que se encuentra en unidades proporcionales al cuadrado de las amplitudes de los sinusoides que componen la serie de datos que se esté estudiando. Las líneas rojas muestran los niveles de confianza establecido en 0,01 y 0,05 (Press *et al.*, 1992).



**Fig. 5.** Ejemplo de un periodograma simple o espectro derivado del análisis espectral de una serie de temperatura de vertido promedio diaria, donde se observan con puntos azules los picos de frecuencia más significativos (0.0027832 - 0.0056873 - 0.011133) mediante los cuales se han obtenido los periodos correspondientes a 365, 180 y 120 días respectivamente.

Además, se ha utilizado el método de la regresión sinusoidal (**Fig. 6**) con ayuda del software PAST 3.15. (Press *et al.*, 1992) para la determinación de las periodicidades de cada una de las series de tiempo en combinación con el análisis espectral, con la finalidad

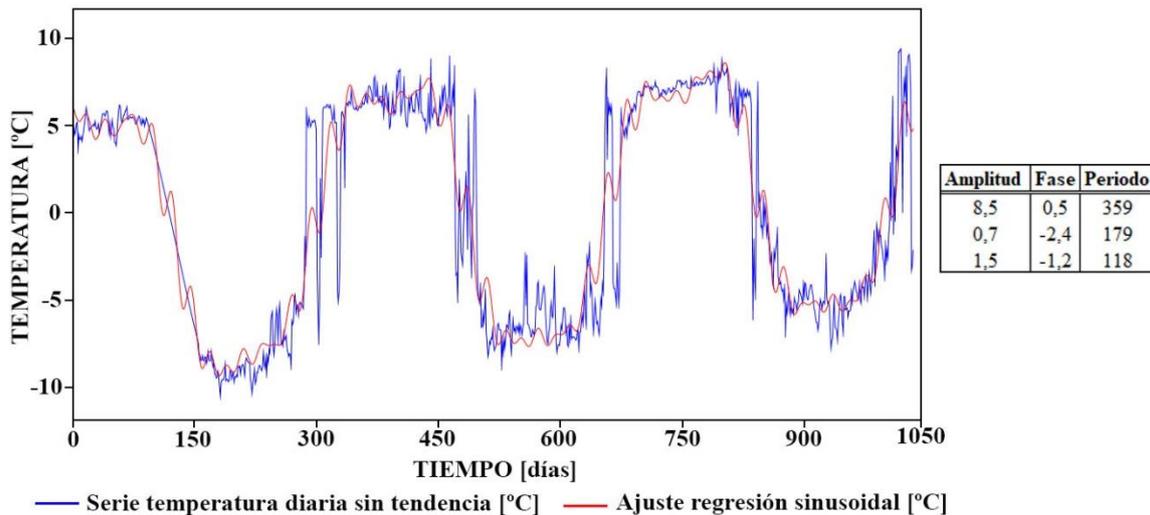


Fig. 6. Ejemplo de un análisis de regresión sinusoidal de una serie de la temperatura de vertido promedio diaria sin tendencia, donde se observa en rojo el ajuste realizado mediante dicho método. En la tabla adjunta se pueden observar los valores de amplitud y fase correspondientes a los ciclos de periodicidad presentes en la serie analizada los cuales se pueden correlacionar con ciclos anuales, semestrales y cuatrimestrales respectivamente.

de obtener mediante este método los valores de amplitud y fase necesarios para la deducción de la función de ajuste. El algoritmo en el que está basado es el criterio de los mínimos cuadrados y en la descomposición de valores singulares. Mediante la opción “FIT periods” se optimizará el periodo de cada senoide después de restar todos los sinusoides ajustados previamente, obteniendo el valor de cada uno de los periodos significativos dentro de la serie analizada. Cada senoide viene dado por la siguiente ecuación:

$$Z = a \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x - x_0}{T} - P\right)$$

donde  $a$  es la amplitud,  $T$  es el periodo,  $P$  es la fase de cada uno de los sinusoides que intervengan en la serie de tiempo y  $x_0$  es el valor más pequeño de  $x$  (serie analizada).

### 5.5. Ajuste de las funciones para obtener las curvas tipo

Los datos derivados del análisis espectral de las series de tiempo de cadencia horaria no han sido sometidos al ajuste mediante la curva tipo debido a que se trata de series muy largas y con mucho ruido donde además, el valor de amplitud derivado de cada uno de los ciclos presentes en las instalaciones resulta difícil de representar gráficamente puesto

que se trata de rangos inferiores a 1 °C en el caso de la temperatura y a 1 m<sup>3</sup>/hora y 1E7 J/hora en cuanto a caudal y potencia respectivamente.

A partir de los datos diarios obtenidos tanto en el análisis espectral como en la regresión sinusoidal se ha procedido a la comparación de estos y validación. Los datos de periodo en días proporcionados por ambos métodos son cotejados y posteriormente aproximados a ciclos con periodos determinados de referencia, que sirvan para la realización del ajuste y estudio de los regímenes de explotación de los distintos sistemas. Los ciclos que se establecen como periodos de referencia son el anual (365 días), semestral (180 días), cuatrimestral (120 días) y trimestral (90 días) los cuales coinciden con distintos eventos como es la estacionalidad. Los valores de amplitud y fase son proporcionados por el método de la regresión sinusoidal, donde los datos de fase son utilizados de forma directa en la realización de la función de ajuste y los datos correspondientes a amplitud son cotejados con los regímenes de funcionamiento en cada uno de los casos, para posteriormente ser insertados en la función de ajuste final.

Mediante un cálculo de regresión se han creado las curvas de ajuste al régimen de explotación de cada uno de los sistemas geotérmicos someros para cada una de las variables estudiadas (temperatura, caudal y potencia). Este ajuste ( $A$ ) se ha realizado mediante una suma de funciones coseno donde la estructura de cada una de ellas es la siguiente:

$$A = a \cdot \cos\left(2\pi \cdot \left(\frac{0:L-1}{T}\right) \pm P\right) + \dots$$

donde  $a$  es la amplitud del ciclo que se esté insertando,  $L$  es la longitud de la muestra o número de datos que contenga la serie,  $T$  es el periodo ( $1/\text{frecuencia}, f$ ) y  $P$  es la fase obtenida en la regresión sinusoidal, insertada en la función con el signo contrario al proporcionado por el análisis.

El ajuste final calculado (**Fig. 7**) el cual ha sido realizado para cada una de las tres variables involucradas en las 15 instalaciones se ha llevado a cabo con ayuda del software MATLAB (Fernández, 2009). Donde en cada caso se han implementado el número de ciclos obtenidos en forma de un sumatorio de funciones que ha resultado en una serie de datos ( $A$ ) correspondiente a la curva de ajuste al régimen de explotación en cada uno de los sistemas estudiados por medio de las tres variables más representativas como son la temperatura de vertido promedio, el caudal y la potencia térmica disipada.

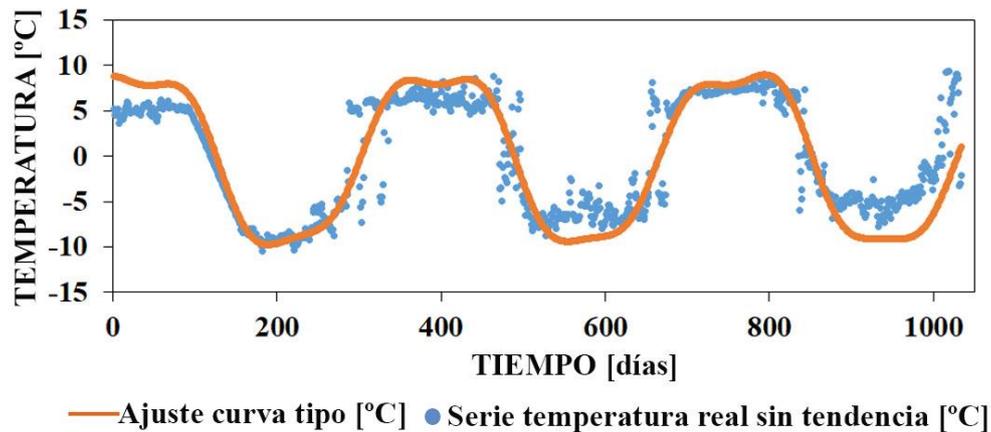


Fig. 7. Ejemplo del ajuste de una serie de la temperatura promedio diaria sin tendencia, realizado mediante la creación de una curva tipo obtenida mediante la suma de las funciones coseno compuestas por los ciclos de periodicidad junto con los valores de amplitud y fase involucrados en el régimen de explotación de la presente serie.

La creación de estas curvas ha permitido sintetizar los regímenes de funcionamiento de las explotaciones de geotermia y obtener una visión de los rangos de amplitud y los periodos de trabajo entre los que se distribuyen los distintos sistemas en función de su tipología y de forma conjunta.

## 6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

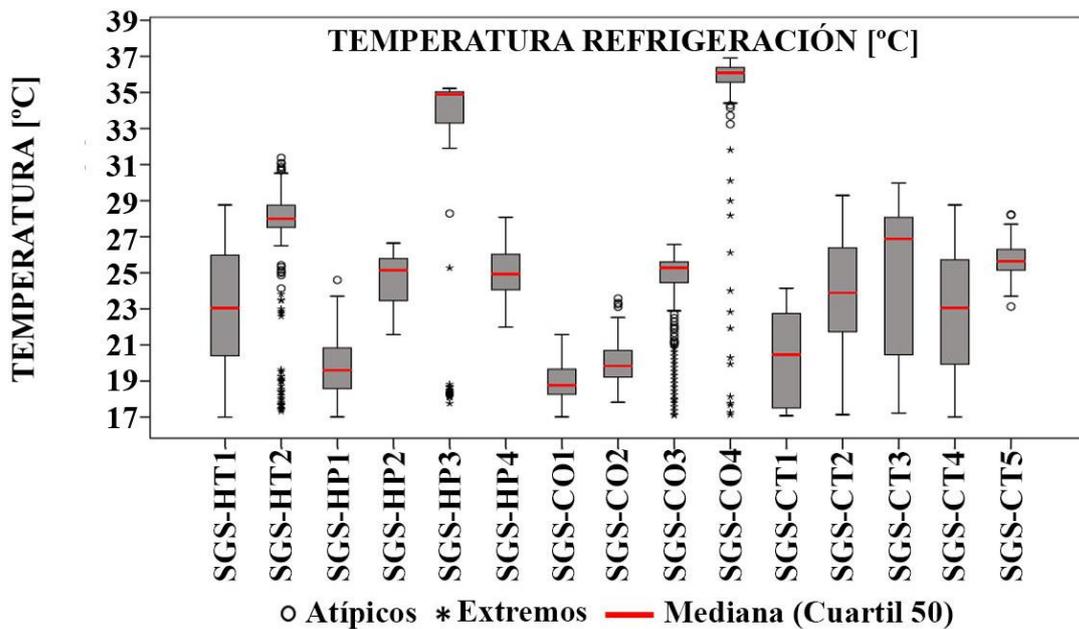
### 6.1. Resultados del análisis estadístico del régimen de explotación de los sistemas geotérmicos someros

Se presentan a continuación los resultados obtenidos a partir del análisis de 15 instalaciones de geotermia somera donde en primer lugar se ha realizado un estudio comparativo de los regímenes de explotación de los sistemas atendiendo a los rangos de funcionamiento de temperatura de vertido promedio diaria [°C], caudal acumulado [m<sup>3</sup>/día] y potencia térmica disipada [J/día] por medio de la representación gráfica en diagramas de cajas.

Las series derivadas de la temperatura de vertido promedio diaria [°C] han sido diferenciadas en dos grupos en función de representar un vertido mayor o menor a 17 °C, correspondiendo por tanto al uso del sistema de refrigeración (**Fig. 8**) o calefacción (**Fig. 9**) respectivamente.

Las series de la temperatura de vertido promedio diaria [°C] por encima de 17 °C (**Fig. 8**) de los 15 sistemas geotérmicos someros han sido representadas gráficamente mediante un diagrama de caja, perteneciendo al régimen de explotación correspondiente al sistema de refrigeración.

La totalidad de las instalaciones analizadas utilizan el sistema de refrigeración en los periodos estivales. Los valores de las medianas de cada uno de los sistemas, parámetro que representa la posición central del conjunto de datos estudiados, aparecen distribuidas de forma que permite su agrupación en distintos rangos de temperatura. En el rango de valores más bajo entre 18 y 22 °C aparecen 4 instalaciones (SGS-HP1/-CO1/-CO2/-CT1), entre 22 y 26 °C se encuentran 7 de los sistemas (SGS-HT1/-HTP2/-HP4/-CO3/-CT2/-CT4/-CT5) constituyendo aproximadamente la mitad de los analizados, y en el rango de temperaturas superiores a 26 °C se observa la presencia de 4 instalaciones (SGS-HT2/-HP3/-CO4/-CT3) donde 2 de ellas (SGS-HP3 y SGS-CO4) tienen un valor de mediana superior a 33 °C, representando un vertido con una temperatura elevada.



**Fig. 8.** Diagrama de caja de las series de temperatura de vertido promedio diaria [°C] superiores a 17 °C de los 15 sistemas geotérmicos someros, correspondientes al régimen de funcionamiento del sistema de refrigeración. La línea roja marca el cuartil 50 o mediana de cada grupo de datos y los límites superior e inferior de la caja indican el cuartil 75 y 25 respectivamente. Las prolongaciones de las cajas marcan los valores límite que no llegan a ser atípicos, representados en forma de círculos y los extremos con estrellas.

La dispersión de los datos registrados, observada en función de la forma de cada caja, se considera homogénea en la mayoría de los casos puesto que la mediana se encuentra

situada en una posición central, excepto para 3 de los sistemas (SGS-HP2/-HP3/-CT3) cuya mediana se encuentra situada cercana al límite superior de la caja o cuartil 75, indicando una dispersión alta de los datos situados entre el cuartil 25 y el cuartil 50. Además, se observa que las series son bastante limpias en la mayoría de los casos al no existir prácticamente valores atípicos ni extremos, a excepción de 4 sistemas (SGS-HT2/HP3/-CO3/-CO4) que sí disponen de estos valores.

Las series de la temperatura de vertido promedio diaria [°C] inferiores a 17 °C (temperatura de fondo del acuífero) y derivadas de la explotación mediante calefacción, han sido representadas gráficamente (**Fig. 9**) por medio de un diagrama de caja observando que de los 15 sistemas analizados existen 3 (SGS-HP2/-HP4/-CT5) que no disponen de datos de vertido a esta temperatura, implicando que la climatización empleada es únicamente para refrigeración.

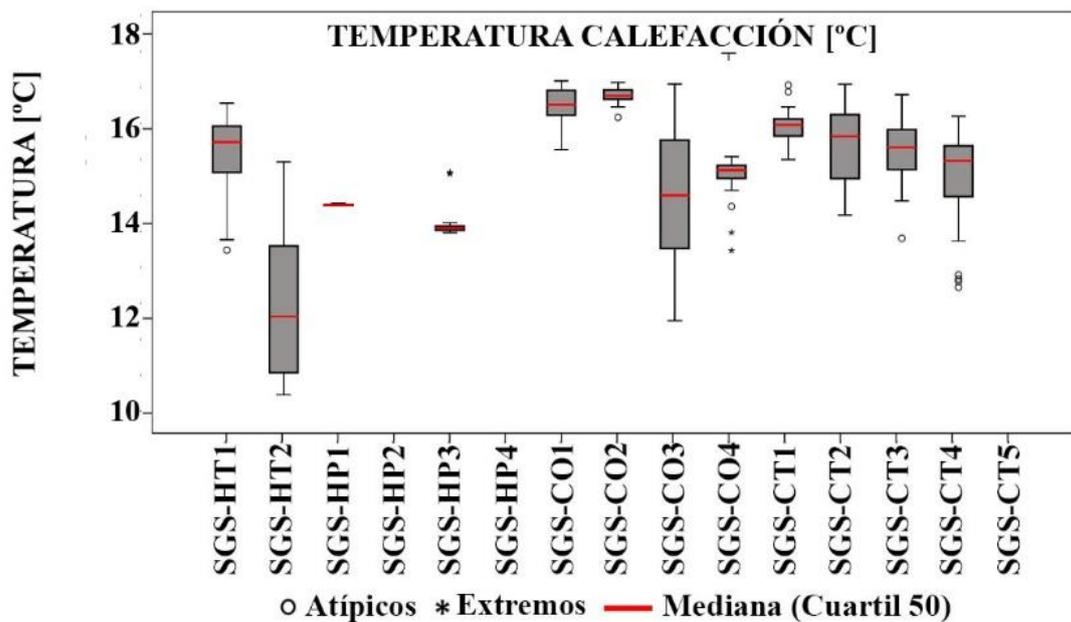


Fig. 9. Diagrama de caja (*boxplot*) de las series de temperatura de vertido promedio diaria [°C] inferiores a 17 °C de los 15 sistemas geotérmicos someros, correspondientes al régimen de funcionamiento del sistema de calefacción, donde se observa que 3 sistemas (HP2, HP4 y CT5) no lo utilizan. La línea roja marca el cuartil 50 o mediana de cada grupo de datos y los límites superior e inferior de la caja indican el cuartil 75 y 25 respectivamente. Las prolongaciones de las cajas marcan los valores límite que no llegan a ser atípicos, representados en forma de círculos y los extremos representados mediante estrellas.

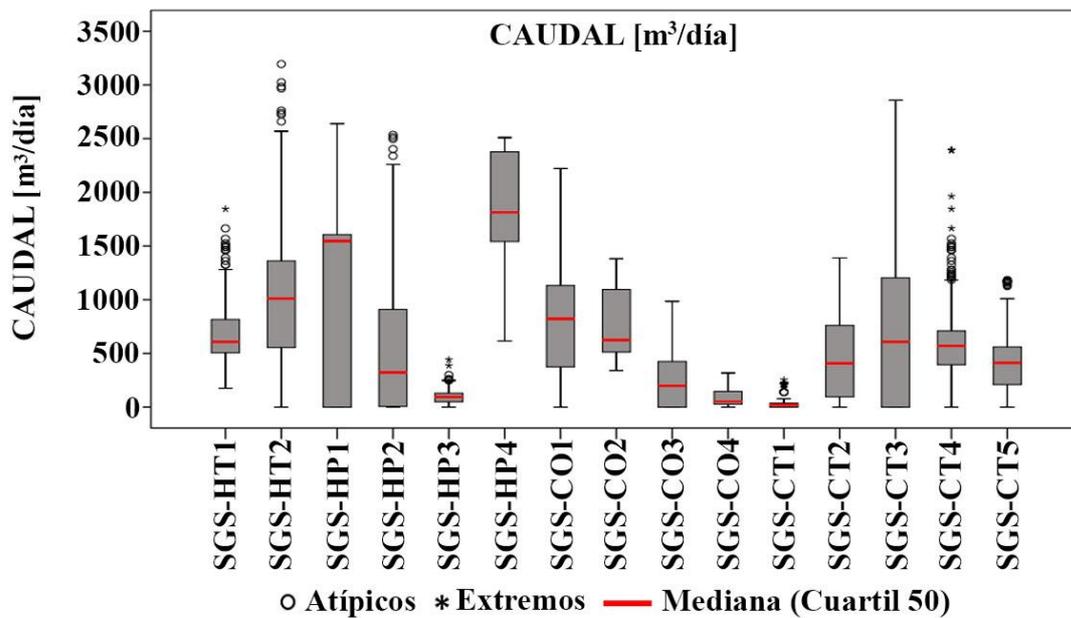
Los valores de cuartil 50 o mediana, representando centralidad, han sido agrupados en distintos rangos de temperatura. El rango de valores más alto situado entre 15 y 17 °C está formado por 8 sistemas (SGS-HT1/-CO1/-CO2/-CO4/-CT1/-CT2/-CT3/-CT4) los cuales representan más del 75% atendiendo a los datos disponibles, entre 13 y 15 °C aparecen 3

instalaciones (SGS-HP1/-HP3/-CO3) y en el rango de temperaturas inferiores a 13 °C únicamente aparece 1 instalación (SGS-HT2).

La forma de las cajas indica una dispersión bastante homogénea en la mayoría de los casos, a excepción de 3 sistemas (SGS-HT1/-CT2/-CT4) donde se observa que el tamaño de la caja es considerable indicando una dispersión mayor por debajo de la mediana.

En este caso se observa que todas las series analizadas se encuentran limpias donde no existen prácticamente valores atípicos ni extremos, a excepción de algunos datos puntuales.

Las series correspondientes al caudal acumulado diario [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] han sido representadas gráficamente (**Fig. 10**) por medio de un diagrama de caja donde se observa la distribución de los rangos de caudal de explotación de los 15 sistemas geotérmicos someros.



**Fig. 10.** Diagrama de caja de las series de caudal acumulado diario [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] de los 15 sistemas geotérmicos someros, correspondientes al régimen de explotación. La línea roja marca el cuartil 50 o mediana de cada grupo de datos y los límites superior e inferior de la caja indican el cuartil 75 y 25 respectivamente. Las prolongaciones de las cajas marcan los valores límite que no llegan a ser atípicos, los cuales aparecen representados en forma de círculos y los extremos mediante estrellas.

Se observa que la posición central de los datos indicada por la mediana se distribuye de forma que el rango más pequeño de valores, entre 0 y 500  $\text{m}^3/\text{día}$ , está formado por 7 instalaciones (SGS-HP2/-HP3/-CO3/-CO4/-CT1/-CT2/-CT5) correspondiendo a casi la mitad de los sistemas. En el rango entre 500 y 1000  $\text{m}^3/\text{día}$  aparecen 6 instalaciones (SGS-

HT1/-HT2/-CO1/-CO2/-CT3/-CT4) y por último con caudales superiores a 1000 m<sup>3</sup>/día existen 2 sistemas (SGS-HP1 y SGS-HP4) cuyos regímenes de caudal explotación se consideran elevados.

La dispersión de los datos analizados es bastante homogénea en 9 de los sistemas (SGS-HT2/-HP3/-CO1/-CO3/-CT1/-CT2/-CT3/-CT4/-CT5) representando más de la mitad de los datos analizados, situándose el valor de la mediana en una posición central de la caja aproximadamente.

Entre los sistemas que presentan una baja simetría de los datos se encuentra en primer lugar el sistema SGS-HP1 cuyo valor de mediana está situado cercano al cuartil 75, indicando una amplia dispersión en el rango ocupado entre el cuartil 25 y el cuartil 50. El resto de sistemas (SGS-HT1/-HP2/-HP4/-CO2/-CO4) presentan una dispersión algo menor y situada en la parte superior de la caja en el rango entre el cuartil 50 y el cuartil 75. Se observa además, que las series se encuentran limpias a excepción de algunos valores atípicos y extremos distribuidos puntualmente en 7 de los sistemas (SGS-HT1/-HT2/-HP2/-HP3/-CT1/-CT4/-CT5) estudiados.

Por último, se han representado mediante un diagrama de caja (**Fig. 11**) las series de la potencia térmica disipada diaria [J/día] de los 15 sistemas geotérmicos someros, donde se muestran los regímenes de explotación correspondientes tanto al uso del sistema de refrigeración, con valores positivos, como al sistema de calefacción, representado por los valores negativos. En consecuencia con los resultados obtenidos en la serie de la temperatura de calefacción, se observa que existen 3 sistemas (SGS-HP2/-HP4/-CT5) que no disponen de datos con valores por debajo de la línea de cero, por lo que se deduce que únicamente hacen uso del sistema de refrigeración.

Los 3 sistemas citados (SGS-HP2/-HP4/-CT5) que no hacen uso del sistema de calefacción junto con el sistema SGS-HT2, el cual si dispone de régimen con datos negativos, presentan un valor de mediana superior a 5E9 J/día, incluso llegando a alcanzar un valor de 3,5E10 J/día para el sistema SGS-HP4. El resto de sistemas analizados (SGS-HT1/-HP1/-HP3/-CO1/-CO2/-CO3/-CO4/-CT1/-CT2/-CT3/-CT4) presentan un valor de cuartil 50 que se encuentra sobre la línea de 0 o muy cerca, indicando un régimen de explotación destinado tanto a refrigeración como a calefacción.

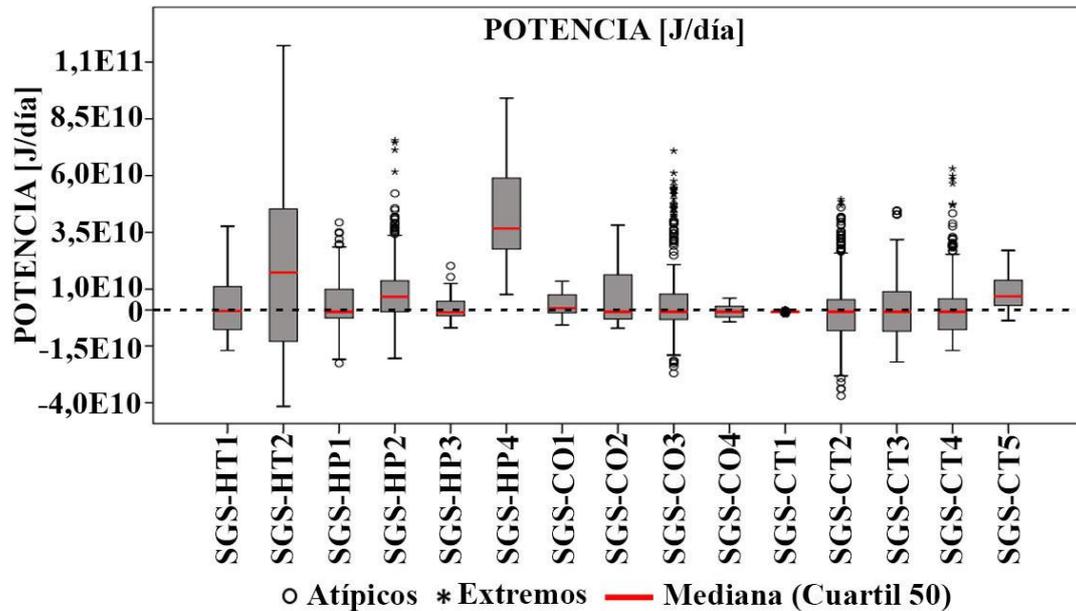


Fig. 11. Diagrama de caja de las series de potencia térmica disipada diaria [J/día] de los 15 sistemas geotérmicos someros correspondientes al régimen de explotación del sistema de refrigeración (valores positivos) y al sistema de calefacción (valores negativos). La línea roja marca el cuartil 50 o mediana de cada grupo de datos y los límites superior e inferior de la caja indican el cuartil 75 y 25 respectivamente. Las prolongaciones de las cajas marcan los valores límite que no llegan a ser atípicos, los cuales aparecen representados en forma de círculos y los extremos mediante estrellas.

El rango del régimen de funcionamiento, se encuentra en 13 de los sistemas (SGS-HT1/-HP1/-HP2/-HP3/-CO1/-CO2/-CO3/-CO4/-CT1/-CT2/-CT3/-CT4/-CT5) entre  $-3,5E10$  y  $3,5E10$  J/día, constituyendo casi la totalidad de los datos estudiados. Las dos instalaciones restantes, SGS-HT2 y SGS-HP4, tienen rangos de explotación más amplios situados entre  $-4E10$  y  $1,2E11$  para el primer caso y entre  $1E10$  y  $9E10$  J/día en el segundo sistema.

Se observa que existe una alta simetría en más de la mitad de los sistemas analizados (SGS-HT1/-HT2/-HP2/-CO4/-CT1/-CT2/-CT3/-CT4), situándose el valor de la mediana en la zona central de la caja. En el resto de instalaciones (SGS-HP1/-HP3/-HP4/-CO1/-CO2/-CO3/-CT5) existe una falta de simetría, donde se observa que el valor de la mediana se encuentra situado en la zona inferior de la caja, cercano al cuartil 25, indicando un alto grado de dispersión de los valores comprendidos entre el cuartil 50 y el cuartil 75. Además, se observa que más de la mitad de las instalaciones se encuentran limpias, a diferencia de 7 sistemas (SGS-HP1/-HP2/-HP3/-CO3/-CT1/-CT2/-CT3/-CT4) en los que sí aparecen valores atípicos y extremos.

## 6.2. Resultados del análisis espectral y regresión sinusoidal de las series temporales

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis espectral de las series correspondientes a las 15 instalaciones de geotermia somera que han sido objeto de estudio.

En primer lugar, se han analizado las tres series de las que consta cada una de las instalaciones con cadencia horaria, temperatura de vertido [°C], caudal acumulado [m<sup>3</sup>/hora] y potencia térmica disipada [J/día], con el objetivo de obtener mediante el análisis espectral la distribución de los ciclos menores u horarios presentes en cada una de los sistemas geotérmicos. A partir de la representación de cada una de las series horarias en un periodograma simple se han calculado los ciclos menores u horarios (**Tabla 2**) presentes en el régimen de explotación en cada uno de los sistemas identificados para cada una de las tres variables estudiadas.

Tipología	Sistema geotérmico somero	Análisis espectral T°, Q y P
		Periodo [horas]
<b>HOTELES</b>	SGS-HT1	24, 12, 8
	SGS-HT2	24, 12, 8
<b>HOSPITALES</b>	SGS-HP1	24, 12, 8, 6
	SGS-HP2	24
	SGS-HP3	24, 12, 8, 6
	SGS-HP4	24, 12, 6
<b>CENTROS DE OCIO</b>	SGS-CO1	24, 12, 8, 6
	SGS-CO2	24, 12, 8, 6
	SGS-CO3	24, 12, 8, 6
	SGS-CO4	24, 12, 8, 6
<b>CENTROS DE TRABAJO</b>	SGS-CT1	24, 12, 8
	SGS-CT2	24, 12, 8, 6
	SGS-CT3	24, 12, 8, 6
	SGS-CT4	24, 12
	SGS-CT5	24, 12, 8, 6

**Tabla 2.** Síntesis de los resultados obtenidos por medio del análisis espectral mediante la representación en un periodograma simple de las series de cadencia horaria de la temperatura de vertido [°C], caudal [m<sup>3</sup>/hora] y potencia térmica disipada [J/hora] de los 15 sistemas geotérmicos someros involucrados en el estudio, de dónde se han obtenido las frecuencias correspondientes a los ciclos horarios más representativos del régimen de explotación de cada una de las instalaciones analizadas.

Se observa la presencia del ciclo de 24 horas en la totalidad de los sistemas analizados que ha sido identificado en las tres variables analizadas, así como el de 12 horas que aparece en todas las instalaciones menos en una (SGS-HP2) en la que únicamente se diferencia el ciclo diario. El ciclo de 8 horas aparece representado en el resto de instalaciones menos en los casos de SGS-CT4, SGS-HP4 y en el citado anteriormente. Por último, se observa un ciclo de 6 horas que se encuentra presente en el 67% de los sistemas analizados (SGS-HP1/-HP3/-HP4/-CO1/-CO2/-CO3/-CO4/-CT2/-CT3/-CT5).

A continuación, se han estudiado las tres series correspondientes a los datos de cadencia diaria de temperatura de vertido promedio [ $^{\circ}\text{C}$ ], caudal acumulado [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] y potencia térmica disipada [ $\text{J}/\text{día}$ ], las cuales han sido sometidas al citado análisis mediante la representación gráfica en un periodograma simple o espectro. Este método ha permitido obtener para cada una de las series unos valores de frecuencia, correspondientes a los principales picos presentes en cada uno de los espectros, mediante los cuales se ha calculado el periodo en días (**Tabla 3**) de la duración de cada uno de los ciclos pertenecientes a cada sistema analizado.

Se puede observar que los ciclos establecidos por el análisis espectral son utilizados de forma orientativa para la obtención del valor de periodo destinado al ajuste de la curva tipo, hecho que ha sido complementado junto con el método de la regresión sinusoidal explicado a continuación.

Se presentan los resultados obtenidos por medio del método de la regresión sinusoidal de las series correspondientes a las 15 instalaciones de geotermia somera, las cuales se componen de 3 series cada una, derivadas de los datos de temperatura de vertido promedio diaria [ $^{\circ}\text{C}$ ], caudal acumulado [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] y potencia térmica disipada [ $\text{J}/\text{día}$ ]. Por medio de este método se han obtenido los valores del periodo en días y la amplitud, medida en las unidades que tenga la variable estudiada, correspondientes a los ciclos más significativos de las series analizadas (**Tabla 3**). Además, se han obtenido los valores de fase necesarios para la creación de la función de ajuste final los cuales se insertan en dicha función con signo contrario al que proporciona el análisis.

Por medio de los datos de periodo, amplitud y fase derivados del análisis de regresión sinusoidal y cotejados con los periodos derivados de las frecuencias obtenidas mediante el análisis espectral, se ha realizado un ajuste de dichos datos con la finalidad de crear

Tipología	Sistema geotérmico somero	Variable	Análisis espectral	Regresión Sinusoidal		Curva tipo	
			Periodo [días]	Periodo [días]	Amplitud	Periodo [días]	Amplitud
HOTELES	SGS-HT1	T [°C]	373 / 172	386 / 118	7,7 / 1,2		8 / 1,2
		Q [m <sup>3</sup> /día]	373 / 172	372 / 174	300 / 217	365 / 180	300 / 217
		P [J/día]	373 / 186	388 / 159	2E10 / 0,2E10		2E10 / 0,2E10
	SGS-HT2	T [°C]	365 / 218 / 121	365 / 164 / 123	9 / 1,2 / 2,3		9 / 1,2 / 2,3
		Q [m <sup>3</sup> /día]	506 / 172 / 134	531 / 173 / 134	500 / 1000 / 309	365 / 180 / 120	500 / 1000 / 300
		P [J/día]	345 / 168 / 119	351 / 172 / 122	5,6E10 / 1E10 / 0,7E10		5,6E10 / 1E10 / 0,7E10
HOSPITALES	SGS-HP1	T [°C]	372 / 207 / 130	365 / 180 / 87	4 / 1 / 0,6		4 / 1 / 0,6
		Q [m <sup>3</sup> /día]	294 / 164 / 92	353 / 165 / 79	387 / 415 / 211	365 / 180 / 90	387 / 415 / 211
		P [J/día]	347 / 199 / 101	346 / 190 / 69	13,4E9 / 3,8E9 / 1,9E9		13,4E9 / 3,8E9 / 1,9E9
	SGS-HP2	T [°C]	341 / 185 / 90	349 / 156 / 87	2,8 / 0,3 / 0,3		2,4 / 0,3 / 0,3
		Q [m <sup>3</sup> /día]	370 / 159 / 105	365 / 158 / 98	850 / 370 / 145	365 / 180 / 90	850 / 370 / 145
		P [J/día]	403 / 193 / 90	391 / 160 / 88	10E9 / 5,5E9 / 3E9		10E9 / 5,5E9 / 3E9
	SGS-HP3	T [°C]	354 / 181 / 90	357 / 179 / 92	10,1 / 3,4 / 1,6		12 / 3,4 / 1,6
		Q [m <sup>3</sup> /día]	338 / 181 / 91	343 / 179 / 89	188 / 85 / 38	365 / 180 / 90	400 / 85 / 38
		P [J/día]	354 / 190 / 93	347 / 142 / 70	254E9 / 2,4E9 / 1,2E9		0,8E10 / 2,4E9 / 1,2E9
	SGS-HP4	T [°C]	242	248	1,2		1,8
		Q [m <sup>3</sup> /día]	266	345	545	365	600
		P [J/día]	266	258	3E10.		3E10.
CENTROS DE OCIO	SGS-CO1	T [°C]	353 / 176 / 102	355 / 156 / 101	1,7 / 0,2 / 0,3		1,8 / 0,3 / 0,3
		Q [m <sup>3</sup> /día]	353 / 160 / 86	392 / 236 / 88	189 / 311 / 214	365 / 180 / 90	500 / 190 / 188
		P [J/día]	323 / 178 / 92	335 / 201 / 88	5,5E9 / 1,2E9 / 1E9		5,5E9 / 1,2E9 / 1E9
	SGS-CO2	T [°C]	364 / 108	365 / 197	4,3 / 1,4		5 / 1,4
		Q [m <sup>3</sup> /día]	364 / 97	373 / 98	397 / 258	365 / 180	400 / 258
		P [J/día]	364 / 138	356 / 201	12E9 / 5E9		12E9 / 5E9
	SGS-CO3	T [°C]	359 / 176 / 120	359 / 179 / 118	8,1 / 0,7 / 1,4		8,5 / 0,7 / 1,5
		Q [m <sup>3</sup> /día]	375 / 175 / 137	384 / 176 / 126	220 / 211 / 75	365 / 180 / 120	220 / 211 / 75
		P [J/día]	363 / 187 / 119	358 / 180 / 115	1,5E10 / 0,5E10 / 0,2E10		1,5E10 / 0,5E10 / 0,2E10
	SGS-CO4	T [°C]	315 / 165 / 116	349 / 167 / 118	13,6 / 2,2 / 3,8		13,6 / 2 / 2
		Q [m <sup>3</sup> /día]	314 / 182 / 111	311 / 178 / 109	83 / 56 / 16	365 / 180 / 120	83 / 56 / 16
		P [J/día]	314 / 150 / 111	303 / 180 / 68	3,2E9 / 0,3E9 / 0,3E9		3,2E9 / 0,3E9 / 0,3E9
CENTROS DE TRABAJO	SGS-CT1	T [°C]	300 / 118	304 / 109	3,9 / 0,7		3,5 / 1
		Q [m <sup>3</sup> /día]	200 / 118	326 / 118	60 / 30	365 / 120	60 / 30
		P [J/día]	363 / 119	398 / 92	3,9E8 / 0,7E8		4E8 / 0,7E8
	SGS-CT2	T [°C]	358 / 170 / 134	355 / 172 / 139	7,4 / 1,1 / 0,6		7,4 / 1,1 / 0,6
		Q [m <sup>3</sup> /día]	400 / 180 / 137	323 / 178 / 137	187 / 178 / 137	365 / 180 / 120	50 / 600 / 90
		P [J/día]	340 / 169 / 137	351 / 233 / 141	14E9 / 4E9 / 3,6E9		20E9 / 4E9 / 3E9
	SGS-CT3	T [°C]	364 / 145	313 / 98	6 / 0,7		6 / 0,7
		Q [m <sup>3</sup> /día]	291 / 132	283 / 126	731 / 532	365 / 120	731 / 532
		P [J/día]	364 / 145	427 / 113	1,4E10 / 0,6E10		1,4E10 / 0,6E10
	SGS-CT4	T [°C]	372 / 167	351 / 154	7. / 2		7. / 2
		Q [m <sup>3</sup> /día]	370 / 176	329 / 195	687 / 295	365 / 180	550 / 300
		P [J/día]	372 / 168	361 / 171	2,4E10 / 0,5E10		2,4E10 / 0,5E10
	SGS-CT5	T [°C]	319 / 109	316 / 155	4,5 / 1,5		4. / 1
		Q [m <sup>3</sup> /día]	316 / 90	316 / 90	169 / 205	365 / 90	350 / 200
		P [J/día]	319 / 90	326 / 90	6,3E9 / 3,8E9		6E9 / 3E9

Tabla 3. Síntesis de los resultados obtenidos por medio del análisis espectral y la regresión sinusoidal de las series de temperatura de vertido promedio [°C], caudal [m<sup>3</sup>/día] y potencia térmica disipada [J/día] de los 15 sistemas geotérmicos someros involucrados en el estudio. Se observan la periodicidad de los ciclos obtenidos por ambos métodos de análisis y el valor empleado en el ajuste de la curva de funcionamiento tipo, además de los valores relativos a la amplitud de los citados

una curva tipo de cada una de las series derivadas de las 15 instalaciones que sintetice sus regímenes de funcionamiento y permita establecer una visión global.

### **6.3. Resultados del ajuste para obtener la curva tipo**

La curva de ajuste realizada para cada una de las variables analizadas (**Anexo 1**) en las 15 instalaciones se ha calculado mediante la suma de funciones derivadas de los ciclos presentes en cada una de las series estudiadas (**Tabla 3**), correspondientes al régimen de explotación en cada caso.

Los datos de periodo proporcionados tanto por el análisis espectral con los periodogramas como mediante la regresión sinusoidal son similares y se aproximan a los ciclos con periodos definidos como ciclos anuales, semestrales, cuatrimestrales o trimestrales, tomados como referencia para la elaboración de las funciones que componen el ajuste final. Los valores de amplitud proporcionados por el método de la regresión sinusoidal son cotejados con los datos reales de funcionamiento de las explotaciones y el valor de fase obtenido es insertado de forma directa en la función de ajuste con el signo contrario al proporcionado por el análisis. Se ha calculado por tanto el ajuste de la curva tipo mediante la suma de las funciones derivadas de los ciclos involucrados en cada una de las tres series correspondientes a las 15 instalaciones analizadas, las cuales han sido representadas gráficamente (**Fig. 12**) para su comparación y estudio de forma global permitiendo establecer diferencias y similitudes en su régimen de funcionamiento atendiendo también a la clasificación realizada en función de su tipología (**Anexo 2**).

La representación gráfica (**Fig. 12A**) de las curvas tipo correspondientes a las series de la temperatura de vertido promedio diaria de los 15 sistemas geotérmicos someros permite observar la coincidencia aproximada en su totalidad de los ciclos mayores (anual y semestral), hecho que provoca la superposición de las curvas representadas. Esto se debe a que los ciclos involucrados en los regímenes de funcionamiento son similares en muchos de los sistemas, existiendo por ejemplo en todos los casos el ciclo de periodicidad anual. A pesar de que el intervalo de tiempo registrado en días de los sistemas varía en cada uno de los casos, se observa que los picos de temperaturas bajas corresponden a los meses de invierno, cuando se hace uso del sistema de calefacción, y los picos de temperaturas altas son pertenecientes a las épocas estivales coincidiendo con el uso del sistema de refrigeración.

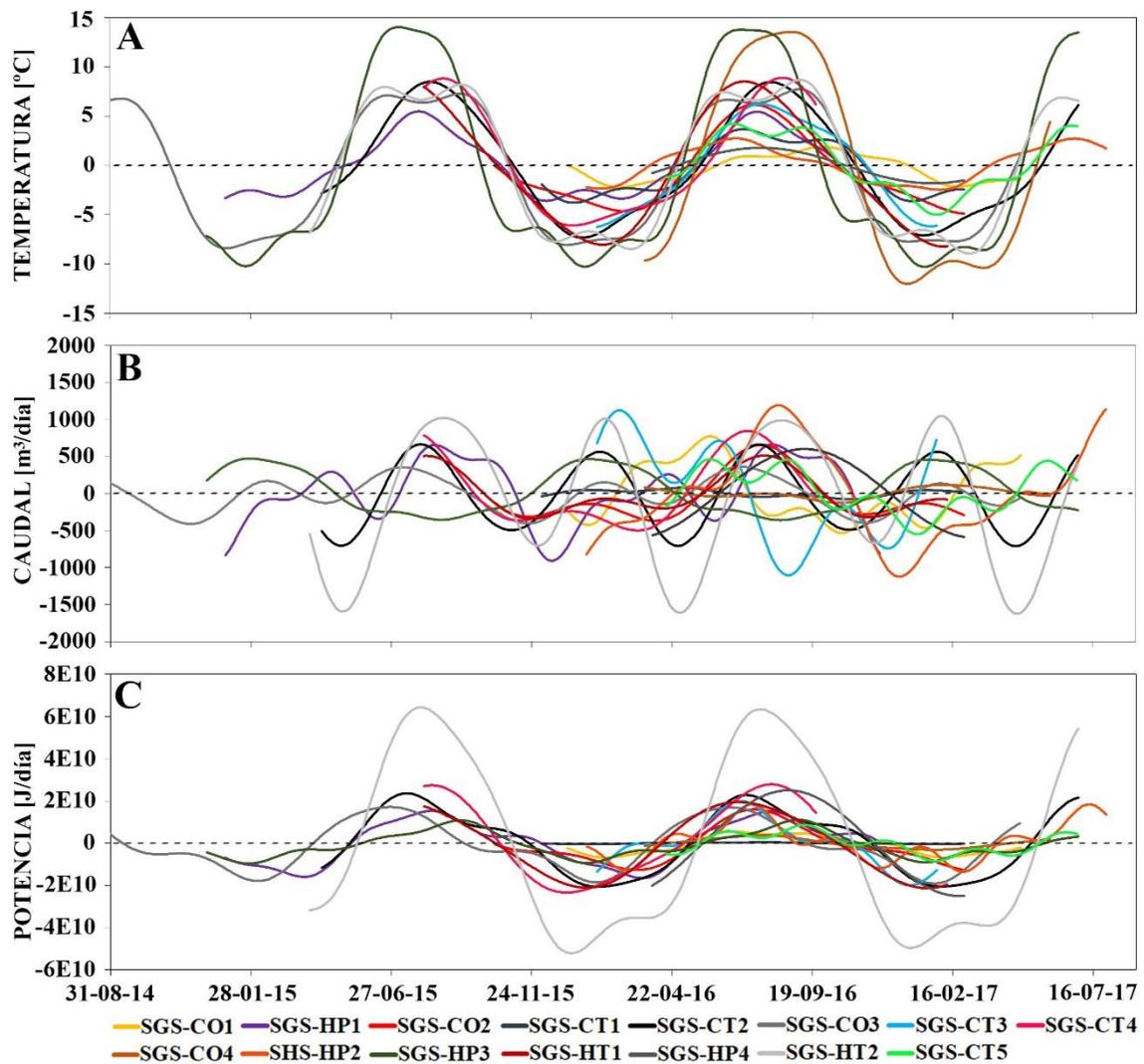


Fig. 12. Representación gráfica de los ajustes realizados mediante las curvas tipo correspondiente a cada uno de los 15 sistemas geotérmicos someros estudiados. A) Se muestran los ajustes realizados para las series de la temperatura de vertido promedio diaria [°C]. B) Curvas tipo correspondientes al caudal acumulado [m³/día]. C) Curvas tipo correspondientes a la potencia térmica disipada diaria [J/día]. Se observa la agrupación de las instalaciones en función de la periodicidad y los rangos de amplitud presentes.

Además, se han analizado los valores de amplitud ( $(T^{\circ}_{\max.} - T^{\circ}_{\min.}) / 2$ ) más significativos presentes en la gráfica los cuales pertenecen al ciclo anual, donde se observa que el 13% del total de instalaciones analizadas (SGS-HP3 y SGS-CO4) destacan por encima de la media con un valor de amplitud superior a 10°C. El 87% de los sistemas restantes se sitúan con valores de amplitud menores distinguiéndose dos grupos: los que presentan una amplitud media en torno a 8°C (SGS-HT1/-HT2/-HP4/-CT2/-CT4) donde se sitúan el 33% y los que tienen una amplitud menor, por debajo de 6°C (SGS-HP1/-HP2/-CO1/-

CO2/-CO3/-CT1/-CT3/-CT5), siendo la amplitud más habitual en las instalaciones (54%).

A continuación, se han determinado los distintos ciclos presentes en cada uno de los 15 sistemas analizados, observando que el 100% de las instalaciones disponen del ciclo anual (365 días), a diferencia del ciclo semestral (180 días) que está presente en el 73% de los casos y los ciclos cuatrimestral (120 días) y trimestral (90 días) se encuentran en el 40 y 33% de los sistemas respectivamente.

A partir de la agrupación de sistemas en función de cada una de las periodicidades se ha calculado la amplitud media, obteniendo que los valores más elevados de amplitud se sitúan en el ciclo de periodicidad anual, con un promedio de  $6,3 \pm 3,6$  °C. Los ciclos semestrales y trimestrales disponen de un valor de amplitud promedio muy similar de  $1,3 \pm 0,9$  °C y  $1,3 \pm 0,7$  respectivamente. Los valores más bajos de amplitud se encuentran en el ciclo de menor periodicidad correspondiente al trimestral, con un promedio de  $0,8 \pm 0,6$  °C.

Las curvas tipo (**Fig. 12B**) correspondientes a las series del caudal [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] de explotación de cada uno de los sistemas muestran una superposición de los ciclos mayores de la misma forma que se muestra en la temperatura. Se observa que los picos de caudales altos coinciden con periodos estivales, cuando se está haciendo uso del sistema de refrigeración, y los caudales menores se dan en los meses de invierno.

Los valores de amplitud muestran una distribución bastante homogénea de las instalaciones, donde el 20% del total de los sistemas analizados (SGS-HT2/-HP2/-CT3) presentan amplitudes superiores a  $500 \text{ m}^3/\text{día}$ . El resto de sistemas se sitúan de forma más concentrada pudiendo diferenciarlos entre los que poseen una amplitud inferior a  $100 \text{ m}^3/\text{día}$  que componen el 13% del total (SGS-CO4 y SGS-CT1) y en un rango medio entre  $100$  y  $500 \text{ m}^3/\text{día}$  se sitúan el 67% restante de instalaciones (SGS-HT1/-HP1/-HP3/-HP4/-CO1/-CO2/-CO3/-CT2/-CT4/-CT5) donde resulta difícil establecer diferencias debido a su similitud.

Por otro lado, se ha calculado la amplitud media presente en cada una de las periodicidades establecidas, donde se observa que el valor promedio de amplitud más elevado se encuentra en el ciclo anual siendo  $400 \pm 236 \text{ m}^3/\text{día}$ . El ciclo semestral presenta una amplitud considerablemente alta también, con un valor promedio de  $337 \pm 268 \text{ m}^3/\text{día}$ . A diferencia de los ciclos cuatrimestral y trimestral cuyos rangos son similares con valores

de amplitud promedio de  $174 \pm 203$  y  $157 \pm 71$  m<sup>3</sup>/día respectivamente presentando una notable diferencia en este caso.

El ajuste realizado mediante las curvas tipo (**Fig. 12C**) para la serie de la potencia térmica disipada de cada una de las instalaciones, como en las series anteriores, muestra una superposición de los ciclos, donde se observa que los picos de potencia altos pertenecen a los meses estivales coincidiendo con el uso de la refrigeración y los picos de potencias bajas corresponden con periodos invernales y por tanto con el uso del sistema de calefacción.

Atendiendo a los valores de amplitud se observa que existe una instalación (SGS-HT2) que destaca por encima del resto con una amplitud de  $5E10$  J/día constituyendo una minoría del 7% sobre el total. El resto de sistemas se sitúan de forma concentrada donde se puede diferenciar un grupo de amplitudes más bajas, del orden de  $1E10$  J/día, pertenecientes a 3 sistemas (SGS-HP2/-HP3/-CT5) que componen el 20%, agrupándose el resto de las instalaciones (SGS-HT1/-HP1/-HP4/-CO1/-CO2/-CO3/-CO4/-CT1/-CT2/-CT3/-CT4) en torno a un valor promedio de amplitud de  $2E10$  J/día constituyendo el 73% del total de los sistemas.

Por medio de la agrupación realizada en función de las periodicidades obtenidas se ha calculado la amplitud media que se presentan en cada uno de ciclos definidos, donde se ha obtenido que el valor promedio de amplitud más alto se sitúa en los datos que componen la periodicidad anual con un valor de  $1,6E10 \pm 1,4E10$  J/día. El resto de ciclos tienen valores del mismo orden presentando el ciclo semestral un valor de amplitud promedio de  $4E9 \pm 2,6E9$  J/día, seguido del ciclo cuatrimestral con un promedio de  $3E9 \pm 2,9E9$  J/día y por último se sitúa el valor de amplitud promedio correspondiente al ciclo trimestral que es de  $2E9 \pm 9E8$  J/día.

Con el objetivo de identificar diferentes comportamientos en el régimen de funcionamiento de los sistemas geotérmicos someros se ha realizado una nueva agrupación de los datos de las instalaciones atendiendo tanto a la tipología establecida, diferenciando entre hoteles (SGS-HT), hospitales (SGS-HP), centros de trabajo (SGS-CT) y centros de ocio (SGS-CO) como a los ciclos de periodicidad involucrados en el análisis (365, 180, 120 y 90 días), donde se ha calculado y representado gráficamente (**Fig. 13**) la amplitud promedio de las variables estudiadas presente en cada de uno de los ciclos en función de su tipología.

Se observa en primer lugar que los promedios de amplitud más elevados son los pertenecientes al ciclo anual (365 días), tal y como se ha citado anteriormente, en las tres variables analizadas, temperatura de vertido promedio diaria [ $^{\circ}\text{C}$ ], caudal [ $\text{m}^3/\text{día}$ ] y potencia térmica disipada [ $\text{J}/\text{día}$ ], y los valores de amplitud media más bajos son los correspondientes al ciclo trimestral (90 días), situándose en un rango intermedio las amplitudes presentes en los ciclos semestral (180 días) y cuatrimestral (120 días).

Atendiendo a la clasificación realizada en función de su tipología se observa que en el caso de los hoteles (SGS-HT) presentan los datos de amplitud media más altos para el ciclo anual (365 días) tanto en temperatura de vertido como en potencia, con valores de  $8,5 \pm 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $3,8\text{E}10 \pm 2,5\text{E}10 \text{ J}/\text{día}$  respectivamente, los cuales destacan por encima del resto de categorías, observándose además una dispersión amplia de los datos de potencia. En cambio, el valor perteneciente al ciclo anual para la serie del caudal es de  $400 \pm 141 \text{ m}^3/\text{día}$ , siendo superado por los hospitales. En el ciclo de semestral se observa que los hoteles también disponen de las amplitudes promedio más elevadas en cuanto al régimen de explotación de caudal y potencia, con valores de  $608 \pm 553 \text{ m}^3/\text{día}$  y  $6\text{E}10 \pm 5,7\text{E}9 \text{ J}/\text{día}$ , a diferencia de la temperatura cuya amplitud promedio de  $1,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  es superada por otras dos instalaciones, observan la gran dispersión presente en el caudal. El ciclo cuatrimestral presenta para todas las variables los valores de amplitud media más altos presentes en los sistemas que disponen de dicho ciclo. La amplitud en cuanto a temperatura y a potencia es de  $2,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $7\text{E}9 \text{ J}/\text{día}$ , superando a los promedios obtenidos en el ciclo de 180 días, a diferencia del caudal que se sitúa por debajo con  $300 \text{ m}^3/\text{día}$ . El ciclo trimestral no se encuentra presente en el régimen de explotación de ninguno de los hoteles analizados.

Los hospitales (SGS-HP) disponen del valor de amplitud promedio de caudal más alto de los involucrados en el ciclo anual siendo  $560 \pm 217 \text{ m}^3/\text{día}$ , a diferencia de la serie de la temperatura cuyo valor es de  $5,1 \pm 4,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  correspondiendo con el valor más bajo y presentando una gran dispersión. La potencia tiene una amplitud promedio de  $1,5\text{E}10 \pm 1\text{E}10$  situándose en un rango intermedio dentro del ciclo descrito. En el ciclo semestral se observa que para el caso de la temperatura son los hospitales los que tienen el valor más alto con una amplitud promedio de  $1,6 \pm 1,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y elevada dispersión.

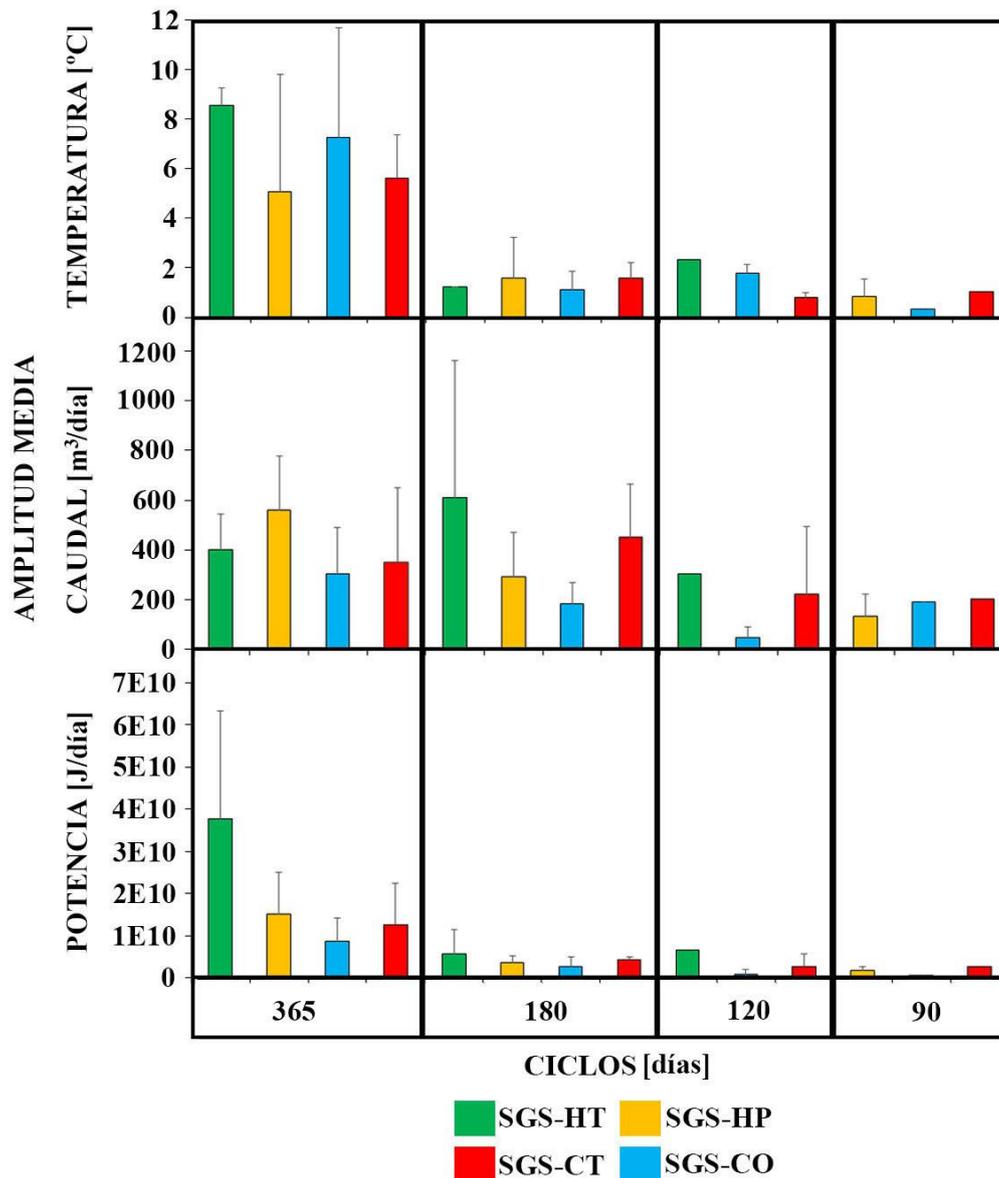


Fig. 13. Representación gráfica del cálculo de la amplitud media presente en cada uno de los ciclos de periodicidad definidos (365, 180, 120 y 90 días) agrupados en función la tipología de los sistemas geotérmicos involucrados en el estudio, clasificados como hoteles (SGS-HT), hospitales (SGS-HP), centros de ocio (SGS-CO) y centros de trabajo (SGS-CT). Se observa la distribución de las amplitudes promedio presentes en las series de la temperatura de vertido promedio diaria [°C], caudal [m³/día] y potencia térmica disipada [J/día].

En cuanto al caudal y la potencia tienen valores promedio de amplitud de  $290 \pm 179$  m³/día y  $2E9 \pm 9E8$  J/día respectivamente situándose en un rango intermedio dentro del conjunto de sistemas. El ciclo trimestral presenta una amplitud promedio de  $0,8 \pm 0,7$  °C para el caso de la temperatura, que se sitúa en medio del resto de sistemas involucrados, de la misma forma que pasa con el caudal y la potencia cuyos valores son de  $131 \pm 87$  m³/día y  $2E9 \pm 9E8$  J/día respectivamente, obteniendo una alta dispersión en las series de

la temperatura y el caudal. Se observa que en ninguno de los hospitales analizados está presente el ciclo cuatrimestral.

Los centros de ocio (SGS-CO) destacan por la presencia de un valor de amplitud promedio elevado en la serie de la temperatura del ciclo anual en comparación con el resto de sistemas, siendo  $7,3 \pm 4,4$  °C, algo menor que el valor más alto correspondiente a los hoteles y presentando una gran dispersión. En una posición intermedia se sitúan las amplitudes correspondientes al caudal y la potencia con valores de  $300 \pm 186$  m<sup>3</sup>/día y  $8,9E9 \pm 5,5E9$  J/día respectivamente. El ciclo semestral presenta los valores más bajos de amplitud promedio para las tres variables analizadas en comparación con el resto de sistemas, siendo  $1,1 \pm 0,8$  °C para la temperatura,  $179 \pm 87$  m<sup>3</sup>/día el dato del caudal y  $2,9E9 \pm 2,5E9$  J/día la potencia térmica disipada. El ciclo trimestral presenta un valor intermedio en la temperatura con una amplitud promedio de  $1,75 \pm 0,35$  °C y los valores más bajos de caudal y potencia siendo  $46 \pm 42$  m<sup>3</sup>/día y  $1,2E9 \pm 1,6E9$  J/día respectivamente, cuyas series se observa que poseen una gran dispersión de los datos. Por último, en el ciclo de 90 días se observa una amplitud promedio de la temperatura y potencia de  $0,3$  °C y  $1E9$  J/día respectivamente, correspondiendo con los valores más bajos del total analizado, a diferencia del caudal situado en un rango medio con  $188$  m<sup>3</sup>/día. Se observa que en el régimen de explotación de los centros de ocio están presentes todos los ciclos de periodicidad que han sido definidos.

Los centros de trabajo (SGS-CT) destacan por encontrarse en rangos intermedios donde se observa que en la periodicidad anual los valores de amplitud promedio correspondientes a la temperatura, caudal y potencia son de  $5,6 \pm 1,8$  °C,  $348 \pm 300$  m<sup>3</sup>/día y  $1,3E10 \pm 9,8E9$  J/día respectivamente, considerando la presencia de una gran dispersión de los datos en la serie del caudal. De la misma forma sucede con las series correspondientes al ciclo semestral, encontrándose por encima de la media con valores de amplitud de temperatura, caudal y vertido de  $1,6 \pm 0,6$  °C,  $450 \pm 212$  m<sup>3</sup>/día y  $4,5E9 \pm 3E9$  J/día respectivamente. En el ciclo cuatrimestral se observa en el caso de la temperatura que se trata del valor de amplitud promedio más bajo de los analizados siendo  $0,8 \pm 0,2$  °C, a diferencia del caudal y la potencia que se encuentran en un rango intermedio con  $217 \pm 274$  m<sup>3</sup>/día y  $3E9 \pm 3E9$  J/día, presentando un alto grado de dispersión en ambos casos. Por último, se observa que los centros de trabajo también disponen de los cuatro ciclos definidos en el estudio donde el ciclo trimestral presenta los

valores más altos presentes en las tres variables analizadas, con amplitudes promedio de 1 °C en el caso de la temperatura, 200 m<sup>3</sup>/día de caudal y 3E9 J/día para la potencia.

## 7. DISCUSIÓN

Los análisis llevados a cabo a lo largo del presente trabajo, así como el proceso de tratamiento al que han tenido que ser sometidos los datos previamente a su estudio, han puesto de manifiesto la complejidad del régimen de explotación de los sistemas geotérmicos someros.

En la ciudad de Zaragoza se realiza el aprovechamiento geotérmico somero para la climatización de las edificaciones, contando actualmente con 60 instalaciones de las cuales 33 se encuentran monitorizadas en continuo, disponiendo actualmente de un registro de datos de explotación con intervalos temporales superiores a un año en cada uno de los casos. En este trabajo se han tratado los datos de temperatura de vertido, caudal y potencia registrados de 15 de los sistemas geotérmicos disponibles, con el fin de analizar los regímenes de explotación para entender el funcionamiento de estos sistemas y poder llevar a cabo una gestión sostenible de los mismos. Las instalaciones han sido seleccionadas con la intención de cubrir un rango representativo a escala de ciudad y posteriormente clasificadas en función de su tipología en cuanto a hoteles, hospitales, centros de ocio y centros de trabajo con el fin de sintetizar los resultados y poder comparar las distintas categorías.

Los resultados derivados del análisis estadístico del régimen de explotación de los 15 sistemas geotérmicos someros muestran que el 100 % de las instalaciones analizadas disponen de temperaturas de vertido promedios diarias superiores a 17 °C, representando por tanto un uso generalizado del sistema de refrigeración durante los meses estivales. Cifra que justifica que dos tercios del aprovechamiento geotérmico llevado a cabo en la ciudad de Zaragoza sea para refrigeración (Garrido *et al.*, 2010), hecho debido a la influencia continental del clima mediterráneo que posee la ciudad. Existe un 20 % de los sistemas que no disponen de datos de vertido a temperaturas bajas (< 17 °C) representando por tanto que no se lleva a cabo la explotación geotérmica para el sistema de calefacción, este porcentaje se encuentra formado por dos hospitales y un centro de trabajo de grandes dimensiones, por lo que se deduce que la explotación geotérmica no puede asumir las necesidades tan elevadas requeridas para el sistema de calefacción. En el caso de los

hospitales la implantación de la geotermia para climatización fue resultado de la búsqueda de una solución a la proliferación de brotes de Legionella en este tipo de centros derivado de los sistemas de refrigeración (Peña *et al.*, 2000) por lo que se deduce que los dos hospitales que no disponen de régimen de explotación relacionado con el sistema de calefacción es debido a que únicamente han cubierto con dicha energía las necesidades relativas a refrigeración, las cuales son susceptibles de desarrollar Legionella debido a las altas temperaturas alcanzadas y el estancamiento de agua que se produce en este proceso. Los rangos de mediana de la temperatura de vertido presentes en el régimen de explotación del sistema de refrigeración, muestran que únicamente el 27 % de las instalaciones analizadas disponen de un valor por encima de 26 °C, considerando esta cifra elevada para tratarse de un vertido. Estos sistemas, a pesar de que componen un porcentaje minoritario, son los causantes del aumento de la temperatura del acuífero y desarrollo de procesos de interferencia térmica entre las distintas instalaciones de geotermia somera de la ciudad, donde en muchos casos se sitúan muy próximas las unas de las otras, siendo susceptibles de sufrir este tipo de problema. En los rangos de mediana de las temperaturas de vertido correspondientes al sistema de calefacción se observa una agrupación del 75 % de las instalaciones en valores por encima de 15 °C y únicamente una instalación presenta un valor de mediana inferior a 13 °C. En los datos de caudal se muestra una distribución de los valores de mediana entre dos rangos de explotación donde se encuentran la mayoría de las instalaciones, existiendo un 48 % de los sistemas con un régimen inferior a 500 m<sup>3</sup>/día y un 40 % que se encuentra entre 500 y 1000 m<sup>3</sup>/día. Únicamente el 12 % de los sistemas analizados tienen regímenes de caudal de explotación superiores a 1000 m<sup>3</sup>/día, coincidiendo con que se trata de dos hospitales se considera normal que destaquen frente al resto debido a que las dimensiones y por tanto las necesidades energéticas son superiores. Los valores de potencia derivados de los sistemas estudiados muestran, igual que se ha observado en la temperatura, que el 20 % no utilizan la explotación geotérmica para calefacción, careciendo por tanto de potencia con valores por debajo de 0. Estos sistemas correspondientes a dos hospitales y un centro de trabajo, junto con un hotel, presentan los valores de mediana más altos siendo superiores a 5E9 J/día, llegando a alcanzar 3,5 E10 J/día en el último caso. Se trata de instalaciones con tamaños considerablemente grandes cuyas necesidades climáticas y por tanto energéticas son superiores al resto de sistemas. Las series de la temperatura, caudal y potencia disponen de una baja dispersión de los datos, además de observar que la presencia de

valores atípicos y extremos es puntual en alguna de las instalaciones analizadas, considerando por tanto que se han obtenido series limpias en la mayoría de los casos.

Los resultados obtenidos a partir del análisis de las series temporales de las tres variables pertenecientes a los 15 sistemas geotérmicos estudiados mediante análisis espectral, muestra en primer lugar que las periodicidades de escala diaria e inferiores, obtenidas mediante las series con cadencia horaria, no son detectables visualmente mediante la representación gráfica de las series. El análisis espectral ha permitido encontrar los ciclos diarios o inferiores que componen el régimen de explotación de los sistemas, detectando la presencia en la totalidad de los sistemas analizados, los ciclos de 24 y 12 horas, a excepción de uno de los sistemas donde sólo se presenta el ciclo diario. Además, se observan ciclos de 8 y 6 horas en el 80 y 67 % de los sistemas respectivamente. La presencia de estos ciclos ha puesto de manifiesto que los regímenes de explotación de los sistemas se encuentran en coherencia con los ciclos establecidos por las jornadas laborales, horarios de apertura de comercios y otros eventos de pequeña escala, permitiendo por tanto establecer a su vez una periodicidad diaria.

Las series de cadencia diaria estudiadas mediante análisis espectral han permitido obtener los ciclos de mayor escala superiores al mensual, los cuales han sido correlacionados con ciclos definidos como anuales, semestrales, cuatrimestrales o trimestrales. El ciclo anual se encuentra presente en el 100 % de los sistemas analizados dando una idea de las características de los regímenes de explotación. Además, aparece un ciclo semestral, cuatrimestral y trimestral en el 73, 40 y 33 % de los casos respectivamente. Se ha complementado el análisis espectral con la regresión sinusoidal donde se han vuelto a obtener los mismos ciclos de periodicidad, verificando su existencia, y los datos de amplitud y fase correspondientes a cada ciclo, por medio de lo cual se ha podido realizar el ajuste para la deducción de cada curva tipo. Los hoteles se ha observado que se rigen por el ciclo anual y el semestral principalmente, debido a las continuas necesidades de su explotación, de la misma forma que lo hacen los hospitales, donde además se observa la presencia del ciclo trimestral. El régimen de funcionamiento de los centros de ocio y centros de trabajo es más heterogéneo con presencia también del ciclo cuatrimestral, esto indica un funcionamiento más variado derivado de las necesidades y jornada laboral o de apertura de este tipo de edificaciones.

La síntesis realizada mediante la creación de las curvas tipo ha mostrado una coincidencia de la totalidad de las instalaciones en cuanto a la posición de los ciclos anuales y semestrales, observando en la temperatura y en la potencia la correspondencia de dichos ciclos con la estacionalidad. Los periodos estivales presentan temperaturas y potencias altas (por encima de 0), representando el uso del sistema de refrigeración, a diferencia de los meses fríos donde es el sistema de calefacción el que marca el régimen de explotación, representado por temperaturas y potencias bajas (por debajo de 0).

Se ha podido establecer un régimen de explotación habitual o estándar situándose en estos rangos más del 50 % de los sistemas donde se observa una amplitud promedio inferior a 6 ° C para el caso de la temperatura, un promedio situado entre 100 y 500 m<sup>3</sup>/día de caudal y un valor promedio de amplitud de 2E10 J/día de las series de la potencia, hecho que muestra un patrón general en el funcionamiento de los sistemas de la ciudad, que podría ser tomado como referente indicador del buen rendimiento y sostenibilidad de estas explotaciones, derivando en un desarrollo futuro más sostenible de este recurso renovable.

## **8. CONCLUSIONES**

El estudio de los 15 sistemas geotérmicos someros ha permitido analizar y sintetizar los regímenes de explotación mediante la creación de una curva de funcionamiento tipo consiguiendo obtener un patrón común en dichas instalaciones. El presente análisis ha mostrado una visión a escala de ciudad hasta el momento desconocida, mediante la identificación de anomalías y definición de un régimen estándar para cada uno de los sistemas que pueda servir como herramienta de diagnóstico futura derivando en una mejor gestión.

El tratamiento previo al que han sido sometidas las series derivadas de los regímenes de explotación, mediante su filtrado y depuración, ha permitido obtener series de cadencia horaria y diaria, resultando ser fácilmente implementables en los métodos de análisis. Las citadas series han sido sometidas a su estudio mediante estadísticos descriptivos básicos permitiendo describir cada uno de los regímenes de funcionamiento. El análisis espectral ha permitido predecir los ciclos de periodicidad más significativos presentes en cada una de las instalaciones, complementado a su vez por métodos de regresión sinusoidal que han permitido validar dichos ciclos y obtener los valores de amplitud y fase necesarios

para la creación de las funciones que componen las curvas de funcionamiento tipo de cada una de las variables de los sistemas analizados.

Se ha observado que el 100 % de las instalaciones utilizan la explotación geotérmica para la climatización de las edificaciones mediante el sistema de refrigeración, a diferencia del sistema de calefacción el cual existe un 20% de las instalaciones cuyas necesidades energéticas son utilizadas en combinación con otros sistemas.

Se ha definido un régimen explotación común entre las instalaciones consideradas teniendo en cuenta las tres variables analizadas, temperatura, caudal y potencia, en el que se sitúan más del 50 % de los sistemas estudiados.

Los ciclos de periodicidad determinados muestran un funcionamiento común en los regímenes de explotación, donde se observa que los ciclos de mayor cadencia obtenidos son correlacionables con cambios a escala global como la estacionalidad.

## 9. BIBIOGRAFÍA

- Alperin, M. (2013). Introducción al análisis estadístico de datos geológicos. *1a Ed. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.*
- Ascheri, M. E. y Pizarro, R. A. (2001). Interpolación Polinomial usando Matlab. *Revista Digital: Matemática, Educación e Internet*, 2(3).
- Banks, D. (2009). Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. *Hydrogeology Journal*, 17: 1149-1155.
- Barnolas, A. y Robador, A. (1991). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 383 (Zaragoza) y memoria.* IGME, Madrid. 44.
- Brigham, E. O. (1988). The fast Fourier transform and its applications. *Englewood Cliffs, NJ: prentice Hall.* Vol. 448.
- Chatfield, C. (2003). The Analysis of Time Series. *Chapman Hall/CRC, sixth edition.*
- Directiva 2000/60/CE de 23 de octubre (2000). Establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas.* Vol. 22.
- Epting, J. y Huggenberger, P. (2013). Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – Definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology*, 501: 193-204.
- Fernández, M. C. (2009). Manual básico de Matlab. *Edit. Complutense*, Madrid.
- García Castellanos, D., Vergés, J., Gaspar Escribano, J. y Cloetingh, S. (2003). Interplay between tectonics, climate, and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108.
- García Gil, A. (2015). Criterios técnicos para la gestión de recursos geotérmicos someros en acuíferos urbanos. *Tesis doctoral*, Universidad de Zaragoza, 283.
- García Gil, A., Vázquez Suñe, E., Schneider, E., Sánchez Navarro, J. Á. y Mateo Lázaro, J. (2015). Relaxation factor for geothermal use development—Criteria for a more fair and sustainable geothermal use of shallow energy resources. *Geothermics*, 56, 128-137.

- Garrido, E.A., Arce, M.V. y Van Ellen, W. (2006). Modelo matemático de flujo subterráneo del acuífero aluvial del Ebro en el entorno de Zaragoza. De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada. *Serie Hidrogeología y Aguas Subterránea*. Alicante. 657.
- Garrido, E., Sánchez Navarro, J.A. y Coloma, P. (2010). Aprovechamiento geotérmico somero del acuífero aluvial urbano de Zaragoza: primeros resultados. *Geogaceta*, 49: 119-122.
- Geoplat (2010). *Visión a 2030*. Ministerio Ciencia e Innovación, Madrid. 51.
- Jaudin, F. (2013). General Report of the current situation of the regulative framework for the SGE systems. *Regeocities*, 50.
- Luzón, A., Pérez, A., Soriano, M. A., Gil, H., Yuste, A., y Pocoví, A. (2010). El relleno de paleodolinas en la cuenca del Ebro y sus posibles aportaciones a la evolución geodinámica y ambiental durante el Pleistoceno. *Geogaceta* 48: 11-14.
- Moreno Merino, L., Garrido Schneider, E. A, Azcón González de Aguilar, A., Duran Alsero, J.J. (2008). *Hidrogeología Urbana de Zaragoza*. IGME, Madrid. 200.
- Nie, N. H., Bent, D. H. y Hull, C. H. (1975). SPSS: Statistical Package for the Social Sciences. 249.
- Pardo, G., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Perez-Ribarés, F.J., Vázquez-Urbez, M. y Villena, J. (2004). La cuenca del Ebro. *Geología de España*. Sociedad Geológica de España; Instituto Geológico y Minero de España. 533-543.
- Parsons, M. L. (1970). Groundwater Thermal Regime in a Glacial Complex. *Water Resources Research*, 6: 1701-1720.
- Peña, P. A., Gost, J., Redín, J. M., Manrique, A., Lameiro, F. J. y Echeverría, J. M. (2000). Programa de minimización de riesgos biológicos asociados a la infraestructura hospitalaria: funciones, actividades, responsabilidades. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*. Vol. 23. 205-227.
- Pérez López, C. y Capella, I. (2002). Estadística aplicada a través de Excel.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. y Flannery, B. P. (1992). Numerical recipes in C. *Cambridge: Cambridge University*.

- Quirantes, J. (1978). Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. *Diputación Provincial de Zaragoza*. 200.
- Riba, O., Reguant, S. y Villena, J. (1983). Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. *Geología de España*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 131-159.
- Rugiero, F. D. (2006). Análisis espectral de series temporales de temperaturas y su aplicación al estudio de su comportamiento en una red de observatorios meteorológicos. *Tesis doctoral*. 256.
- Sánchez Navarro, J. A., Jiménez, N., Galve, P., Asta, M. P., Gómez, L., y Fuentes, J. (2004). Estudio hidrogeológico de la subsidencia y los humedales en el entorno de Zaragoza. *Ayuntamiento de Zaragoza* (inédito).
- Simón, J. L., Soriano, M. A., Pocoví, A., Arlegui, L.E., Casas, A. M., Liesa, C. L., Luzón, A., Pérez, A., Pueyo, O., Pueyo, E., Mochales, T., Gracia Abadías, F.J. y Ansón, D. (2009). Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: El caso de Zaragoza. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 303-315.
- Simón, J. L., Soriano, M. A., Perez, A., Luzón, A., Pocoví, A. y Gil, H. (2014). Interacting tectonic faulting, karst subsidence, diapirism and continental sedimentation in Pleistocene deposits of the central Ebro Basin (Spain). *Geological Magazine*. 1115-1134.
- Soriano, A. (1990). Geomorfología del sector centromeridional de la Depresión del Ebro. *Diputación Provincial de Zaragoza*, 269.
- Soriano, A. (2011). Geología y geomorfología de la Delimitación Comarcal de Zaragoza. *Delimitación Comarcal de Zaragoza*. 15-34.
- Soriano, A. Luzón, A. Yuste, A. Pocoví, A. Pérez, A., Simón, J.L. y Gil, H. (2012). Quaternary alluvial sinkholes: record of environmental conditions of karst development. Examples from the Ebro Basin, Spain, *Journal of cave and karst studies* 173-185.

**10. ANEXO I. Funciones de ajuste realizadas para la obtención de las curva tipo  
cada una de las variables analizadas**

Tipología	Sistema geotérmico somero	Variable	Función ajuste [A] para obtención de la curva tipo
HOTELES	SGS-HT1	T [°C]	$8*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+0.15)+1.2*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+1.5)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$300*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+0.17)+217*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-0.25)$
		P [J/día]	$2e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+0.3)+0.2e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+2.5)$
	SGS-HT2	T [°C]	$9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.1)+1.2*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-1.9)+2.3*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+3.1)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$500*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+3)+1000*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+1.5)+300*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+2)$
		P [J/día]	$5.6e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.2)+1e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+1.5)+0.7e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+1.5)$
HOSPITALES	SGS-HP1	T [°C]	$4*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2.7)+1*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-1.3)+0.6*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))-1.5)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$387*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2.7)+415*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-2.7)+211*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))-2.1)$
		P [J/día]	$13.4e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2.3)+3.8e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-0.04)+1.9e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+2.7)$
	SGS-HP2	T [°C]	$2.4*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+3.5)+0.3*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+2)+0.3*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+1)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$850*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+3)+370*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-1.7)+145*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))-1.1)$
		P [J/día]	$10e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-3)+5.5e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+0.15)+3e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+0.4)$
	SGS-HP3	T [°C]	$12*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2.5)+3.4*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-1.3)+1.6*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+0.25)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$400*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-1)+85*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-2)+38*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))-1.7)$
		P [J/día]	$0.8e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2)+2.4e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+2.7)+1.2e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))-0.3)$
	SGS-HP4	T [°C]	$1.8*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$600*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.8)$
		P [J/día]	$3e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.5)$
CENTROS DE OCIO	SGS-CO1	T [°C]	$1.8*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+1.8)+0.3*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+1)+0.3*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))-0.1)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$500*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.2)+190*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+1.5)+188*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+1.3)$
		P [J/día]	$5.5e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2.4)+1.2e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+0.6)+1e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+0.9)$
	SGS-CO2	T [°C]	$5*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+1.3)+1.4*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-3)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$400*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+1.3)+258*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+2.7)$
		P [J/día]	$12e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+1.2)+4.9e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-3)$
	SGS-CO3	T [°C]	$8.5*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-0.5)+0.7*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+2.4)+1.5*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+1.2)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$220*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+0.3)+211*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-1.3)+75*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+0.7)$
P [J/día]		$1.5e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-0.07)+0.5e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+0.9)+0.2e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))-2)$	
SGS-CO4	T [°C]	$13.6*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.4)+2*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+0.9)+2*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+2)$	
	P [J/día]	$83*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+0.3)+56*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+1.6)+16*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))-1.4)$	
CENTROS DE TRABAJO	SGS-CT1	T [°C]	$3.5*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2)+1*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+2)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$60.5*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2)+30*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))-2)$
		P [J/día]	$4e+8*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+2.6)+0.7e+8*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))-1)$
	SGS-CT2	T [°C]	$7.4*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2)+1.1*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+1.5)+0.6*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+1.3)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$50*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.2)+600*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+2.4)+90*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+2)$
		P [J/día]	$20e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2)+4e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-2.3)+3e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))+1.8)$
	SGS-CT3	T [°C]	$6*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+3)+0.7*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))-2)$
		Q [m <sup>3</sup> /día]	$731*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-1)+532*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))-1)$
		P [J/día]	$1.4e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.7)+0.6e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(120))-1.7)$
	SGS-CT4	T [°C]	$7*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-0.2)+2*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-1)$
Q [m <sup>3</sup> /día]		$550*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+0.2)+300*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))+0.6)$	
P [J/día]		$2.4e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))+0.1)+0.5e+10*\cos(2*\pi*((0L-1)/(180))-0.9)$	
SGS-CT5	T [°C]	$4*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-1.8)+1*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+1.8)$	
	P [J/día]	$350*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-1.5)+200*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))-3)$	
			$6e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(365))-2.2)+3e+9*\cos(2*\pi*((0L-1)/(90))+2.1)$

## **11. ANEXO 2. Curvas tipo diferenciadas en función de la tipología.**

