



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Diego Hernández Sanz

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

Procedimiento de localización, cálculo y diseño, desde la perspectiva térmica, de un sondeo profundo, para la captación de agua.

FEBRERO 2026

Diego Hernández Sanz

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:

**Alfonso Javier Morano
Rodríguez**



POLITÉCNICA

RESUMEN.

La escasez de agua es un problema clave en el desarrollo de la humanidad que se ve acrecentado por el contexto actual de cambio climático. En este marco surgen los métodos no convencionales de extracción de agua; el ejemplo más claro de esto es la desalación. Dentro de los métodos existentes, se encuentra el proceso conocido como destilación multiefecto, en el cual es necesario elevar el agua a una temperatura de 70 °C para conseguir su potabilización.

Los acuíferos costeros en contacto hidráulico con el mar están potencialmente expuestos a ser afectados por el agua del mar en un proceso conocido como intrusión marina; este proceso tiene origen antrópico, pues en los acuíferos costeros altamente explotados el agua salada gana presencia a costa de la reducción que experimenta el agua dulce debido a las numerosas extracciones. A dicha agua salada se le va a llamar agua mineral salada.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia de procesos de desalación y mejorar la salud de los acuíferos costeros, en este proyecto se desarrolla un programa, usando el software Matlab R2025a, gracias al cual se obtiene el ahorro térmico que supone la instalación de un sondeo que extraiga agua mineral salada con un caudal constante de $20 \frac{l}{s}$ a una temperatura mayor que en la superficie gracias al gradiente geotérmico local. Para calcular el ahorro, el código calcula la profundidad necesaria del sondeo y las pérdidas térmicas existentes en su extracción.

Este programa obtiene también resultados acerca del comportamiento del frente de la intrusión marina ante un sondeo de este tipo y un cálculo aproximado de la potencia eléctrica necesaria en el equipo de bombeo.

Este programa se aplicó a tres ubicaciones distintas: Los Alcázares, en la Región de Murcia; El Ejido, en la provincia de Almería; y Santa Lucía de Tirajana, en la provincia de Las Palmas. Seleccionadas por presentar acuíferos afectados por intrusión marina y contaminados por nitratos procedentes de la actividad agrícola.

Los resultados fueron distintos para cada ubicación:

- En Los Alcázares, la instalación de este tipo de sondeos no supone una mejora en la eficiencia térmica de la planta. Esto es debido a la disposición geológica del acuífero, que impide que la intrusión marina alcance mucha profundidad, por lo que no podrá aprovecharse del gradiente geotérmico de la zona.
- En El Ejido sí es eficiente la extracción de agua mineral salada para procesos de desalación. Sin embargo, la geología local provoca incertidumbre acerca de la profundidad del acuífero y la ubicación de la interfaz dulce-salada.
- En Santa Lucía de Tirajana también es eficiente el uso de este tipo de sondeos, obteniendo resultados óptimos en el ahorro energético. Esto es debido al gradiente geotérmico que existe en la zona, ligeramente superior al normal.

Palabras clave:

Destilación multiefecto, agua mineral salada, sondeo, temperatura, ahorro.

Códigos Unesco:

2506.08 Energía y procesos geotérmicos.

2508.04 Aguas subterráneas

3322.05 Fuentes no convencionales de energía.

ÍNDICE

RESUMEN.	2
1.- INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 ¿Qué son las desaladoras híbridas?.....	6
1.2 La energía geotérmica.....	8
1.3 La intrusión marina.	9
1.4 Características del sondeo.....	13
1.5 Campo de Cartagena.	14
1.6 Campo de Dalías.	19
1.7 Acuífero de Gran Canaria.	22
2.- OBJETIVOS.....	27
3.- METODOLOGÍA.....	28
3.1 Validación del modelo.....	32
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	38
4.1 Resultados para el Campo de Cartagena.....	39
4.2 Resultados para el Campo de Dalías.....	43
4.3 Resultados para la isla de Gran Canaria.	46
4.4 Discusión de los resultados.....	50
5.- CONCLUSIONES.....	51
6.- LÍNEAS FUTURAS.....	53
7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	54
8.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO.	59
9.- EVALUACIÓN DE IMPACTOS.	60
10.- ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS LEGALES Y ÉTICOS PERTENECIENTES A SU ELABORACIÓN Y/O APLICACIÓN.	61
11.- CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.	62
12.- ÍNDICE DE FIGURAS.	63
13.- ÍNDICE DE TABLAS.	65
ANEXO I: Programa empleado para la resolución general de los casos.....	66
ANEXO II: Programa modificado para el Campo de Dalías.....	79
ANEXO III: Fichas Excel utilizadas con la información de cada ubicación.....	85

1.- INTRODUCCIÓN.

La escasez de agua es ya un problema fundamental al que la humanidad se debe enfrentar en las próximas décadas; desde la revolución industrial, la población ha crecido exponencialmente gracias al progreso tecnológico, sin embargo, este planeta posee recursos limitados que impiden el crecimiento ilimitado de la población. Se estima que para 2050 la población mundial se acerque a los diez mil millones de habitantes [1].

De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, elaborado en 2020 [2]: “El uso global de agua se ha multiplicado por seis en los últimos cien años... y sigue creciendo a un ritmo constante de aproximadamente 1 % al año... debido al crecimiento demográfico, el desarrollo económico y al cambio de los patrones de consumo”. Este mismo informe [2] establece que el cambio climático es responsable de la disminución en la disponibilidad de agua superficial debido principalmente al aumento de la temperatura del aire, que provocará mayor evaporación; la disminución en las precipitaciones en diversas regiones aumentará el estrés hídrico local. Además, la UNESCO [2] establece que el 66,4 % de la población vivirá en ciudades para el año 2050, “el crecimiento demográfico y la urbanización exacerbarán el estrés hídrico...especialmente en áreas densamente pobladas de las economías en vías de desarrollo”.

Para el caso concreto de España hay que tener en cuenta que el sector del agua se ha modernizado notablemente en el último cuarto de siglo; de acuerdo con Berbel y Espinosa-Tasón [3]: “Entre el año 2000 y 2008 el PIB español creció un 25 % mientras el uso del agua se redujo en un 34 % situándose en el pasado año 2018 en 25,2 km³”. Esta evolución viene influenciada por todos los sectores, entre los que destaca el agrario, responsable de casi dos terceras partes de las extracciones. La superficie ocupada para cultivos lleva descendiendo de manera constante desde mediados de la década de 1970, principalmente debido a la disminución de las hectáreas dedicadas a cosechas de secano; sin embargo, el regadío ha aumentado notablemente su presencia. La combinación del descenso de uso de agua junto con un aumento en la superficie del regadío se entiende gracias a un aumento en la eficiencia y productividad del uso del agua; sin embargo, la escasez ha obligado a recurrir a métodos no convencionales de extracción de agua, que se explicarán en el siguiente párrafo. Este empleo de fuentes no convencionales provoca un aumento en el consumo de energía, vinculando de esta forma el agua, la energía y la producción de alimentos [3].

En cuanto a los métodos no convencionales, como la desalación de agua, de acuerdo con Tena et al [4], España posee una de las mayores capacidades de desalación a nivel mundial. El principal inconveniente de este tipo de agua es el consumo de energía, que provoca un mayor coste en la producción; por lo tanto, el ahorro energético es clave en el desarrollo y comercialización del agua; siendo imposible por motivos termodinámicos potabilizar agua procedente del mar con un consumo inferior a $1 \frac{kWh}{m^3}$ con la tecnología actual, en la actualidad, las plantas de ósmosis inversa alcanzan valores de entre 3 y $3,5 \frac{kWh}{m^3}$ [4].

En este trabajo, se va a llamar salmuera a la masa de agua salada resultante de la operación de las desaladoras, esta salmuera genera una de las mayores preocupaciones en la operación de este tipo de plantas pues es necesario que se realicen numerosos estudios de impacto ambiental, y modelizaciones matemáticas para garantizar una mezcla rápida con el medio marino; además de diversos planes de vigilancia para el seguimiento de los impactos y poder adoptar las medidas pertinentes. La salmuera es especialmente un problema en desaladoras alejadas de la costa, pues no existe la posibilidad de verterlas directamente al mar; esto se soluciona o bien

mediante procesos de evaporación-cristalización, lo cual es muy costoso; o mediante la inyección de este en acuíferos profundos o vertido en cauces naturales, lo que tiene un impacto ambiental muy negativo; la solución más prometedora es, potencialmente, utilizar esta masa de agua salada sobrante como subproducto para la producción de sales y productos químicos [4].

Las desaladoras se dividen en dos principales grupos: desaladoras de membrana y desaladoras de evaporación o destilación. En el primer tipo destaca la ósmosis inversa, mediante la cual se filtra agua a través de membranas semipermeables superando la presión osmótica natural al aplicar una fuerza mecánica; la nanofiltración, con un principio similar a la anterior, se diferencia es que permite operar con presiones menores; finalmente, la electrodiálisis separa electroquímicamente los iones mediante una corriente eléctrica. Por otra parte, en el segundo grupo se encuentran distingue la Evaporación Instantánea Multietapa, en el cual se encadenan una serie de etapas a presión y temperatura decrecientes que en cada fase consiguen la evaporación del agua; y la Destilación Multiefecto, que tiene un principio de funcionamiento similar al anterior en el que se pulveriza agua salada sobre vapor caliente para conseguir que se condense dentro de los tubos y se aprovecha este calor para continuar el proceso con el vapor libre de sales en la siguiente cámara [5].

De acuerdo con la Asociación Española de Desalación y Reutilización [5]:”La técnica más utilizada actualmente a nivel mundial para desalar agua es la Ósmosis Inversa, que alcanza casi el 70 % del total”, lo cual se debe principalmente a la diferencia energética que suponen los $3 \frac{kWh}{m^3}$ en comparación con los $50 \frac{kWh}{m^3}$ de las primeras plantas de evaporación [6]. A este proceso le sigue la Evaporación Instantánea Multietapa, con un 18 %; la Destilación Multiefecto, a la que corresponden el 7 % de las desaladoras mundiales; la Nanofiltración y la Electrodiálisis, siendo las menos extendidas con representando un 3 % y un 2 % del total, respectivamente [5].

1.1 ¿Qué son las desaladoras híbridas?

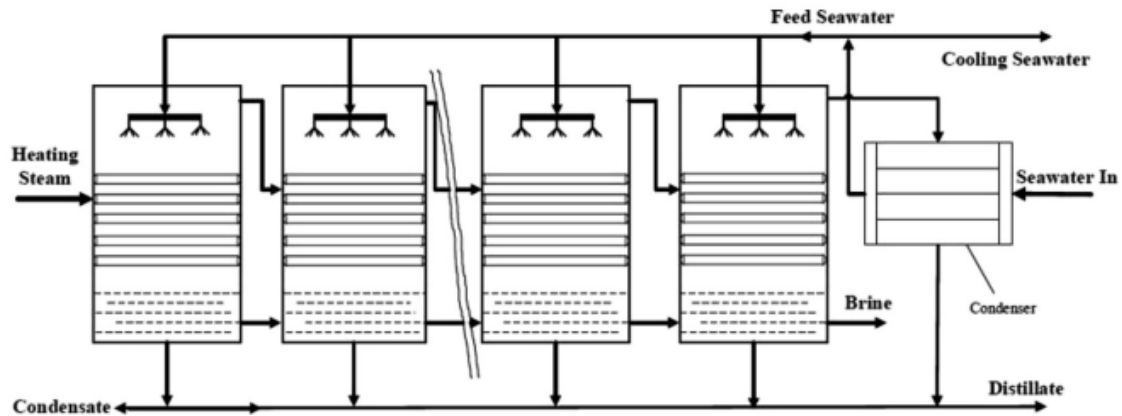
Como se comenta en el capítulo anterior, ante el aumento de la población, una herramienta crucial para evitar la escasez de agua es el progreso técnico. El motivo de este proyecto es el aprovechamiento de energías renovables para obtener agua potable, para ello se inspira en la idea de las desaladoras híbridas, las cuales combinan el calor obtenido del terreno y del sol además de la radiación solar para obtener energía eléctrica a través de placas fotovoltaicas.

Este proceso consiste en cuatro etapas:

- Una primera etapa de captación de agua directamente desde la intrusión marina en el subsuelo, con el objetivo de que este a mayor temperatura que en la superficie.
- Una segunda etapa en la que se calienta el agua a la temperatura necesaria para su destilado mediante energía solar térmica.
- Una tercera etapa consistente en el uso de energía fotovoltaica para la alimentación de la planta.
- Una cuarta etapa en la que se deshace de la salmuera, mezclando parte con el agua destilada para lograr su potabilidad, y otra parte eliminada gracias a una salina [7].

El desarrollo de este trabajo se centra únicamente en modelar la primera fase de este tipo de desaladoras para lograr la extensión de su uso, la necesidad de energía térmica para el presente caso implicará que el agua alcance los 70 °C. Las desaladoras que serán objeto de estudio son principalmente las que utilizan la técnica de destilación multiefecto [8].

En este tipo de desaladoras, el vapor se produce en el contacto entre la superficie de intercambio de calor y la fina película de agua salada que cae tras ser pulverizada dentro de los evaporadores. En la Figura 1 se puede observar un diagrama simplificado de este proceso:



Fuente: Al-Mutaz y Wazeer [9].

Figura 1: Diagrama simplificado del proceso de desalación multiefecto.

En dicha figura se aprecia como entra el agua salada a través de un condensador, que en este caso ejerce la función de precalentamiento, posteriormente es pulverizada a través de los distintos evaporadores (conocidos como efectos en este tipo de plantas), en cada uno de estos el agua que se deposita en la superficie del intercambiador en forma de fina capa termina pasando por el condensador en forma de vapor de agua para finalmente ser mezclada con parte de la salmuera producida para ser apta para el consumo humano [9]. La destilación multiefecto puede clasificarse como de baja o alta temperatura en función de la temperatura máxima del agua salada de alimentación, el límite entre estos grupos está en los 90 °C de acuerdo con Al-Shammiri y Safar [10]; en este artículo se destaca también que la operación a temperaturas inferiores a 75 °C evita la formación de corrosión y sarro, lo cual es el principal problema de trabajar a altas temperaturas. Como se explica con anterioridad, este proceso corresponde a la desalación mediante destilación o evaporación, en la Tabla 1 se encuentra una comparación de los dos principales métodos, destilación multiefecto o multietapa:

Tabla 1: Comparación de algunos de los métodos de destilación multiefecto y multietapa sobre determinados parámetros.

Fuente: Al-Mutaz y Wazeer [9].

Característica	Multiefecto	Multietapa
Consumo total equivalente de energía ($\frac{kWh_e}{m^3}$)	4,5-12,5	12-18
Temperatura máxima del agua salada de alimentación (°C)	55-75	85-130
Tiempo de arranque (h)	Bajo	Alto
Tolerancia al cambio en la composición del agua y la contaminación	Alta	Alta
Ratio entre el producto y el flujo total de agua salada	0,1-0,25	0,1-0,15
Coste de capital	Bajo	Alto

En dicha tabla se aprecian las principales ventajas que tienen las desaladoras por destilación, y especialmente las ventajas de la destilación multiefecto sobre la multietapa; destacando el menor consumo de energía, la menor necesidad de temperatura en el agua salada de alimentación o el mayor ratio de producción entre el flujo total de agua salada.

Para el aprovechamiento de la destilación multiefecto en las desaladoras híbridas se procederá a desarrollar la energía geotérmica en el siguiente apartado para estudiar cómo aprovechar el calor del subsuelo para obtener agua potable.

1.2 La energía geotérmica

La presencia de fenómenos como los volcanes o las fuentes termales evidencia la existencia del calor almacenado dentro de la Tierra; el aprovechamiento energético de este calor es lo que conocemos como energía geotérmica. Este calor se transmite normalmente por conducción, y viaja desde el núcleo hasta la corteza terrestre, pero la baja conductividad térmica de los materiales que componen el subsuelo provoca que gran parte de esta energía se almacena durante periodos largos de tiempo distribuyéndose de forma que las temperaturas aumenten con la profundidad, lo que se conoce como gradiente geotérmico, cuyo valor estándar en la corteza terrestre es de un grado centígrado por cada treinta y tres metros de profundidad.

El gradiente geotérmico se puede representar de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = -\frac{1}{33} \left(\frac{^{\circ}C}{m} \right)$$

La existencia de este gradiente de temperaturas implica la existencia de un flujo geotérmico (ϕ), que se entiende mediante la ley de la conducción de Fourier:

$$\phi = -k \frac{\Delta T}{\Delta z} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Siendo k la conductividad térmica del subsuelo ($\frac{W}{m^{\circ}C}$) [11].

De acuerdo con el Manual de Geotermia, publicado en 2008 por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) junto con el Instituto Geológico y Minero de España [12]: “Se denomina recurso geotérmico a la porción de calor desprendido desde el interior de la Tierra que puede ser aprovechado por el hombre en condiciones técnicas y económica. ...Cuando se dan las circunstancias adecuadas para que unos materiales permeables llenos de agua intercepten el flujo de calor desde el interior del globo...se dan las condiciones favorables para la existencia de un yacimiento geotérmico”.

Nuevos avances en esta área permiten el aprovechamiento de zonas en las que no existan este tipo de materiales permeables ni haya agua en circulación, la tecnología que es capaz aprovechar este tipo de recursos se conoce como Sondeos Geotérmicos Estimulados [13], de acuerdo con Moraño Rodríguez y Guillén Viñas [13]: “ La permeabilidad en las rocas puede crearse artificialmente inyectando grandes volúmenes de agua a elevada presión a través de un pozo para producir su fracturación. El proceso, llamado hidrofracturación o fracturación hidráulica, es usado frecuentemente en la producción de petróleo y gas”.

Volviendo a los yacimientos geotérmicos convencionales, hay tres tipos principales [12]:

- Alta entalpía: corresponde a zonas de la corteza terrestre con valor anómalo del gradiente geotérmico, esto provoca que la temperatura supere los 150 °C y la presión se halle en un rango de valores que permiten su aprovechamiento para generar electricidad.
- Media entalpía: la temperatura se encuentra entre los 100 °C y los 150 °C, esta característica permite tanto la generación de electricidad mediante ciclos binarios como el aprovechamiento directo de calor para diversos procesos.
- Baja entalpía: donde la corteza tiene gradientes y flujos geotérmicos normales, consiguiendo temperaturas inferiores a los 100 °C, se utiliza el calor directamente.

Este trabajo se va a centrar principalmente en este último tipo de yacimientos, por lo que van a ser desarrollados un poco más en profundidad. Al estar ubicados en zonas con gradiente geotérmico considerado como normal, pueden ser aprovechados en mayor parte que otros tipos de yacimientos, lo que genera un especial interés en su aprovechamiento; su uso principal es la calefacción, ya sea urbana, industrial o agrícola [11]. Este tipo de yacimientos destaca por el uso directo de calor, aunque para temperaturas inferiores a los 30 °C se puede integrar una bomba de calor geotérmica que se utilice para obtener calor del subsuelo en temporadas de frío y devolverlo cuando el clima sea demasiado caluroso [12].

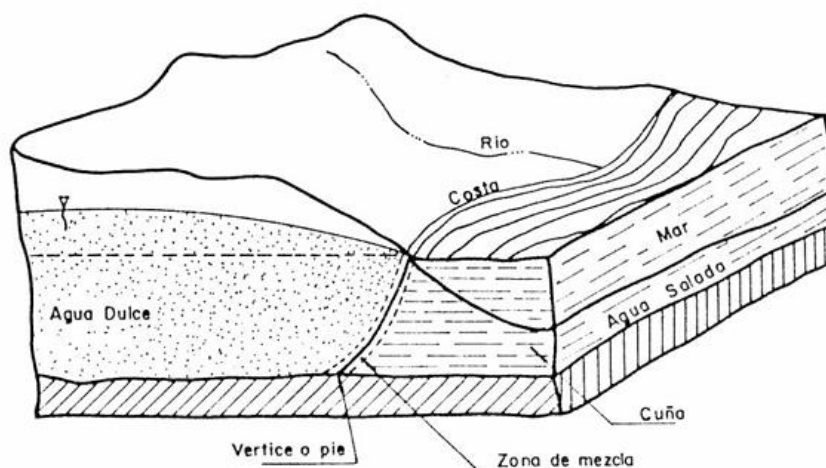
El principal motivo del uso de energía geotérmica es el aumento en la eficiencia de los procesos, ejemplo de esto es la planta ubicada en la ciudad de Dholera, en el estado de Gujarat, India. En este caso, el agua extraída de un pozo geotérmico, aproximadamente a 45 °C, se usa como fuente térmica en combinación con una bomba de calor, permitiendo obtener un fluido caliente, a una temperatura de entre 75 °C y 80 °C. Este calor se utiliza posteriormente en actividades como el procesamiento de la miel y la pasteurización de la leche, reduciendo parcialmente la demanda de energía convencional y mejorando la eficiencia energética global del sistema [14].

1.3 La intrusión marina.

Una vez entendida la situación en cuanto a los tipos de plantas desaladoras y como se va a aprovechar esta desaladora híbrida, queda por saber de dónde se va a obtener la materia prima para este proceso: el agua salada.

Los acuíferos costeros en contacto hidráulico con el mar pueden verse afectados por el agua salada procedente de este, la damnificación dependerá de los gradientes presentes en la zona. De acuerdo con el Capítulo 8 del libro *Aguas Subterráneas* [15]: “Esta migración de agua salada a acuíferos de agua dulce bajo la influencia de la explotación de agua subterránea se conoce como intrusión marina”. La complicación de las relaciones entre el agua dulce y la salada en entornos subterráneos se incrementa debido a las diferentes densidades, viscosidades e incluso temperaturas de las dos masas de agua, además de la miscibilidad existente [16].

Si se recurre a la bibliografía, se encuentran más definiciones que ayudan a entender este proceso; por ejemplo, si se estudia el libro *Hidráulica de Aguas Subterráneas* [16], en su capítulo 10, en el que se estudian los acuíferos costeros se encuentra la siguiente definición: “La intrusión de agua salada es el desplazamiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce.”, además se puede encontrar también la siguiente descripción: “Se define como cuña de agua salada o cuña salina la masa de agua salada de gran longitud con sección en forma de cuña, apoyada en la base del acuífero y con el vértice o pie tierra adentro.”. Para mayor entendimiento de estas definiciones se recurre a la Figura 2:



Fuente: Vélez Otálvaro [16].

Figura 2: Representación de un acuífero costero en presencia de intrusión marina.

Donde se aprecia el acuífero de agua dulce a la izquierda, en el subsuelo costero y a alturas superiores al nivel del mar, representado por la línea horizontal discontinua; y en la sección derecha se representa la intrusión marina en el perfil del subsuelo mediante la previamente mencionada cuña de agua salada.

Para entender la intrusión marina es necesario entender el movimiento del agua en medios porosos subterráneos saturados. Este tema se estudió ya de forma experimental durante el siglo XIX por el ingeniero francés Henry Darcy, que trabajó en el abastecimiento de la ciudad francesa de Dijon[17]; la conclusión de su trabajo dio lugar a la Ley de Darcy, que se representa de la siguiente manera:

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{l}$$

Donde Q es el caudal en $\frac{m^3}{s}$, siendo directamente proporcional a la pérdida de carga, h, e inversamente proporcional a la longitud del terreno en estudio, l, ambas en unidades de

longitud; en la fórmula se encuentra también la sección a través de la cual pasa el agua, A , en m^2 y el coeficiente de permeabilidad, K , en $\frac{m}{s}$. Para la aplicación de esta ley es necesario asumir las siguientes hipótesis:

- Los poros vacíos deben estar comunicados, conformando un medio continuo.
- Medio homogéneo.
- Medio isotrópico.
- Se considera que el flujo del agua se encuentra en régimen laminar.

Los tres parámetros principales de la Ley de Darcy son la permeabilidad, K ; el gradiente hidráulico, i ; y la velocidad del flujo, V .

El coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica, K , se valora en unidades de velocidad y mide el comportamiento del flujo en medios porosos; además, se ve influenciado por las características del medio y del fluido. Se puede expresar entonces de la siguiente manera:

$$K = K_0 \frac{\gamma}{\mu}$$

Siendo K_0 la permeabilidad geométrica del medio, γ el peso específico, y μ la viscosidad dinámica del fluido, respectivamente. Por lo tanto, los factores que influyen en la permeabilidad se pueden separar en los propios al medio y los propios al fluido [16].

En cuanto a los primeros, estos se ven influenciados por la resistencia que opone el terreno al paso del fluido, la cual es función de la porosidad y la granulometría de este. Para los segundos, se verán principalmente influenciados por la temperatura, pues un aumento de esta provoca un descenso en la viscosidad del fluido, provocando que el cambio en la temperatura sea directamente proporcional a la variación de la temperatura; esto se puede relacionar también con la profundidad, pues, como se ha explicado en la sección anterior, la temperatura aumenta con esta [16].

El gradiente hidráulico i , viene definido por la siguiente ecuación:

$$i = \frac{\Delta h}{l}$$

Que representa la pendiente de la línea de carga, Δh , antes representada como $h_2 - h_1$, por unidad de longitud horizontal de la sección en estudio, l [16].

El nivel h de carga en cada punto de estudio se conoce como nivel piezométrico, y el fluido se mueve de los puntos de mayor a menor nivel piezométrico. Se puede explicar entonces el movimiento de las aguas subterráneas como perpendicular a las líneas equipotenciales del agua presente en el subsuelo [16].

La velocidad del flujo, también conocida como velocidad de Darcy, obtenida como resultado del caudal entre la sección transversal:

$$V = \frac{Q}{A} = Ki$$

Aunque es cierto que el agua en medios porosos se mueve con una velocidad variable en función de las características de los poros, por lo que la velocidad real del agua no coincide con la de Darcy; esto implica que esta última si se puede aplicar para estudiar el desplazamiento de la masa de un fluido, pero no para el movimiento de partículas [16].

Si bien la Ley de Darcy se puede aplicar a la mayoría de los casos de aguas subterráneas en medios porosos, esta deja de ser válida para determinadas condiciones, como pueden ser valores extremos del gradiente hidráulico. Los valores altos del gradiente hidráulico implican una velocidad demasiado elevada como para considerar el flujo laminar, para interpretar estos valores se recurre al número de Reynolds:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

Siendo V la velocidad del flujo, d el diámetro característico del material y ν la viscosidad cinemática del fluido. Para terminar de definir las características del flujo, se establece también un coeficiente de fricción:

$$Cf = \frac{igd}{V^2}$$

Estas características tienen en cuenta el gradiente hidráulico y la velocidad de Darcy, que se relacionan entre sí gracias a la siguiente expresión:

$$\frac{igd}{V^2} = f \left(\frac{Vd}{\nu} \right)$$

Gracias a esta relación y al estudio experimental del comportamiento, se puede establecer una relación si el número de Reynolds se encuentra entre 1 y 10, esto es cuando las fuerzas inerciales son prácticamente nulas y se puede aplicar la Ley de Darcy; si bien no se puede determinar un valor a partir del cual esta ley se tiene que dejar de aplicar, se utiliza el rango mencionado previamente [16].

Volviendo a la intrusión marina, de acuerdo con Vélez Otálvaro [16]: “Los primeros estudios de la relación agua dulce – agua salada en regiones costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben (1889) y Herzberg (1901) respectivamente y se basan en el equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad. Las hipótesis básicas admitidas son:

- El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal (se admiten como válidas las hipótesis de Dupuit Forcheimer) y por tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- No existe flujo de agua salada.
- La interfase es un plano no existiendo zona de mezcla.”

De estos estudios se obtuvo la siguiente expresión:

$$Z = \frac{h\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d}$$

Siendo γ_s y γ_d el peso específico del agua salada y dulce en $\frac{kg}{m^3}$ respectivamente, Z es la profundidad a la que se encuentra la cuña de agua salada por debajo del nivel del mar en metros y h es la elevación en metros del nivel freático sobre la superficie del mar. Si la densidad del agua salada es $1025 \frac{kg}{m^3}$, entonces la profundidad de la interfaz de intrusión marina sería 40 veces mayor a la elevación del nivel freático.

En este caso, y como consecuencia de las hipótesis realizadas en cuanto a la horizontalidad del flujo, el nivel freático se corta en la misma intersección con la interfase y el nivel del mar; por

esta razón, Glover llevó a cabo, en 1959, un análisis más riguroso estableciendo la siguiente expresión para la interfase:

$$Z^2 = 2BQ_0 \frac{x}{K} + \left(\frac{BQ_0}{K} \right)^2$$

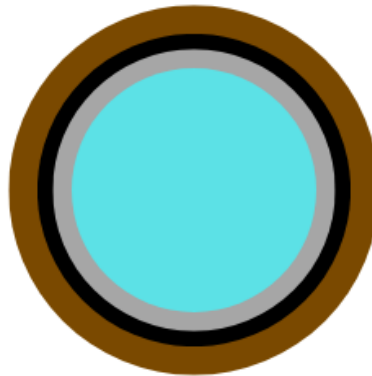
Además, la franja por la que escapa el agua procedente del acuífero al mar tiene un ancho que se expresa de la siguiente manera:

$$x_0 = \frac{Q_0}{2KB}$$

Siendo B un factor adimensional que representa $\frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d}$, x la distancia a la costa, en metros, K la permeabilidad del acuífero, en $\frac{m}{s}$, y Q_0 el caudal de agua dulce por unidad de longitud de costa [16].

1.4 Características del sondeo

En este apartado se esclarecerán las dimensiones y materiales del sondeo, para entender mejor esto, se representa la sección transversal del sondeo se aprecia en la Figura 3:



Fuente: Propia.

Figura 3: Representación de la sección transversal del sondeo.

Donde el círculo azul central representa el agua mineral salada en el interior de la tubería, esta es la forma en la que se denominará al agua extraída de la intrusión marina; el gris la propia tubería, en negro la cimentación y en marrón el subsuelo. Hay que destacar que es una representación cualitativa, no está realizada a escala, es para un mejor entendimiento de la situación.

Las tuberías usadas en perforaciones geotérmicas son del tipo J-55, K-55 y N-80 [18]; y las características de estos tubos de acero al carbono, según el Instituto Americano del Petróleo [19], son las establecidas en la norma API 5CT, cuya equivalente es la norma UNE-EN ISO 11960:2021 (Ratificada) [20]. Los tipos J-55 y K-55 son las más utilizadas en instalaciones con menores requerimientos mecánicos por su bajo coste, para este caso, se recomienda la J-55 pues es más rentable económicamente y sus exigencias mecánicas son menores, adecuado para este tipo de sondeos de baja profundidad y temperatura [21]; además, el diámetro de la tubería será establecido en función del caudal para obtener una velocidad adecuada del agua mineral salada dentro de la tubería.

El espacio entre la tubería geotérmica y el perímetro excavado se suele rellenar principalmente por motivos estructurales para evitar el colapso del pozo; sin embargo, estudios recientes ven este apartado de la arquitectura geotérmica como un espacio de avance en cuanto a la eficiencia de la transferencia de calor, principalmente se plantea esta cementación como una forma de reducir la conductividad térmica entre el terreno y la tubería uniendo ambos materiales. Estos estudios han concluido que utilizando materiales de relleno con mejor conductividad térmica se consigue una reducción en la resistencia térmica por conducción, que conlleva una mejora en la eficiencia de la transferencia de calor [22], [23].

Sin embargo, este trabajo se desarrolla en entornos con un gradiente geotérmico normal y no muy lejos de la superficie, el objetivo del sondeo es mantener el calor en el agua extraída, por lo tanto, no va a interesar aumentar la conductividad térmica del material de relleno; se va a emplear entonces un relleno de cemento usado en los sondeos geotérmicos convencionales, con un valor de conductividad térmica de $0,6 \frac{W}{mK}$ para el cemento a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

De acuerdo con Li et al [24], se puede establecer el radio de influencia térmica en 7 metros de distancia radial en el subsuelo; su conductividad térmica dependerá de su composición.

En cuanto a la bomba, es considerada de acuerdo con el Capítulo 13 del libro *Hidráulica de aguas subterráneas* [16], como bomba para pozos profundos, esto implica que se va a ubicar sumergida dentro del pozo. Se realiza un cálculo aproximado de la potencia necesaria en la bomba para cada caso, el cual consiste en calcular la altura necesaria de la bomba teniendo en cuenta las pérdidas que se pueden ocasionar en la turbina y un factor de seguridad, y con eso calcular la potencia eléctrica necesaria [25].

1.5 Campo de Cartagena.

La primera ubicación en la que se va a centrar el desarrollo del presente trabajo se va a realizar en el municipio de Los Alcázares, en la comunidad autónoma de la Región de Murcia, ver Figura 4:



Fuente: Región de Murcia Digital [26].

Figura 4: Ubicación del municipio de Los Alcázares en la Región de Murcia.

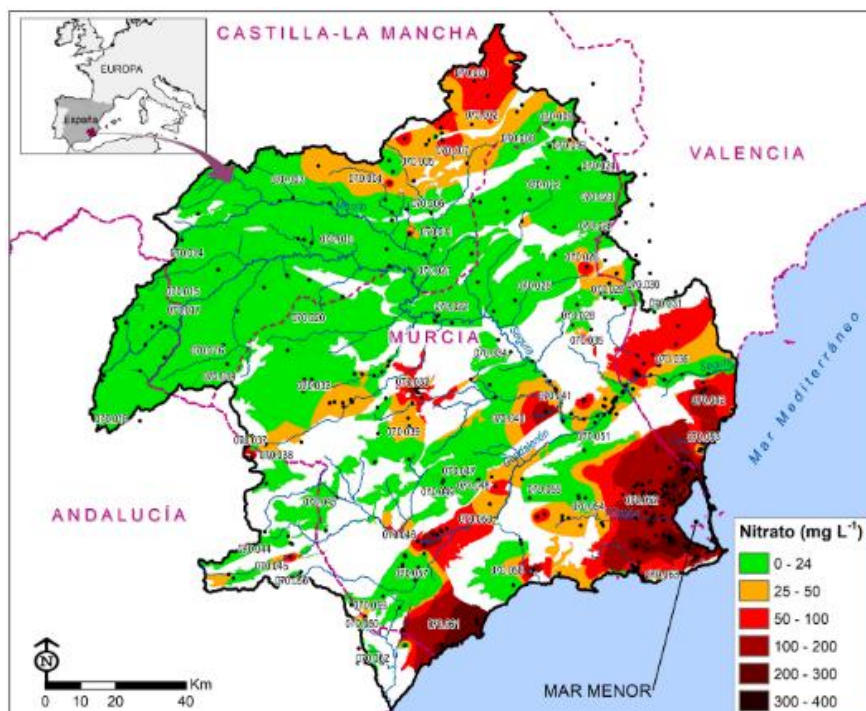
Este municipio, que se encuentra en la costa del Mar Menor, se sitúa en la frontera entre las comarcas del Campo de Cartagena y del Mar Menor. Además, limita por el sur con la Rambla del Albujón.

Los acuíferos presentes en la cuenca del Mar Mediterráneo han sido usados por sus habitantes desde hace milenios; sin embargo, en los últimos 50 años han experimentado cambios mucho más significativos, lo que ha acrecentado el estrés hídrico debido a cubrir la demanda de los cultivos de la zona, las necesidades del turismo y las ciudades costeras [27]. Este trabajo se desarrollará en el Campo de Cartagena, en la Región de Murcia, España; esta es una región semiárida ubicada en el sureste del país, y el uso de su tierra está dominado principalmente por agricultura intensiva cuya demanda de agua se cubre gracias a los acuíferos subterráneos, el trasvase Tajo-Segura, y métodos no convencionales, principalmente la desalación de agua procedente del mar o del agua salobre del subsuelo [28].

El estudio realizado por Jiménez-Martínez et al [28] establece que las dos principales formas de contaminación de la zona son el drenaje de ácidos de origen minero y por nitratos procedentes de la agricultura intensiva de cultivos herbáceos en regadío, cítricos y frutales.

Para el primer caso es necesario saber que la zona más meridional del Campo de Cartagena fue una zona con actividad minera desde la antigüedad hasta su cese a finales del siglo pasado, aunque su periodo de mayor actividad se define entre los años 1930 y 1980 [29]. Debido a esta actividad, la hidrología de la zona se ha visto alterada por la existencia de miles de minas a campo abierto y subterráneas. Las consecuencias de este abandono son la contaminación, tanto de las aguas superficiales como subterráneas, por la presencia de metales pesados y ácidos procedentes de los procesos de oxidación e hidrólisis que ocurren en los sulfuros del metal de acuerdo con Jiménez-Martínez et al [28]. La escorrentía y el viento, consecuencia de los episodios de climatología extrema, son capaces de transportar estos contaminantes a la planicie que gobierna el Campo de Cartagena y al Mar Menor [28].

De acuerdo con la Directiva de Nitratos de la Unión Europea (91/676/EEC) [30], se consideran contaminadas las masas de agua subterráneas con una presencia de nitratos superior a los $50 \frac{mg}{l}$; de esta forma, se definen las zonas vulnerables a la contaminación por nitrato, que es la superficie topográfica capaz de dar origen a la contaminación de masa subterránea; y las zonas contaminadas, es la parte de la masa subterránea donde la proporción de nitrato supera el límite establecido. Para conocer el estado de los acuíferos se recurre a Sánchez et al [31] en cuyo artículo se define y estudia la contaminación por nitratos de 63 masas de agua subterráneas ubicadas en la demarcación hidrográfica del Segura, los resultados de este artículo para los acuíferos del Campo de Cartagena se pueden apreciar en la Figura 5 :



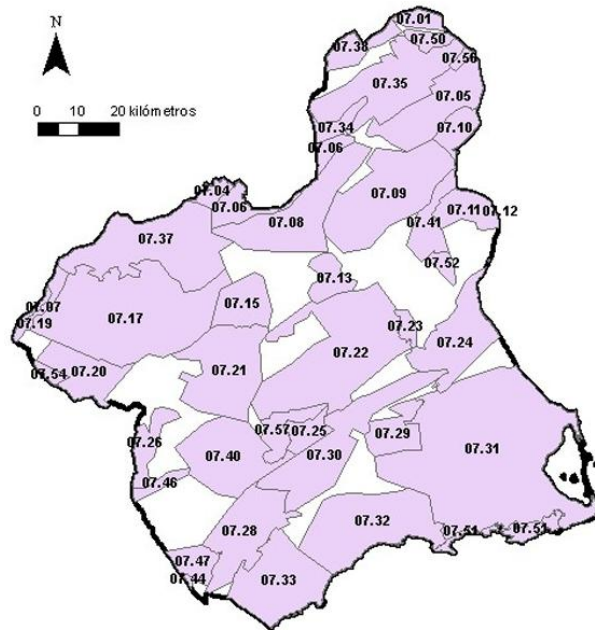
Fuente: Sánchez et al [31].

Figura 5: Distribución espacial de las concentraciones medias anuales de nitrato en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrológica del Segura durante 2021.

Donde se aprecia que los acuíferos ubicados en el Campo de Cartagena presentan niveles de contaminación que superan el límite establecido por la Unión Europea; el porcentaje de cobertura de las zonas contaminadas por nitratos asciende al 81 %, mientras que las zonas en riesgo, que se definen como aquellas en las que la presencia de nitratos se encuentra entre los 25 y los $49 \frac{mg}{l}$, se sitúa en el 12 % [31].

De acuerdo con Sánchez et al [31]: “Los retornos de riego han provocado la subida del nivel freático del acuífero Cuaternario, dejándolo más expuesto a la contaminación por nitrato ... y aumentando las descargas de agua ricas en nitrato al Mar Menor y al Mediterráneo”. Además, la sobreexplotación de acuíferos inferiores para el riego y su posterior tratamiento en plantas desalobradoras genera una salmuera que alcanza también la rambla de Albuñón, a este cauce llega también el drenaje del agua de cultivos, escorrentías y estaciones depuradoras de aguas residuales insuficientemente tratadas, principal punto de descarga en el Mar Menor [31].

Para entender la composición geológica del subsuelo de esta comarca hay que conocer el agua subterránea que ocupa esta región, para ello se recurre a la Figura 6:



Fuente: Martínez Tovar [32].

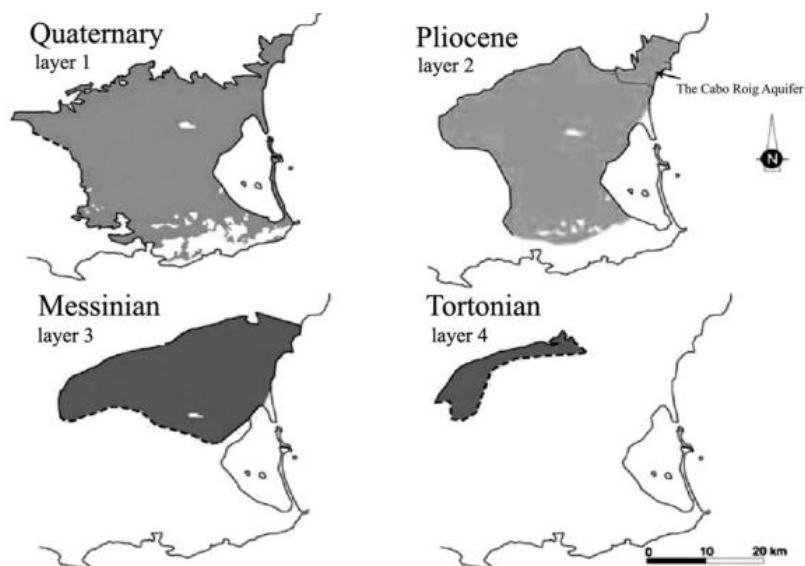
Figura 6: Unidades hidrográficas de la Región de Murcia.

En esta imagen se aprecia la clasificación realizada por la Confederación Hidrográfica del Segura acerca de las distintas unidades hidrológicas de la Región de Murcia, en este caso, la correspondiente al Campo de Cartagena es la 07.31 [32]. De acuerdo con Erena Arrabal et al [33]: “El Campo de Cartagena constituye una unidad hidrogeológica amplia y compleja, que se ubica en una de las grandes depresiones interiores postmanto de las Cordilleras Béticas ocupada por un potente relleno neógeno, predominantemente margoso, de más de 1000 metros de espesor en el que existen intercalaciones detríticas y calcáreas del Mioceno al Cuaternario, constituyendo diferentes niveles de acuíferos.”

Esto es crucial para entender que la unidad hidrogeológica 07.31 que se encuentra en la Figura 6 se encuentra dividida en varios acuíferos:

- Cuaternario: con un espesor que varía entre los 20 y los 150 metros, está compuesto de gravas, arenas, limos, arcillas y caliches; se encuentra sobre un lecho impermeable de margas terciarias.
- Plioceno: con un espesor que varía entre los 10 y los 110 metros, está compuesto por areniscas; limitado por arriba y por abajo por margas del Plioceno y Mioceno superior, respectivamente.
- Messiniense: presenta un espesor medio de 125 metros, y está compuesto de margas tortonienses y messinienses.
- Tortoniense: con un espesor que varía entre los 150 y los 200 metros, está compuesto, por el lado oeste de conglomerados poligénicos, y por el lado este de areniscas; situado sobre margas del Mioceno medio.

Para mejor entendimiento de su geometría y ubicación se recurre a la Figura 7:

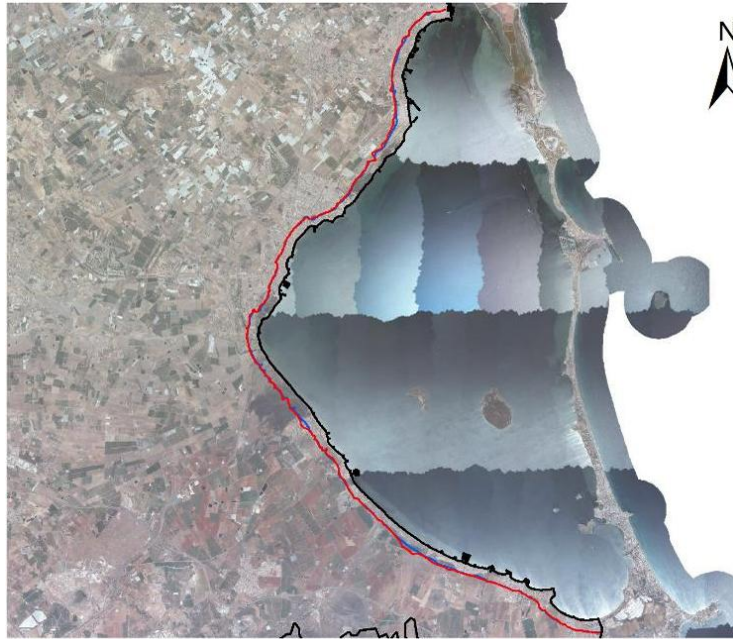


Fuente: Aparicio et al [34].

Figura 7: representación de los acuíferos mencionados en el Campo de Cartagena.

Estos acuíferos, pese a estar separados por capas de baja permeabilidad, presentan interconexiones, de origen natural y artificial, entre ellos. Debido a la ubicación de la localización seleccionada, la sección del acuífero que más interesa es aquella ubicada la más cercana a la costa; en esta, el acuífero Cuaternario, al ser el más superficial, es el único que se ve afectado por el agua de mar debida a la intrusión marina, además de que va a ser el más vulnerable a la contaminación por ser el más superficial. El bombeo de agua se realiza principalmente desde los acuíferos Plioceno y Messiniense; y de acuerdo con Erena Arrabal et al [33]: “Hay que tener en cuenta, también, la interconexión interna entre diferentes acuíferos, realizada en condiciones naturales y a través de sondeos deficientemente construidos”.

En cuanto al estado de la intrusión marina en la zona, la siguiente imagen fue desarrollada en la memoria redacta por Future Water para la Comunidad de Regantes Arco Sur Mar Menor S.L. [35] y muestra la máxima incursión de la cuña en el acuífero Cuaternario, ver Figura 8:



Fuente: Contreras et al [35].

Figura 8: Penetración máxima de la intrusión marina en el acuífero cuaternario.

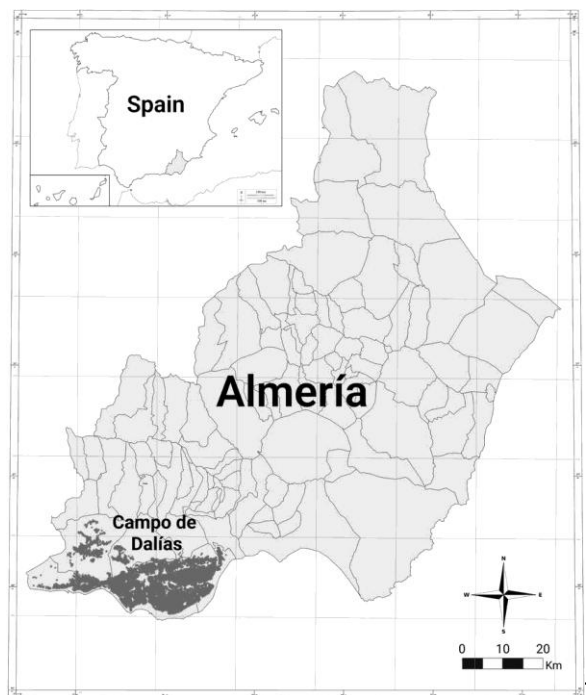
En la que se puede apreciar el Mar Menor, el borde negro ubicado en la parte occidental de este representa el límite del acuífero cuaternario coincidente con la línea de costa; esta memoria estudia además la evolución de la intrusión marina en periodos húmedos, en azul, y de sequía, en rojo, el hecho de que estas líneas se superpongan y solo sea visible la roja indica la escasa variación de la intrusión. El valor medio de esta asciende hasta los 330 metros, valor coherente con los resultados obtenidos tras el cálculo analítico, según este informe [35].

En esta localidad las temperaturas se estiman entre 50 °C y 80 °C en un rango de profundidades que oscila entre los 500 metros y los 2 000 metros; el acuífero cuaternario presenta unas temperaturas de extracción que pueden alcanzar los 25 °C, a una profundidad de 150 metros y con un gradiente geotérmico normal puede alcanzar los 30 °C [32].

En El Campo de Cartagena ya existen desalobradoras que se aprovechan del agua salobre en los acuíferos descritos, principalmente mediante ósmosis inversa, pues la menor salinidad de este agua en comparación con la del mar aumenta la vida útil de las membranas [34]; esto sirve para saber que la desalación de agua procedente de los acuíferos es una tecnología conocida en la zona.

1.6 Campo de Dalías.

La segunda ubicación estudiada en el presente proyecto es el Campo de Dalías, ubicado en la provincia andaluza de Almería, ver Figura 9:

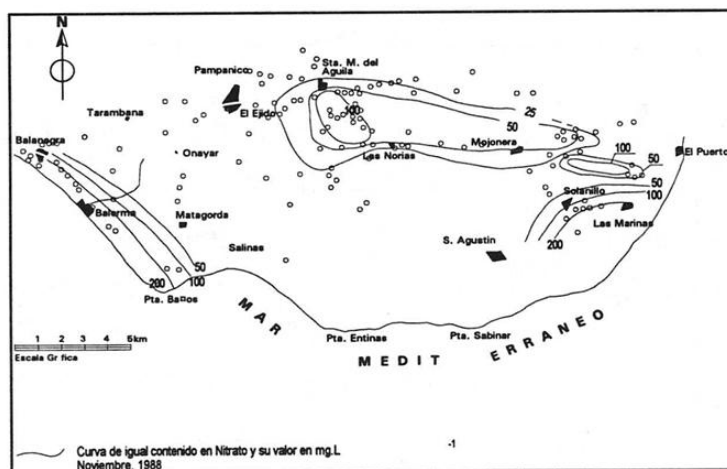


Fuente: López-Felices et al [36].

Figura 9: Ubicación del Campo de Dalías en la provincia de Almería.

El Campo de Dalías es una llanura ubicada entre la Sierra de Gádor, por el norte; y el Mar Mediterráneo, por el sur; por ende, ubicado en el mismo marco que el anterior al tratarse de acuíferos subterráneos en la cuenca del Mar Mediterráneo. De acuerdo con López-Felices et al [36], es la zona de España con mayor concentración de invernaderos, lo que supone un consumo de 168,3 hm³ de agua al año para irrigación agrícola, obtenida principalmente de recursos subterráneos.

El efecto de la intensa actividad agrícola se refleja en los acuíferos más superiores de la zona, especialmente por la existencia del ión nitrato (NO_3^-), cuya normativa ya fue explicada en el método anterior, reflejo de esto es el mapa de isolíneas desarrollado por Molina Sánchez [37] a partir de datos obtenidos en noviembre de 1988, ver Figura 10:



Fuente: Molina Sánchez [37].

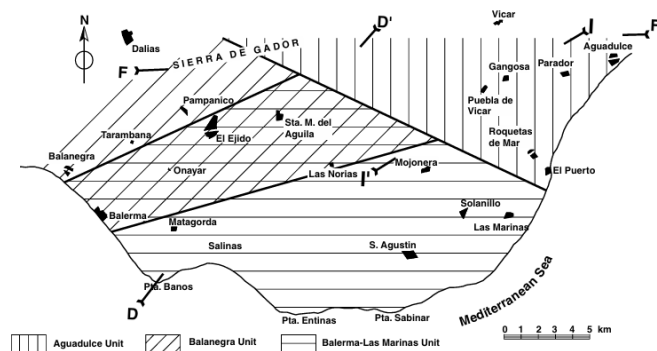
Figura 10: Mapa del acuífero Balerma-Las Marinas con curvas de igual contenido en nitrato.

Donde ya se pueden apreciar algunas zonas con valores superiores al límite establecido en la normativa europea. Por otra parte, estudios más recientes han concluido que para determinadas zonas el nitrato representa la principal fuente de contaminación [38].

Las unidades hidrogeológicas en las que se ubican en el Campo de Dalías son las siguientes:

- **Unidad de Aguadulce:** se encuentra en el extremo oriental del Campo y es la que presenta mayor complejidad geológica debido principalmente a la intercalación de capas con poca permeabilidad; esto genera una situación multicapa similar a la descrita en el apartado anterior en el Campo de Cartagena.
- **Unidad de Balanegra:** ocupa la sección occidental del Campo de Dalías, este acuífero tiene una gran parte que se introduce debajo de la unidad hidrogeológica siguiente, estando separados por una capa de margas pliocenas que las separan hidráulicamente.
- **Unidad de Balerna-Las Marinas:** ocupa la mayor parte de la llanura y sobre esta unidad se sitúa la mayor parte de los cultivos. Se compone principalmente de calcarenitas pliocenas con una potencia que varía entre los 100 metros y los 150 metros, y el sustrato impermeable lo componen margas grises pliocenas con una potencia que puede llegar a los 1 000 metros [37].

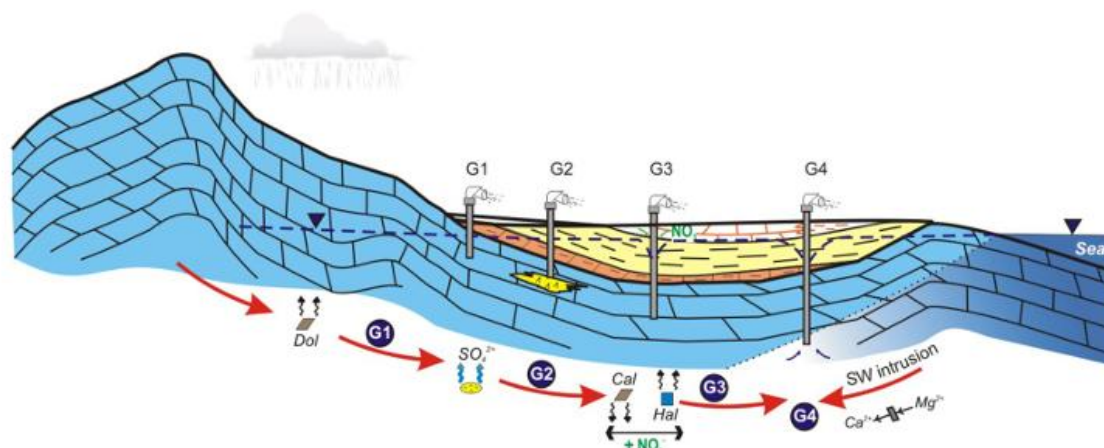
Para entender mejor la geometría de estos acuíferos se recurre a la Figura 11:



Fuente: Molina et al [39].

Figura 11: Situación y geografía de las unidades hidrogeológicas en el Campo de Dalías.

Tras el estudio de las características hidrogeológicas de las distintas unidades, se establece que el mejor acuífero para la explotación de este tipo de desaladoras sea el de Balerna-Las Marinas; lo más reseñable de este acuífero es que, en el estudio de Molina Sánchez [37], se definió que pese a que su límite más meridional sea el Mar Mediterráneo, las calcarenitas que conforman el acuífero no se ponen en contacto con este debido a una deformación que provoca que las capas de margas arenosas o de sedimentos cuaternarios ocupen toda la franja costera; sin embargo, en estudios posteriores, en este caso se toma de ejemplo el artículo de Vallejos Izquierdo et al [40], una serie de sondeos realizados en el Campo de Dalías establecieron que están afectados por el agua de mar procedente de la intrusión marina en la parte central de este acuífero, estos sondeos detectaron que las aguas de una determinada zona presentaban unos valores de cloruros, calcio y magnesio propios de la salinización de las aguas subterráneas por la intrusión marina; este estudio concluyó que dicha intrusión habría tenido lugar un afloramiento del acuífero y este su hubiera puesto en contacto con el mar, el artículo establece también que esta conexión, que se ubica en la zona de Punta de Los Baños, no tiene lugar en ninguna otra parte de la línea costera [40], ver Figura 12:



Fuente: Vallejos Izquierdo et al [40].

Figura 12: Modelo conceptual de los procesos hidrogeoquímicos reconocidos en la zona de estudio.

Para entender la composición del perfil del suelo, se recurre a la Figura 13, donde se observa la tabla obtenida también del artículo realizado por Vallejos Izquierdo et al [40]:

LITHOLOGY	AGE
Alluvial, alluvial fans...	QUATERNARY
Calcarenites	PLIOCENE
Marls	PLIOCENE
Calcarenites	MIOCENE
ALPUJARRIDE COMPLEX	
Felix Carbonates	TRIASSIC
Felix Metapelites	PERMO-TRIASSIC
Gador Carbonates	TRIASSIC
Gador Metapelites	PERMO-TRIASSIC

Fuente: Vallejos Izquierdo et al [40].

Figura 13: Tabla descriptiva de los materiales que componen el perfil hidrogeológico del Campo de Dalías.

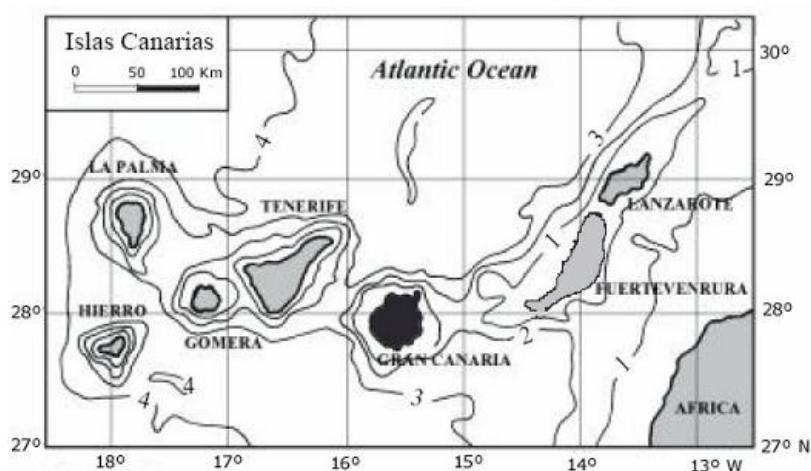
Donde los sondeos que interesan para lo comentado en el párrafo anterior son los pertenecientes al grupo 4 (G4), que se ubican en zonas donde la explotación agraria ha provocado un notable descenso del nivel piezométrico, y como se observa en la Figura 13, compuesto por materiales carbonatados [40].

En este acuífero existe una anomalía geotérmica positiva, ubicada en el centro del Campo de Dalías; se debe a la existencia del conocido como horst de Guardias Viejas, el cual se presenta como un obstáculo en la trayectoria del agua subterránea hacia el mar, provocando que esta ascienda al acuífero a una temperatura superior a la de este [39].

El municipio escogido para la realización del estudio es El Ejido; el lugar idóneo por la presencia de esta anomalía geotérmica provocada por el horst de Guardias Viejas sería al suroeste del núcleo poblacional homónimo del municipio, más concretamente, entre este y Punta de Baños. El perfil hidrogeológico quedaría compuesto en su capa más superficial por una capa de calcarenitas de 75 metros de espesor, una capa de margas de 500 metros de espesor; y, finalmente, el acuífero compuesto principalmente de calizas.

1.7 Acuífero de Gran Canaria.

La tercera y última ubicación desarrollada en este trabajo corresponde a la isla de Gran Canaria, ubicada en el archipiélago de las Islas Canarias, resaltada en el mapa de la Figura 14:



Fuente: Carrascosa Chisvert [41].

Figura 14: Situación geográfica de la isla de Gran Canaria (resaltada) en el archipiélago canario.

En este caso el marco es distinto pues la masa de agua que rodea a la isla es el Océano Atlántico, donde es destacable su montañosa orografía, llegando a 1 950 metros sobre el nivel del mar; además, el clima se caracteriza como subtropical. Por otra parte, de acuerdo con el Instituto Canario de Estadística [42], la población de la isla ascendía hasta los 875 589 habitantes, lo que supone una densidad poblacional de $561,24 \frac{\text{habitantes}}{\text{km}^2}$.

El abastecimiento a la población y el turismo, los usos agrícolas, ganaderos e industriales son los grupos principales de consumidores de agua en la isla; el incremento en las visitas debidas al turismo ha creado la necesidad del empleo de desaladoras, pues la demanda sobrepasó los recursos hídricos de la isla, las cuales emplean principalmente métodos de electrodiálisis y ósmosis inversa. En la Figura 15 se aprecia una tabla con la evolución de los consumos de agua en la isla:

	1973	1990	1999	2002	2006	2012
Urbano	26	38	43	55	62,5	68
Turístico	6	15	11,5	14	16,5	19
Agrícola	130	75	83,5	83,5	83,5	83,5
Industrial	-	2	6	7,5	8,5	9,5
Total	162	130	144	160,5	171	180

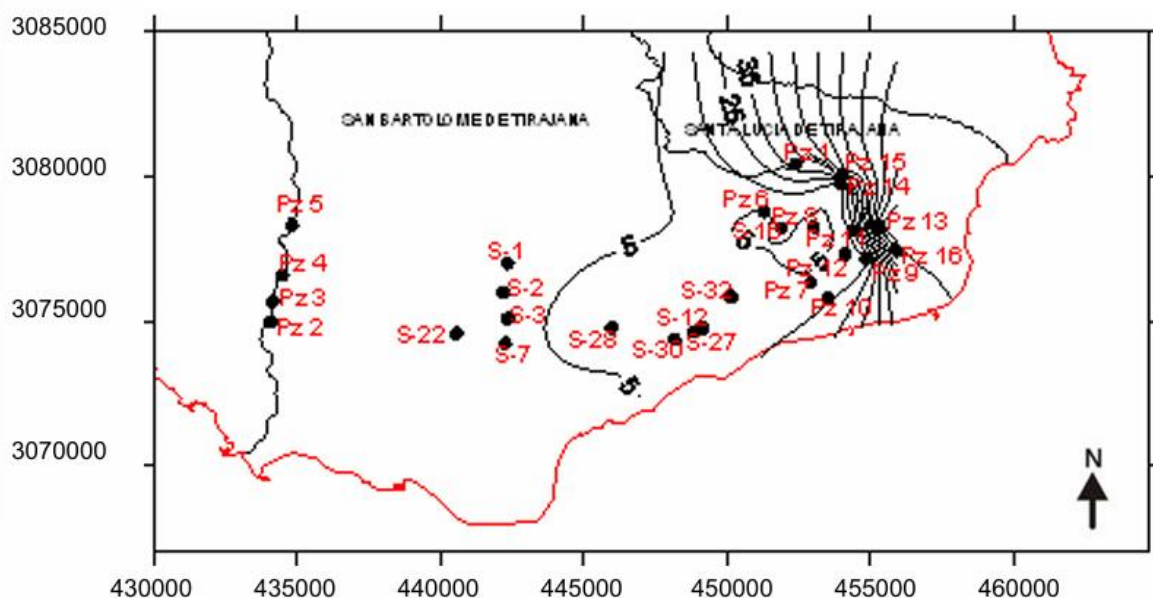
Fuente: Carrascosa Chisvert [41].

Figura 15: Evolución del consumo, en hm^3 al año, de agua en Gran Canaria.

Donde se aprecia claramente el cambio de tendencia, primero en el aumento global del consumo de agua, más concretamente se observa que salvo el sector agrícola, que se ha mantenido constante en las últimas décadas, en el resto de sectores se aprecia un aumento,

especialmente en los ámbitos urbanos y turísticos, donde el consumo aumentó un 161,54 % y un 216,67 %, respectivamente [41].

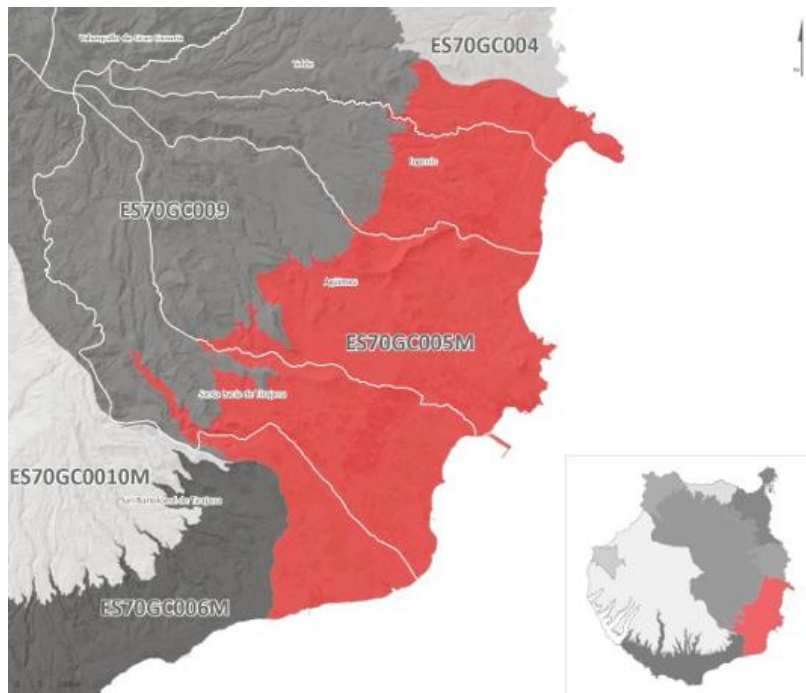
Desde la conquista, hace 500 años, la economía canaria ha destacado por su alto grado de especialización y falta de independencia. Hasta la década de 1960, esta giró en torno a la agricultura, especialmente los monocultivos, desde entonces el sector servicios cobró más importancia, donde se destaca el turismo como actividad más representativa pues el número de visitantes que llegan a las islas es de más de 230 000 $\frac{\text{personas}}{\text{día}}$ [43]. En zonas de explotación agrícola se han detectado, como en las otras ubicaciones, altos niveles de nitratos, especialmente en la desembocadura del barranco de Tirajana, donde se pasó de una concentración media de 55 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$ en 1994, a los 114 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$ en 2007, ver Figura 16:



Fuente: Carrascosa Chisvert [41].

Figura 16: Mapa de isótopos de nitratos ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$) y ubicación de los pozos y sondeos del área de estudio en el año 2004.

Gran Canaria, como todas las demás islas Canarias, tiene origen volcánico; y la construcción de su edificio geológico se divide en cuatro episodios volcánicos separados entre sí por episodios de intensa erosión [44]. El conocimiento de este hecho es necesario para entender la composición del subsuelo grancanario. En esta isla se pueda hablar de la existencia de un único acuífero, con una superficie piezométrica máxima ubicada en la zona central, la división de las distintas masas de agua subterráneas vendrá determinada por diferentes criterios; el presente proyecto se lleva a cabo en las zonas mencionadas previamente obtenidas del trabajo de Carrascosa Chisvert [41], estas ubicaciones, de acuerdo con el Plan Hidrológico de la demarcación hidrográfica de Gran Canaria realizado en el año 2024 [45], pertenecen principalmente a la masa de agua conocida como ver Figura 17:

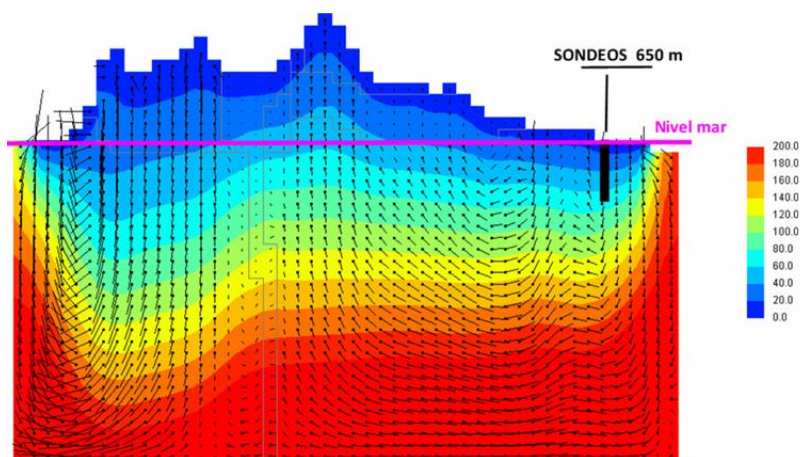


Fuente: Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria [45].

Figura 17: Ubicación de la masa de agua estudiada (ES70GC005M) en la Isla de Gran Canaria.

De acuerdo con el plan hidrológico previamente mencionado, esta masa de agua se ve afectada por la intrusión marina, especialmente en zonas costeras, que viene causada por la extracción para agricultura y abastecimiento [45]. Presentando de nuevo las mismas características que en los anteriores acuíferos afectados por el agua salada: acuífero conectado hidráulicamente con el mar y con alta explotación.

Otro aspecto de interés en esta zona es la realización en el año 1981 de dos sondeos geotérmicos realizados en Agüimes y el Barranco Las Palmas, ambos ubicados en la superficie correspondiente a la masa de agua en estudio. Los resultados de los sondeos arrojaron 66 °C en Agüimes a una profundidad de 648 metros; y 64 °C en Barranco Las Palmas, para una profundidad de 670 m. Estas anomalías se explican por los altos gradientes hidráulicos radiales que presenta la isla desde sus cumbres en la zona central hasta el mar, lo que provoca que la infiltración profunda circule por una capa de basaltos antiguos, donde el agua se calienta hasta estas temperaturas gracias a un gradiente geotérmico normal; sin embargo, este flujo se ve obligado a salir al mar en la interfase con la intrusión marina, provocando la convergencia entre las líneas de flujo profundo y a mayor temperatura, con las menos profundas, a menor temperatura [46]. Estos resultados se aprecian en la Figura 18:



Fuente: de la Noceda y Beltrán [46].

Figura 18: Resultados de la simulación mediante el uso del código HYDROTHERM de las isothermas y los vectores de flujo en estado estacionario.

Donde se aprecia el resultado de las simulaciones de la aplicación del código HYDROTHERM del USGS en el perfil de la isla, este combina las de flujo de agua con las de transmisión de calor para su combinación con los perfiles magnetotelúricos del suelo grancanario por donde pasan los sondeos, de la Noceda y Beltrán [46] destacan que estos resultados coinciden con los obtenidos en la perforación.

El sondeo estaría ubicado en el municipio de Santa Lucía de Tirajana, concretamente en los alrededores de la localidad de Vecindario, donde la Red de Control del acuífero de Gran Canaria, operada por el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria [47], establece la profundidad del nivel freático del acuífero en 113,6 metros por debajo de la superficie. Esto correspondería a una capa de depósitos aluviales cuaternarios, y el acuífero estaría compuesto por basaltos cuaternarios [45].

2.- OBJETIVOS.

Este trabajo se centra en el aprovechamiento de los acuíferos costeros afectados por el agua de mar debida a la intrusión marina, con la intención de mejorar la eficiencia energética de desaladoras que utilicen un sistema de destilación multiefecto, es decir, que sea necesario calentar el agua hasta los 70 °C para conseguir su potabilización. Esta mejora se pretende conseguir gracias a obtener la materia prima para este proceso, el agua salada, en condiciones térmicas mejores a las encontradas en la superficie.

Con este objetivo, se han estudiado distintos parámetros socioeconómicos, geológicos e hidráulicos, entre otros, en tres ubicaciones diferentes para obtener el mayor conocimiento del subsuelo y los motivos que causan la contaminación y la intrusión marina. Estas ubicaciones son Los Alcázares, Región de Murcia; El Ejido, provincia de Almería; y la isla de Gran Canaria, en la provincia de Las Palmas. Estas zonas destacan por tener en común una gran necesidad de agua dulce, por distintos motivos, que les ha obligado a recurrir a los acuíferos subterráneos con la consecuente sobreexplotación, lo que ha conllevado su deterioro.

El desarrollo de este proyecto consiste en la creación de un programa, mediante el software MATLAB, en su versión R2025a, con el cual obtener la cantidad de energía que se puede extraer del agua mineral salada en el subsuelo poroso. Para llegar a este resultado, el programa deberá calcular previamente la interfaz dulce-salada en el acuífero, el perfil de temperaturas del suelo, la longitud necesaria en la zona de admisión del sondeo y las pérdidas de calor a lo largo de la tubería.

La implantación de este tipo de sondeos busca también mejorar la calidad de las aguas de los acuíferos, principalmente extrayendo el agua mineral salada, y también mediante el estudio de la viabilidad de la instalación de una desaladora híbrida que reduzca las necesidades de extracción de los acuíferos.

A lo largo del trabajo se establecerá cuál es la información del terreno necesaria para que el programa se desarrolle con normalidad, una vez el modelo se ejecute, revelará cuantitativamente la temperatura de extracción del agua mineral salada y con esta calcula el porcentaje de ahorro mensual de agua y hará un cálculo aproximado de la profundidad del sondeo.

3.- METODOLOGÍA.

El programa realizado a través del software MATLAB R2025a consta de una serie de líneas de código con distintas secciones, algunas de estas elaboradas con modelos matemáticos, que logran el objetivo mencionado en el párrafo anterior.

Para ahorrar en el tamaño del código, se desarrolla previamente una hoja de Excel, las hojas empleadas en este proyecto se encuentran en el ANEXO III: Fichas Excel utilizadas con la información de cada ubicación. en la que se dispongan ciertos datos característicos de la ubicación en el siguiente formato; los primeros van a ser en forma de vector, para realizar el perfil del suelo, ver Tabla 2:

Tabla 2: Formato de los parámetros que respectan al perfil del suelo en el libro de Excel.

Capa [-]	Profundidad [m]	Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
----------	-----------------	--

El programa está diseñado para desarrollarse en un suelo con varios números de capas, por lo que amplía su uso. Los siguientes datos se facilitan en forma de números escalares, ver Tabla 3:

Tabla 3: Formato de los parámetros que respectan a las diferentes propiedades del acuífero.

Conductividad Térmica $\left[\frac{W}{mK}\right]$	Conductividad Hidráulica $\left[\frac{m}{d}\right]$	Transmisividad Hidráulica $\left[\frac{m^2}{d}\right]$	Coefficiente de almacenamiento Hidráulico [-]	Flujo base del acuífero $\left[\frac{m^2}{d}\right]$
---	---	--	---	--

Estos parámetros son necesarios para la realización de los diversos cálculos en el software, es necesario que se inserten los datos de la temperatura media mensual del mar en la zona en forma de vector, ver Tabla 4:

Tabla 4: Formato de los parámetros de temperatura media mensual del mar.

Mes	Temperatura [°C]
-----	------------------

Finalmente, se aportan los datos en forma de número escalar correspondientes a la temperatura del recurso, la distancia desde la ubicación del sondeo a la costa y la longitud de esta, ver Tabla 5:

Tabla 5: Formato de los parámetros de ubicación del sondeo.

Temperatura del recurso [°C]	Distancia a costa [m]	Ancho de la costa [m]	Profundidad del recurso [m]
------------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------------

En las siguientes líneas de código se calcula la intrusión marina siguiendo la ecuación de Glover explicada previamente, en este caso el caudal utilizado, Q , está representado en la siguiente ecuación:

$$Q = Q_0 - Q_d + Q_s$$

Donde Q_0 representa el caudal característico del acuífero entre la longitud de la costa, Q_d representa la extracción del agua dulce del acuífero y Q_s la extracción de agua salada de la

intrusión marina; todas en unidades de $\left[\frac{m^2}{d}\right]$. El código de signos se representa de esta forma, pues el bombeo de agua dulce supone un descenso en el caudal que llega finalmente al mar, mientras que el bombeo salado hace retroceder la intrusión marina.

Posterior a esto, se realizan los cálculos para obtener el avance del frente de la intrusión marina y se representan para observar el efecto de las extracciones con el objetivo de un mejor entendimiento de los resultados, posterior a esto se establece la longitud del sondeo como la suma de la profundidad de la intrusión marina, la longitud de pantalla necesaria y el retroceso del frente salino en el tiempo de estudio para evitar, por una parte, la entrada de agua salada al acuífero dulce y por otra que la desaladora pierda eficacia.

Se calculan los parámetros necesarios en conformidad con la Ley de Darcy, explicada previamente, para obtener el espesor necesario para abastecer la demanda de agua, siguiendo la fórmula:

$$Q = -K A \left(\frac{dh}{dl}\right)$$

Donde Q representa el caudal a extraer, en $\frac{m^3}{s}$; K la conductividad hidráulica, en $\frac{m}{s}$; A la sección por la que pasa el agua, en m^2 ; dh representa la diferencia entre los niveles piezométricos, y dl la distancia entre el pozo y el límite establecido de influencia [17].

Se recurre a la bibliografía y se establece que la velocidad de entrada a la pantalla de captación debe ser menor a los $0,6 \frac{m}{s}$ para evitar el malfuncionamiento, para ello se establece este valor en $0,06 \frac{m}{s}$. Para evitar la entrada de partículas no deseadas a la bomba que puedan disminuir su vida útil, en la zona de admisión se instalan unas rejillas con un 20 % de superficie libre para asegurar el buen funcionamiento del bombeo [48], [49]. La fórmula para obtener la longitud de entrada es:

$$v_{entrada} = \frac{Q_{ext}}{A\phi}$$

Donde $v_{entrada}$ es la velocidad previamente mencionada, en $\frac{m}{s}$; Q_{ext} es el caudal de extracción del sondeo, en $\frac{m^3}{s}$; y ϕ el factor correspondiente a la superficie de las rejillas. Por su parte, A representa la superficie lateral del cilindro, en m^2 :

$$A = 2\pi r L$$

El objetivo será obtener la longitud, L, en metros.

El siguiente paso fue definir el perfil de suelo a estudiar, para ello se toma una sección cuadrada con el ancho y el largo iguales a la longitud del sondeo, se define el perfil en función de las distintas conductividades térmicas y se establece un gradiente geotérmico en función de la zona, para hacerlo se toma como referencia el procedimiento llevado a cabo por Li et al [24], que realizan un discretización de la ecuación de conducción de calor siguiente:

$$\frac{1}{a_k} \frac{\delta t}{\delta \tau} = \frac{1}{r} \left(r \frac{\delta}{\delta r} \right) + \frac{\delta t^2}{\delta z^2}$$

Donde a_k es la difusividad térmica en, $\frac{m^2}{s}$; t representa la temperatura, en °C; τ ; el tiempo, en segundos; y y z representan las longitudes radial y vertical, respectivamente, ambas en metros. La discretización se desarrolló con el siguiente esquema, ver Figura 19:

$$\begin{cases} -B_r t_{i-1,j}^{n+1/2} + (1 + 2B_r) t_{i,j}^{n+1/2} - B_r t_{i+1,j}^{n+1/2} = B_z t_{i,j-1}^n + (1 - 2B_z) t_{i,j}^n + B_z t_{i,j+1}^n \\ -B_z t_{i,j-1}^{n+1} + (1 + 2B_z) t_{i,j}^{n+1} - B_z t_{i,j+1}^{n+1} = B_r t_{i-1,j}^{n+1/2} + (1 - 2B_r) t_{i,j}^{n+1/2} + B_r t_{i+1,j}^{n+1/2} \\ B_r = \frac{a_k \Delta \tau}{(r_i \Delta \sigma)^2}, B_z = \frac{a_k \Delta \tau}{(\Delta z)^2}, k = 1, 2, 3, 4 \end{cases}$$

Fuente: Li et al [24].

Figura 19: Discretización de la ecuación de difusión de calor.

Dicha discretización emplea, como se puede observar, un esquema ADI (Direcciones Alternas Implícitas), en el que divide el paso en dos subetapas resolviendo en una dirección implícitamente y en la otra explícitamente primero, y luego al revés. Una vez obtenido este mapa de temperaturas, se utilizan los valores de todas las filas del punto que representa la columna media de toda la matriz, que se establecerá como la ubicación del sondeo [24].

En cuanto a la pérdida de temperatura en el pozo, el modelo corresponde a la transmisión de calor en el fluido en una dimensión, considerando la pérdida de calor con dos componentes: uno advectivo, en el que se tiene en cuenta la velocidad de fluido y el transporte energético que supone; y otro término que calcula el intercambio de calor con el suelo mediante una resistencia.

La ecuación del balance energético quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} + v \frac{\delta t}{\delta z} = \frac{1}{C_f R_{suelo}} (t_{suelo} - t_{fluido})$$

Donde el término advectivo es $v \frac{\delta t}{\delta z}$ y el intercambio con el suelo se representa a la derecha de la igualdad [50], v representa la velocidad del fluido, en $\frac{m}{s}$; C_f la capacidad calorífica volumétrica del fluido, en $\frac{J}{mK}$; finalmente, R_{suelo} representa la suma de las resistencias térmicas presentes, en $\frac{mK}{W}$.

Para entender la pérdida de calor se recurre a la Ley de Fourier para medios isótropos, la cual establece que para que el calor se transmita es necesario que exista un gradiente de temperaturas; y la energía transmitida por unidad de superficie y tiempo, lo que se conoce como densidad de flujo térmico, es directamente proporcional a dicho gradiente. Las resistencias térmicas existentes representan las pérdidas por la convección del agua dentro de la tubería:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_i 2\pi r_{in}}$$

Donde r_{in} es el radio interior de la tubería, en metros; y h_i el coeficiente de convección, en $\frac{W}{m^2K}$; en este caso se obtiene conociendo previamente los valores del número de Reynolds, número de Prandtl y el número de Nusselt, parámetros adimensionales que se obtienen gracias a las

características del fluido. Por otra parte, encontramos los términos conductivos de la resistencia, que se calcularán con la siguiente expresión:

$$R_{cond} = \frac{\log\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)}{2\pi k}$$

Donde r_{in} y r_{out} representan en metros el radio hasta el interior y exterior del elemento a estudiar, respectivamente; y k representa la conductividad térmica del material, $\frac{W}{mK}$ [24] [51].

Para el cálculo del equipo de bombeo se utilizan los valores previamente calculados en el programa, al ser un cálculo sencillo con intención de hacerse una idea de la potencia eléctrica necesaria en el bombeo. Esta quedará definida gracias a la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{\rho g Q H}{\eta_e}$$

Donde P_e es la potencia eléctrica, en kW; ρ la densidad del agua salada, en $\frac{kg}{m^3}$; g la gravedad, en $\frac{m}{s^2}$; Q el caudal volumétrico, en $\frac{m^3}{s}$; H el resultado de sumar la altura geométrica, las pérdidas estimadas en la tubería y un factor de seguridad, en metros; y η_e es el rendimiento eléctrico. Este rendimiento se estima en el 70 % [52]. Para conocer las pérdidas, se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_{pérdidas} = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

Donde L y D son la longitud y el diámetro interno de la tubería, respectivamente, en metros; v la velocidad del flujo, en $\frac{m}{s}$; f es el factor de fricción y es un parámetro adimensional y g nuevamente la gravedad. El factor de pérdidas f se calcula para tuberías lisas con flujo turbulento, con la siguiente ecuación:

$$f = 0,316 Re^{-0,25}$$

Los valores de referencia y ecuaciones para estos cálculos han sido tomados de la bibliografía [25],[53],[52].

Finalmente, y siguiendo lo establecido en la sección de objetivos, se procede a calcular el ahorro energético que supone la utilización de este método en contraposición al método convencional de desalación, el cual corresponde en este trabajo a la obtención del agua salada directamente de la superficie del mar. Para calcular esta mejora, se emplea la fórmula de transmisión de calor, que en este caso aplica para el calentamiento de un fluido [54]:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

Donde \dot{Q} es el calor, en Watios, que representa la cantidad de calor transferida por segundo; \dot{m} es el caudal másico del fluido, en $\frac{kg}{s}$; c_p el calor específico del mismo, en $\frac{J}{kgK}$; y ΔT la diferencia de temperatura entre el estado final e inicial, en Kelvin.

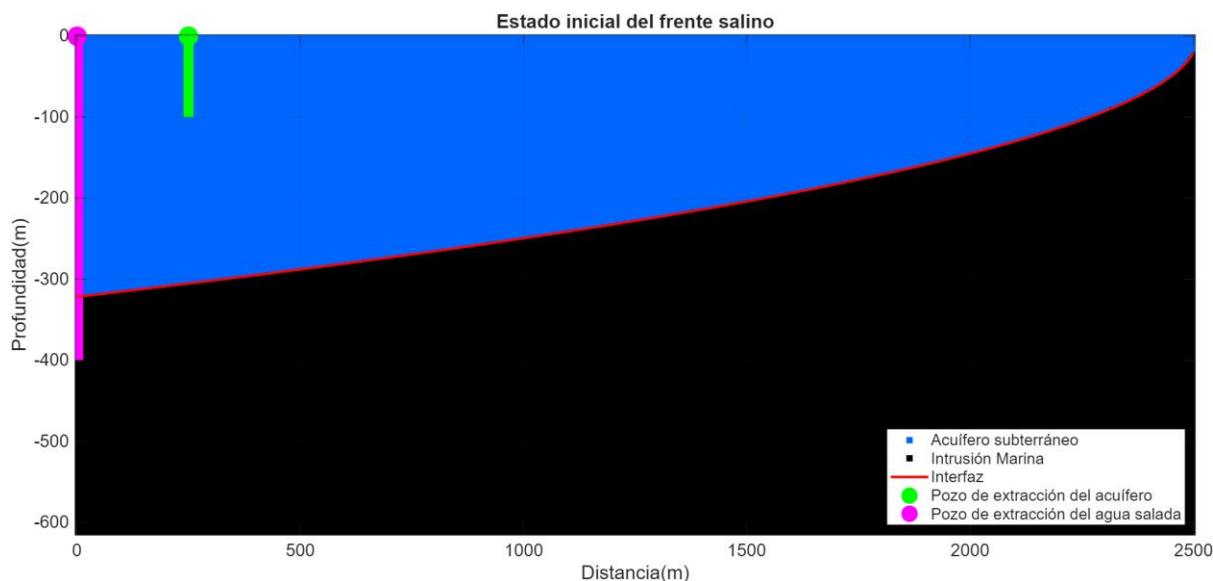
Esta ecuación representa el calor que hay que aportar al caudal de agua extraído para alcanzar los 70 °C que requiere la destilación multiefecto. Para comparar los resultados se tuvo en cuenta la variación de la temperatura de la superficie del mar a lo largo de los años; en este caso se obtuvieron los datos de la Red Exterior de boyas de Puertos del Estado [55] para el año 2022, pues era el último año completo en las tres ubicaciones seleccionadas.

3.1 Validación del modelo

Este apartado es clave en el desarrollo del trabajo, pues sin una adecuada validación, el modelo carecería de credibilidad; para ello, se ha dividido la validación en los módulos físicos descritos al principio de este capítulo para analizar debidamente cada uno de ellos y, posteriormente, todos en su conjunto.

Se parte de la base del trabajo de Todd y Mays [56] que establecía lo siguiente, de acuerdo con Cherry y Freeze [15]: “ Todd (1959) resume cinco métodos que se han considerado para controlar la intrusión marina: (1) reducción o reordenamiento del esquema de bombeo de aguas subterráneas, (2) recarga artificial del acuífero con intrusión marina en cuencas extendidas o pozos de recarga”; además de tener en cuenta que la extracción continuada del agua de la intrusión marina provoca, en los pozos de extracción de agua dulce que previamente presentaban altos niveles de salinidad, un descenso de esta, aumentando la calidad del agua; esto se explica principalmente a que este bombeo causa una barrera hidráulica que evita que el agua salada afecte a los pozos de producción [57], esto se va a entender en el presente trabajo como un retroceso del frente mineral salado.

El caso inicial responde a un flujo de agua que va del acuífero hasta el mar de $0,408 \frac{m^3}{s}$ y con nula extracción tanto de agua dulce como salada, el estado inicial se ve en la Figura 20, recordando la Figura 2, el acuífero de agua dulce está representado por la superficie azul, la intrusión marina por la superficie negra y el interfaz entre ambos, la línea roja; por lo tanto, la figura representa el perfil del suelo entre las distancia 0 metros y 2500 metros en el eje X, que representa la ubicación del sondeo y la costa, respectivamente; por su parte el eje Y representa la profundidad desde el nivel del mar en 0 metros hasta los más de 600 metros:

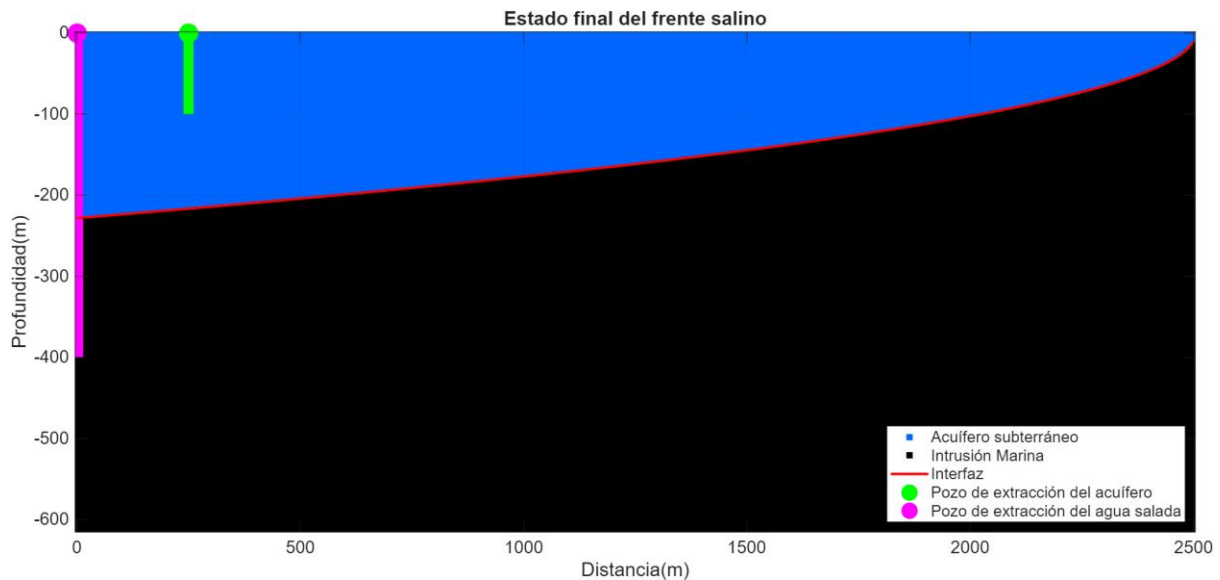


Fuente: Propia.

Figura 20: Estado inicial del caso base del modelo de la intrusión marina.

Además, las líneas rosa y verde en la parte superior izquierda son la ubicación del pozo de extracción del agua mineral salada y del acuífero, respectivamente. En esta primera figura, y en las dos siguientes, dichos pozos de extracción se han representado con una longitud constante de 400 metros para el de extracción de agua mineral salada y 100 metros para el de extracción del acuífero para que se entienda mejor la variación en la interfaz dulce-salada.

Si variamos la extracción de agua dulce, y la aumentamos hasta $0,2 \frac{m^3}{s}$, el estado inicial seguirá siendo el mismo, mientras que el estado final tras 1 año de simulación será el que se ve en Figura 21:

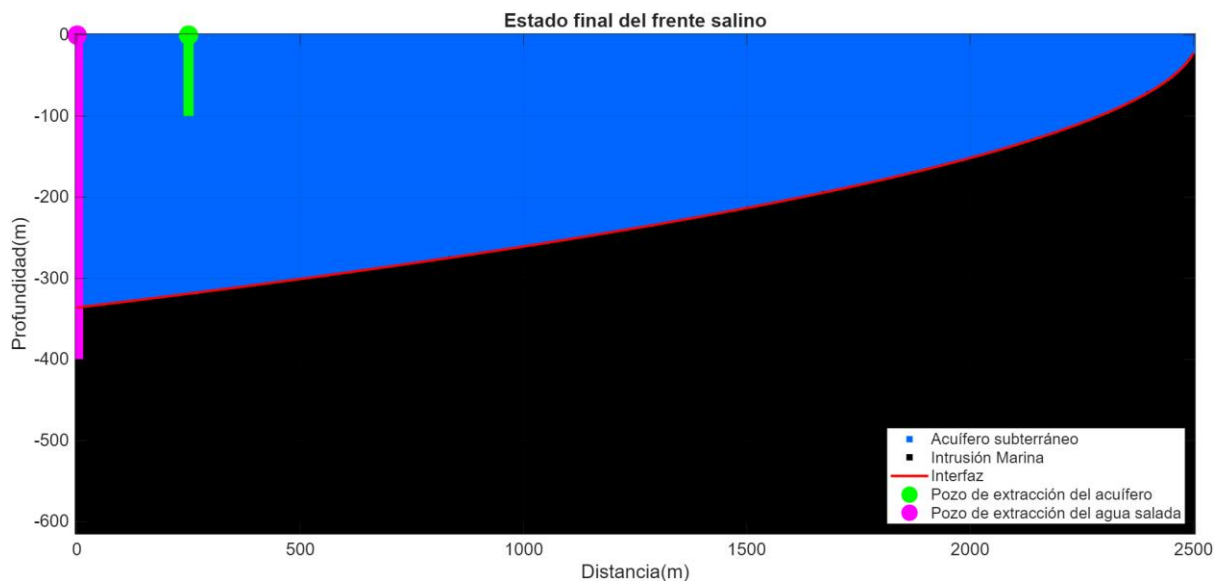


Fuente: Propia.

Figura 21: Estado final del caso de extracción de agua dulce en el modelo de la intrusión marina.

Donde se aprecia un avance de la intrusión marina, concretamente, aumentó 82,58 metros en la vertical de la extracción de agua salada; esto responde al comportamiento esperado como consecuencia de la extracción.

Finalmente, dejando nuevamente la extracción de agua dulce en valor nulo y aumentando la extracción de agua salada a $0,02 \frac{m^3}{s}$, se observa en Figura 22 la evolución de la cuña de agua salada en este caso:



Fuente: Propia.

Figura 22: Estado final del caso de extracción de agua salada en el modelo de la intrusión marina.

De donde se obtiene que tras la simulación anual la altura de la intrusión desciende en la ubicación de la vertical del pozo de extracción de agua mineral salada es de 14,57 metros, resultado esperado de acuerdo con lo establecido.

Los resultados presentados por el modelo se consideran válidos al evolucionar de la forma esperada, de acuerdo con lo establecido en el apartado anterior; por lo tanto, estamos ante un modelo fiable. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones al representar únicamente una extracción de cada tipo y no considerar diversas entradas o salidas de este acuífero. Se consideran estos resultados desde una perspectiva cualitativa.

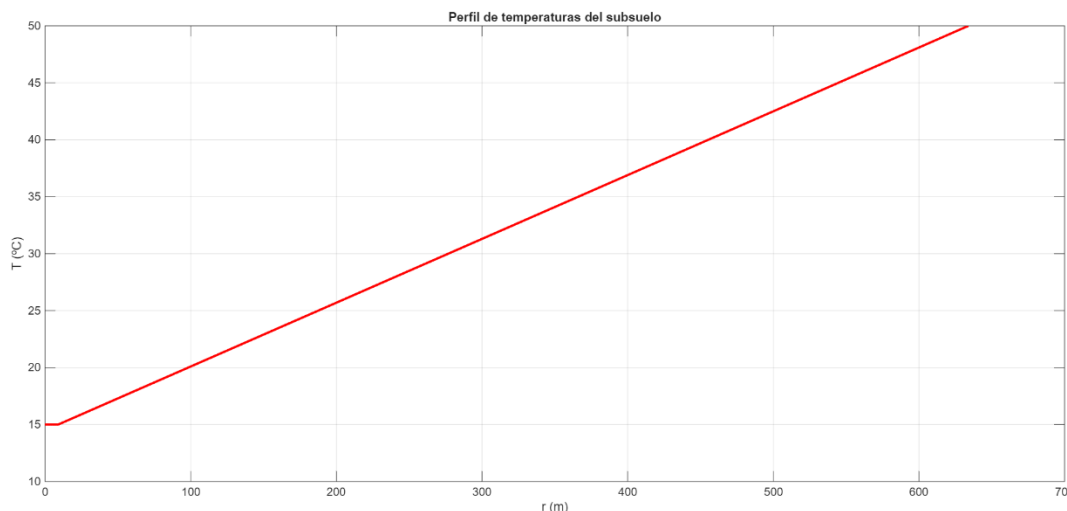
El modelo de difusión de calor empleado para crear el perfil axisimétrico de temperaturas en el suelo se desarrolló en el apartado anterior, en ella el único parámetro que se obtiene en función de las características del subsuelo es la difusividad térmica (α); sin embargo, este parámetro no tiene influencia en el estado estacionario, pues para $\frac{\delta t}{\delta z} = 0$, α no influye en los cambios en de temperatura en el perfil estacionario, sino en el tiempo que tarda cada capa a llegar a la temperatura.

Para demostrarlo, se lleva a cabo una prueba en el software desarrollado en el que se toman determinados datos de ejemplo para un perfil teórico del suelo, ver Tabla 6:

Tabla 6: Datos geológicos utilizados para la validación del modelo del perfil térmico del suelo.

Capa	Profundidad [m]	Difusividad [$\frac{m^2}{s}$]
1	114	$2,86 \times 10^{-7}$
2	614	$7,5 \times 10^{-7}$

Al insertar estos datos, el modelo genera un perfil de temperaturas con la información de la intrusión marina obtenida de la sección de código anterior, generando el siguiente perfil de temperaturas visible en la Figura 23:



Fuente: Propia.

Figura 23: Representación del perfil térmico del subsuelo.

Donde se aprecia una evolución lineal con la profundidad causada por el gradiente geotérmico establecido, la continuidad de esta línea demuestra que la discretización utilizada es consistente, y la nula variación de las pendientes implica que ya se encuentra en estado estacionario y la difusividad ha dejado de hacer efecto.

Finalmente, para validar el modelo correspondiente a la pérdida de calor en la tubería se recurre a un análisis de sensibilidad donde los parámetros independientes considerados van a ser la conductividad térmica de la tubería (k_{tub}), para observar cómo afectar a la resistencia térmica de la misma y, consecuentemente, a la variación de temperatura; y por otro lado el caudal de entrada del agua mineral salada, pues la resistencia por convección depende de este; comprobando de esta manera también como afecta la disminución de velocidad al término advectivo de la tubería. Establecemos los valores iniciales de acuerdo con la Tabla 7:

Tabla 7: Valores iniciales para comprobar el modelo de la pérdida de calor en la tubería.

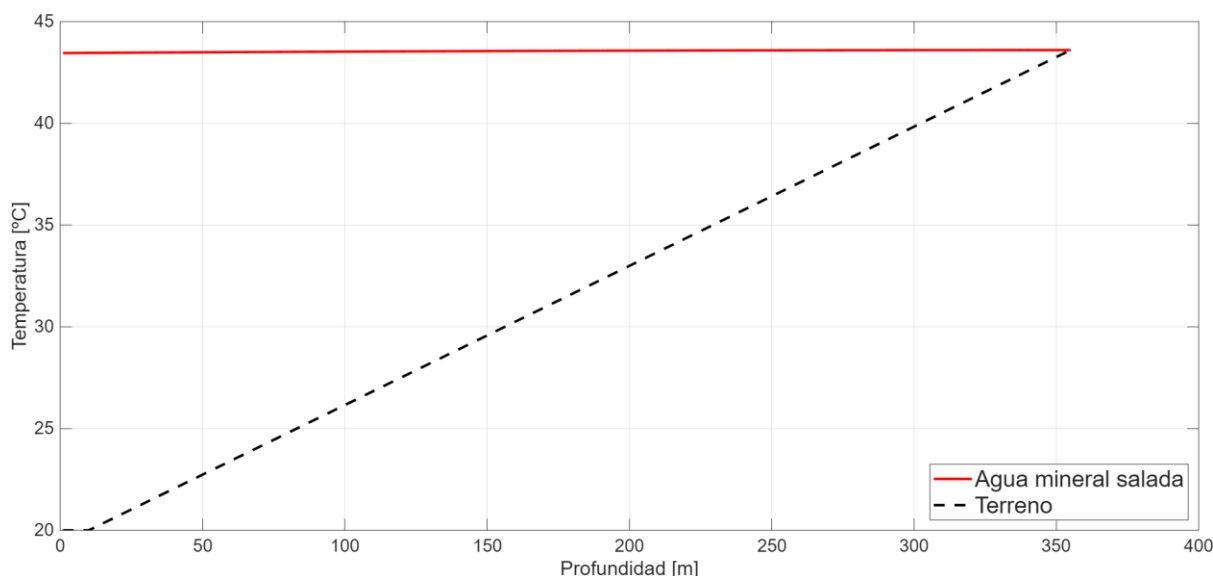
Parámetro	Valor [Unidades]
Conductividad térmica de la tubería	52 [$\frac{W}{mK}$]
Caudal volumétrico	20 [$\frac{l}{s}$]

Los parámetros dependientes que van a ser analizados para entender el comportamiento del modelo serán la resistencia térmica por conducción de la tubería (R_{tub}), la resistencia térmica por convección del agua mineral salada (R_{conv}) y su temperatura de extracción, los cuales, para el caso inicial establecido en la tabla anterior, dan el resultado que se puede apreciar en la Tabla 8:

Tabla 8: Resultado de las variables dependientes en el caso inicial.

Parámetro	Valor [Unidades]
R_{tub}	$1,67 \times 10^{-4}$ [$\frac{mK}{W}$]
R_{conv}	0,002 [$\frac{mK}{W}$]
Temperatura de extracción	43,45 [$^{\circ}C$]

Para apreciar mejor la evolución de la temperatura se recurre a la Figura 24:



Fuente: Propia.

Figura 24: Evolución de la temperatura del agua mineral salada (en rojo) para el caso inicial a lo largo de la extracción en la tubería en comparación con la temperatura del terreno (en negro).

Donde se puede ver que el descenso de temperaturas es mínimo, concretamente de 0,15 °C, lo que se debe principalmente a la gran resistencia térmica que supone la infraestructura del sondeo, y el rápido avance del flujo a través de la tubería, que con una velocidad de $0,13 \frac{m}{s}$ evita que el término advectivo afecte notablemente.

Si, por ejemplo, disminuimos notablemente la conductividad de la tubería alcanzando los $0,05 \frac{W}{mK}$ y manteniendo constante el caudal, con el objetivo de analizar los resultados cambiando la resistencia por conducción, obtenemos los siguientes resultados para las variables dependientes del análisis, ver Tabla 9:

Tabla 9: Resultado de las variables dependientes en caso de variar la conductividad térmica de la tubería.

Parámetro	Valor [Unidades]
R_{tub}	0,174 $[\frac{mK}{W}]$
R_{conv}	0,002 $[\frac{mK}{W}]$
Temperatura de extracción	43,5 [°C]

En este caso se observa que una disminución en la conductividad de la tubería supone un aumento en la resistencia térmica asociada a esta; además de un menor descenso de la temperatura, explicado por el mejor aislamiento que proporciona la tubería. La escasa variación entre los resultados de este cambio y los iniciales hace que no sea necesario insertar una figura para su mejor apreciación.

Ahora, si dejamos la conductividad con su valor inicial y disminuimos el caudal volumétrico hasta los $2 \frac{l}{s}$, el resultado de las variables dependientes queda reflejado en la siguiente tabla, ver Tabla 10:

Tabla 10: Resultado de las variables dependientes en caso de variar el caudal de extracción.

Parámetro	Valor [Unidades]
R_{tub}	0,174 [$\frac{mK}{W}$]
R_{conv}	0,0129 [$\frac{mK}{W}$]
Temperatura de extracción	40,44 [°C]

Donde se aprecia que una disminución en el caudal de entrada del agua mineral salada implica un aumento de la resistencia térmica por convección; sin embargo, la temperatura es menor que en el caso anterior, esto ocurre por el menor caudal implica un descenso de la velocidad del agua dentro de la tubería hasta los $0,013 \frac{m}{s}$, lo que provoca un mayor tiempo de residencia y, por lo tanto, una mayor importancia del término advectivo del balance térmico.

En este caso, la variación se aprecia ligeramente en la Figura 25:

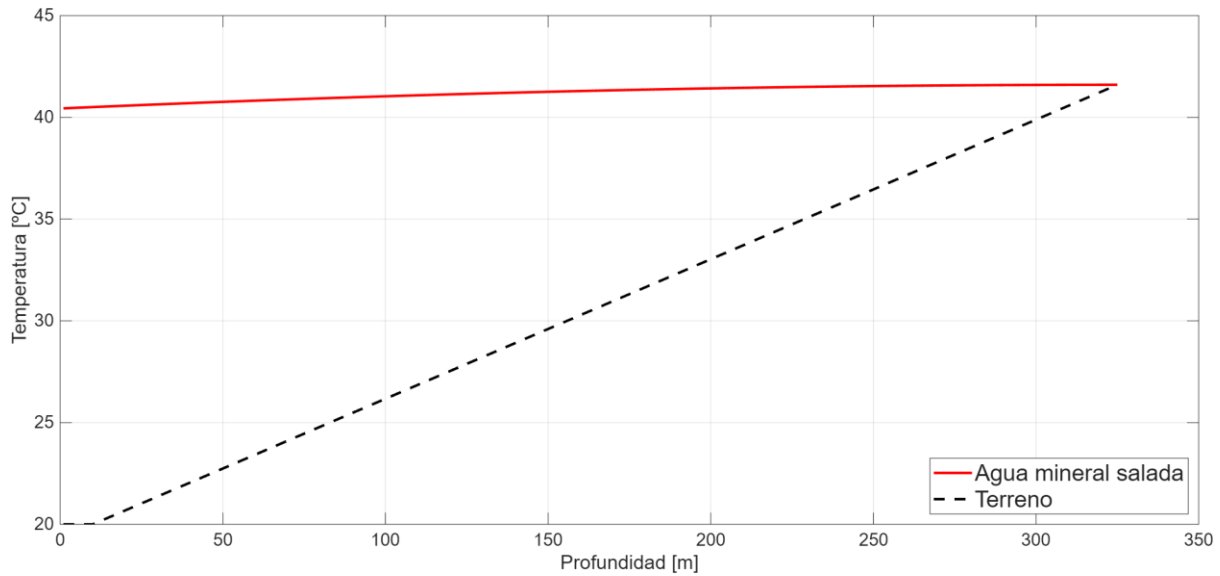


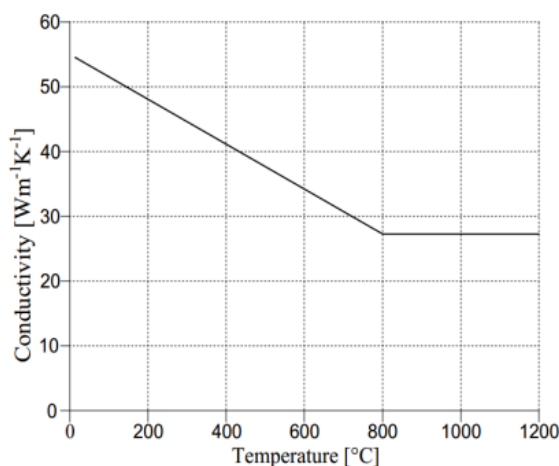
Figura 25: Evolución de la temperatura del agua mineral salada (en rojo) frente a la variación del caudal extraído a lo largo de la tubería en comparación con la temperatura del terreno (en negro).

Como las alteraciones en las variables independientes afectan a las establecidas como variables dependientes en este análisis de sensibilidad, tal y como se esperaba, el modelo de la pérdida de calor en la tubería se considera válido [58].

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Para el cálculo de lo establecido en este trabajo se va a emplear como venía siendo anunciado, el código de MATLAB, adjunto en el Anexo I, para ello es necesario definir el caso en el que se está trabajando. En este caso se utilizan los valores adecuados para la extracción de $20 \frac{l}{s}$.

Más adelante, se modela la resistencia térmica de la infraestructura del sondeo y el subsuelo influyente, para conocer la conductividad térmica de la tubería se recurre a la gráfica en la Figura 26:



Fuente: Domański y Kmiciek [59].

Figura 26: Conductividad térmica del acero al carbón según la norma UNE-EN 1993-1-2:2011 [60].

De donde se obtiene el valor utilizado para el presente caso, $52 \frac{W}{mK}$. Para la conductividad térmica del agua mineral salada se ha tomado $0,61 \frac{W}{mK}$ [61], pues es el valor alrededor del que oscila la salinidad a 30 °C. Estos valores se aprecian en la Tabla 11:

Tabla 11: Valores aplicados al software para el cálculo de las pérdidas térmicas.

Elemento	Radio [m]	Conductividad $\left[\frac{W}{mK}\right]$
Agua mineral salada	0,2225	0,61
Tubería	0,235	52
Cementación	0,285	0,6

Aplicando estos valores a las fórmulas establecidas previamente se obtiene la resistencia térmica total que supone el sondeo, ver Tabla 12:

Tabla 12: Resistencia térmica de los elementos empleados en el sondeo.

Resistencia térmica $[\frac{mK}{W}]$	
Convectiva	0,002
Conductiva tubería	$1,673 \times 10^{-4}$
Conductiva cementación	0,0512
Total	0,05337

Donde se aprecia la gran influencia de la resistencia térmica que supone la cementación, debido a su baja conductividad y gran grosor. En esta tabla falta el valor de la resistencia térmica correspondiente a los materiales del subsuelo, que son diferentes para cada caso.

4.1 Resultados para el Campo de Cartagena.

Primero se habla de la composición del terreno y los parámetros que se necesitan para el cálculo del perfil. En este caso son necesarios los datos acerca de la conductividad y difusividad térmica de los materiales, para ello se desarrolla la Tabla 13:

Tabla 13: Valores empleados en el modelo de conductividad y difusividad térmica para las distintas capas del subsuelo del Campo de Cartagena.

Fuente: Andújar Marquez et al [62].

Material	Conductividad $[\frac{W}{mK}]$	Difusividad $[\frac{m^2}{s}]$
Gravas (Saturadas)	1,8	$0,75 \times 10^{-6}$
Gravas (No Saturadas)	0,4	$0,25 \times 10^{-6}$
Arenas (Saturadas)	2,4	$0,83 \times 10^{-6}$
Arenas (No Saturadas)	0,4	$0,25 \times 10^{-6}$
Arcillas y Limos (Saturados)	1,7	$0,5 \times 10^{-6}$
Areniscas	2,8	$1,17 \times 10^{-6}$
Margas	2,1	$1,05 \times 10^{-6}$

Donde el valor de la conductividad en el suelo ha sido calculado a partir de un valor medio de los materiales que componen el acuífero, este resultado quedaría establecido en $2 \frac{W}{mK}$, y la difusividad térmica de la capa superior de materiales no saturados se establece en $0,25 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$; mientras que, para el acuífero, compuesto de los mismos materiales, pero saturados, la difusividad se eleva hasta $0,25 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$. En cuanto a las características hidrogeológicas del acuífero cuaternario, este modelo utilizará la información recogida por Domingo Pinillos [63], cuya descripción de la unidad hidrológica siga la configuración de la Tabla 14:

Tabla 14: Valores de los parámetros hidrodinámicos empleados.

Fuente: Domingo Pinillos [63].

Capa	Conductividad hidráulica $\left[\frac{m}{d}\right]$	Almacenamiento específico $\left[\frac{1}{m}\right]$	Espesor [m]
Cuaternario	2,1	$4,33 \times 10^{-3}$	20-150
Margas	$1,2 \times 10^{-6}$	1×10^{-7}	60
Plioceno	1,45	$4,4 \times 10^{-5}$	10-110
Margas	$1,2 \times 10^{-6}$	1×10^{-7}	-
Messiniense	1	$2,5 \times 10^{-5}$	125
Margas	1×10^{-6}	1×10^{-7}	-
Tortonense	1,2	$2,25 \times 10^{-4}$	150-200
Muro inferior	0,5	1×10^{-5}	-

Al realizar el presente trabajo en puntos cercanos a la costa del Mar Menor, el espesor del acuífero cuaternario utilizado será de entre 120 y 150 m [62].

Además, de acuerdo con el Estudio para la cuantificación de la descarga de agua subterránea al Mar Menor [64]: “... la descarga al Mar Menor para el periodo modelado sería $11,6 \text{ hm}^3$ (junio de 2018 a octubre de 2019) y $8,5 \text{ hm}^3$ en el pasado curso hidrológico 2018/2019”, por lo tanto el valor seleccionado será este último, y siendo la longitud de costa del Mar Menor es de 73 km [65], el valor del caudal base del acuífero cuaternario por unidad de costa sería el cociente del primer valor entre el segundo el valor quedaría en $0,319 \frac{m^2}{d}$ por unidad de longitud de costa. Los parámetros hidrogeológicos del acuífero se observan en la Tabla 15:

Tabla 15: Parámetros hidrogeológicos del acuífero Cuaternario aplicados en el modelo.

Transmisividad $\left[\frac{m^2}{d}\right]$	315
Flujo base $\left[\frac{m^2}{d}\right]$	0,319
Coefficiente de Almacenamiento [-]	0,6495

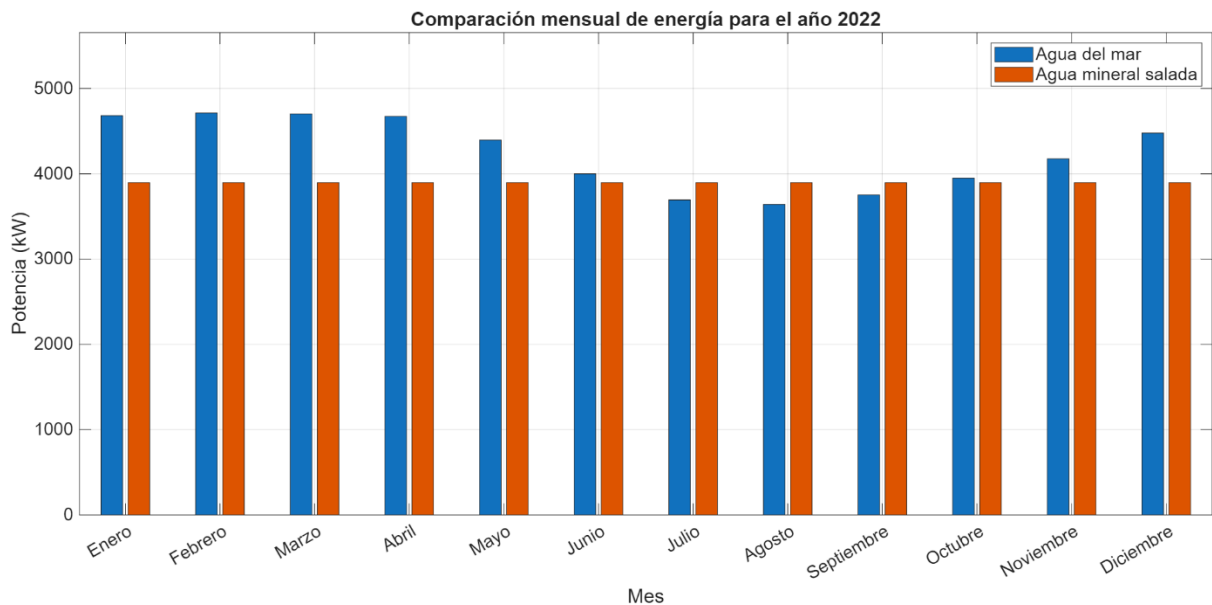
Finalmente, para comparar el ahorro energético que supondría este método respecto al convencional, se inserta en la Tabla 16 la temperatura media del agua de la mar mencionada previamente en el año 2022:

Tabla 16: Temperatura media mensual del Mar Mediterráneo en la boya del Cabo de Palos.

Fuente: Red Exterior de boyas del Estado [55].

Mes	Temperatura [°C]
Enero	15,36
Febrero	15
Marzo	15,13
Abril	15,47
Mayo	18,7
Junio	23,32
Julio	26,9
Agosto	27,51
Septiembre	26,21
Octubre	23,91
Noviembre	21,27
Diciembre	17,75

Tras realizar la simulación se obtiene el flujo de agua mencionado previamente a una temperatura de 24,53 °C y se aprecia que gracias a la velocidad que alcanza el fluido en la tubería de impulsión, de $0,13 \frac{m}{s}$, esto supone una pérdida de potencia térmica de tan solo 0,57 kW. El uso del agua mineral salada a esta temperatura supone un ahorro significativo en la desalación, especialmente en lo que refiere a la constancia de esta temperatura durante todo el año a estas profundidades, en la Figura 27 se aprecia la necesidad de aporte de calor que se tiene que hacer para llegar a los 70 °C; en naranja, si el proceso obtiene el agua de la intrusión marina; y en azul, si la obtiene del mar directamente:



Fuente: Propia.

Figura 27: Comparativa de la necesidad de potencia térmica adicional necesaria para calentar el caudal hasta los 70 °C en el Campo de Cartagena.

Donde para el caso del agua mineral salada se aprecia un valor constante de casi 3,9 MW mensuales mientras que el rango originado de obtener el agua salada directamente del mar varía

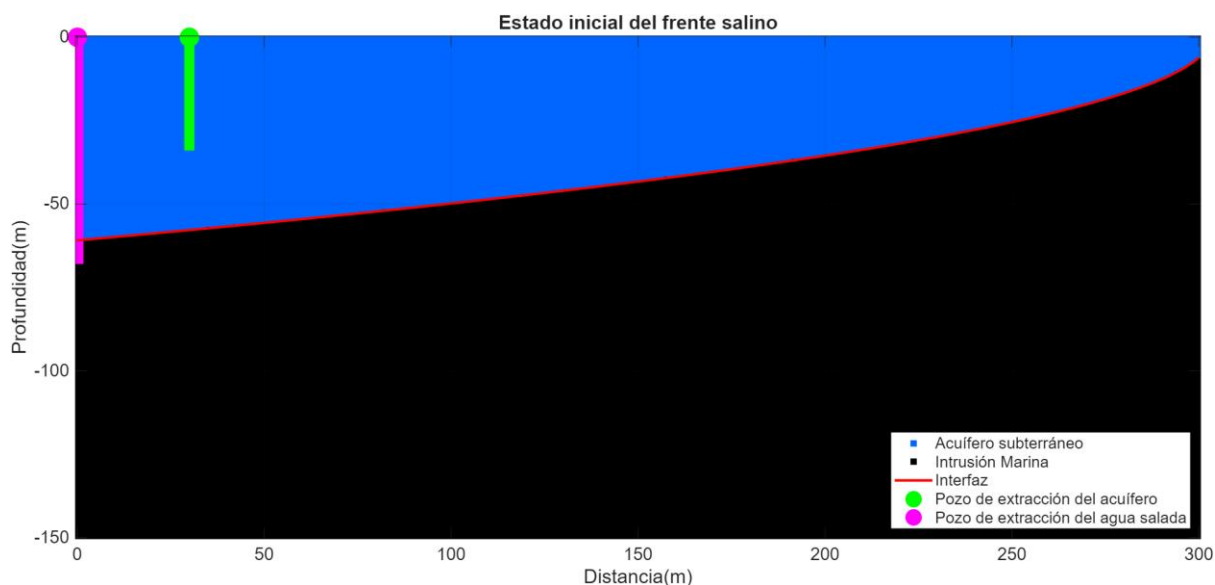
desde los 4,7 MW en los meses más fríos hasta 3,64 MW en el mes de agosto. El porcentaje mensual de ahorro que supone el empleo de este sondeo se aprecia en la Tabla 17:

Tabla 17: Ahorro de potencia térmica necesaria causado por la implementación del sondeo en el Campo de Cartagena.

Mes	Porcentaje de necesidad térmica ahorrado [%]
Enero	16,78
Febrero	17,32
Marzo	17,13
Abril	16,61
Mayo	11,36
Junio	2,59
Julio	-5,5
Agosto	-7,02
Septiembre	-3,84
Octubre	1,34
Noviembre	6,69
Diciembre	12,97

Donde los resultados positivos implican una mayor temperatura del agua mineral salada en comparación con el agua de la superficie del mar, lo que supone ahorro en las necesidades térmicas para realizar el proceso de desalación; mientras que los resultados negativos implican una mayor temperatura en la superficie del mar, lo que supone una menor necesidad de energía térmica si se emplea el método convencional de desalación. En esta ubicación el sondeo se caracteriza por una profundidad de 68 metros; este valor se calcula teniendo en cuenta el estado final del frente de intrusión marina y la necesidad de longitud de pantalla en el acuífero para conseguir extraer el caudal necesario, esta parte mide 2,65 metros.

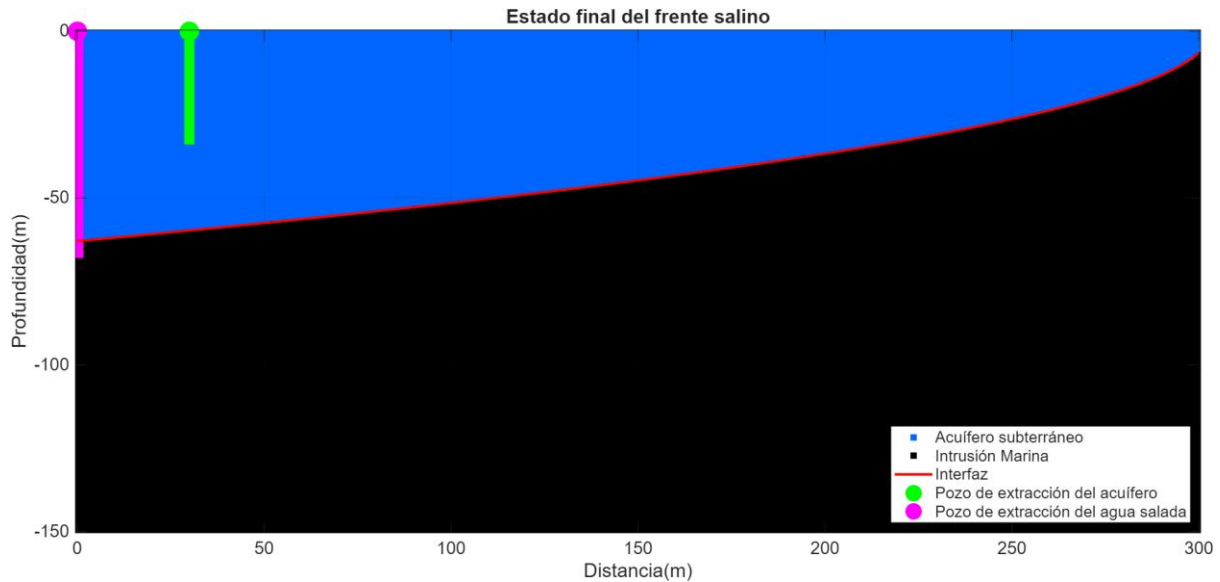
Como se menciona previamente durante esta memoria, el estudio del retroceso de la intrusión marina no da resultados que se hayan demostrado analíticamente correctos al ser este un análisis cualitativo del efecto del bombeo. Este efecto se aprecia en la Figura 28 el estado inicial del perfil del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena:



Fuente: Propia.

Figura 28: Estado del frente de intrusión marina antes de la extracción del agua mineral salada en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena.

Donde se observa que, en la ubicación del sondeo, la intrusión marina se encuentra a más de 50 metros de profundidad, tras un año de extracción del agua mineral salada, el estado del perfil del acuífero se observa en Figura 29:



Fuente: Propia.

Figura 29: Estado del frente de intrusión marina tras el primer año de extracción del agua mineral salada en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena.

El programa calcula el retroceso vertical de la intrusión marina en 2 metros; si bien, como se ha explicado previamente, esta sección del programa no se puede tener en cuenta cuantitativamente, sí se puede utilizar para entender el comportamiento del acuífero en presencia de este tipo de bombeo.

En cuanto a la maquinaria de bombeo necesaria para elevar el agua, la potencia necesaria para esta se estima en 23,44 kW.

4.2 Resultados para el Campo de Dalías.

En esta ubicación, la composición del terreno tendrá las siguientes características térmicas mostradas en la Tabla 18:

Tabla 18: Valores empleados en el modelo de la conductividad y difusividad térmica para las distintas capas del subsuelo del Campo de Dalías.

Fuente: Andújar Marquez et al [62] y Popov et al [66].

Material	Conductividad $\left[\frac{W}{mK}\right]$	Difusividad $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
Calcarenitas	2,42	$0,83 \times 10^{-6}$
Margas	2,1	$1,05 \times 10^{-6}$
Calizas	2,68	$0,99 \times 10^{-6}$

De esta tabla se obtiene el valor aplicado a la conductividad térmica del medio como $2,1 \frac{W}{mK}$ al ser la capa de margas la de mayor potencia en esta ubicación. De acuerdo con Molina Sánchez [37], las salidas del acuífero Balerna – Las Marinas hacia el mar o lagunas costeras son de 4

hm³ al año, si dividimos esta cifra entre los días del año y la longitud de costa de este acuífero, que se estima en 37,5 km, el flujo base de este acuífero quedaría establecido en $0,292 \frac{m^2}{d}$ por unidad de longitud de costa. Los parámetros hidrogeológicos del acuífero se observan en Tabla 19:

Tabla 19: Parámetros hidrogeológicos del acuífero Balerna - Las Marinas aplicados en el modelo.

Fuente: Molina Sánchez [37], IGME [67] y Cherry y Freeze [15].

Transmisividad $\left[\frac{m^2}{d}\right]$	190
Flujo base $\left[\frac{m^2}{d}\right]$	0,292
Coefficiente de Almacenamiento [-]	0,04
Conductividad hidráulica $\left[\frac{m}{d}\right]$	0,086

Para este caso, la temperatura obtenida del mar ha sido obtenida también en el año 2022, en este caso de la boya de Cabo de Gata, ver Tabla 20:

Tabla 20: Temperatura media mensual del Mar Mediterráneo en la boya del Cabo de Gata.

Fuente: Red Exterior de boyas del Estado [55].

Mes	Temperatura [°C]
Enero	15,29
Febrero	15,24
Marzo	15,35
Abril	15,75
Mayo	18,52
Junio	20,53
Julio	24,18
Agosto	24,99
Septiembre	22,36
Octubre	21,1
Noviembre	18,22
Diciembre	17,03

Como se ha desarrollado a lo largo de todo el proyecto, la hidrogeología es un aspecto fundamental en este trabajo, pues de ella depende el cálculo de la intrusión marina y, consecuentemente, la profundidad necesaria del sondeo. Cuando se describe el perfil del subsuelo en la sección de la introducción dedicada al Campo de Dalías se deja claro que hay una capa de margas que envuelve el acuífero superior compuesto por calcarenitas pliocenas, recordando el trabajo de Molina Sánchez [37]: “El sustrato impermeable del acuífero está integrado por las margas grises pliocenas cuyo espesor llega a alcanzar los 1000 m; dado que existe un paso gradual desde las calcarenitas a las margas, con margas arenosas de transición entre ambos, el salto de permeabilidad es igualmente progresivo”.

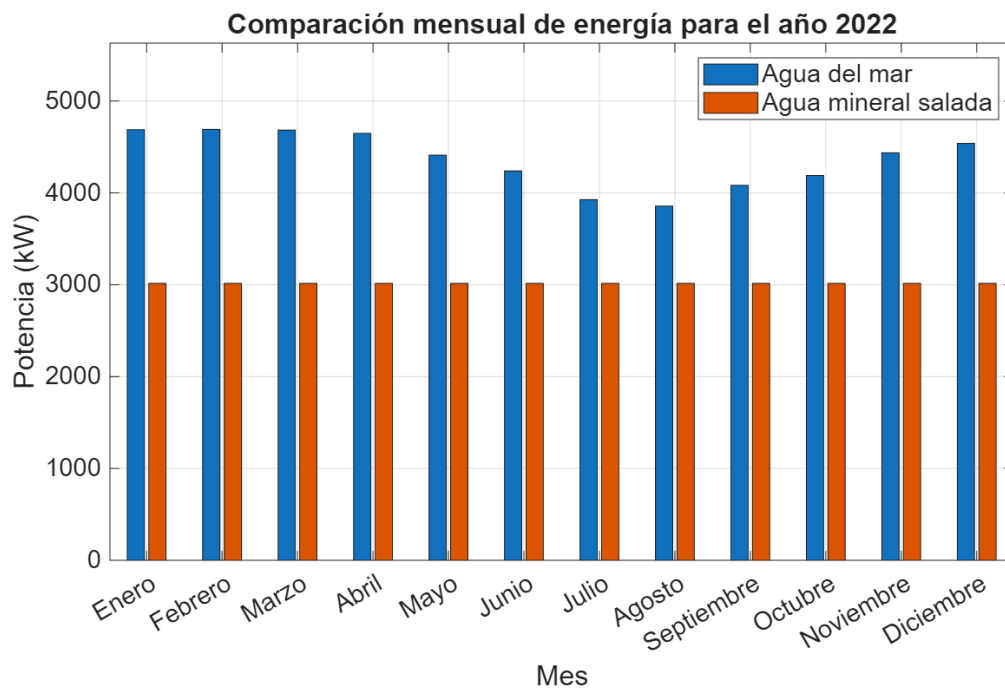
Esta característica provoca que el límite meridional del acuífero superior se encuentre lejos del Mar Mediterráneo en los puntos en los que estas margas afloran, que suponen un límite semipermeable para el acuífero compuesto por calcarenitas [37].

Estas características provocan que el empleo del software realizado no presente resultados fiables en cuanto a la representación de la intrusión marina, es decir, que no se puedan emplear los métodos analíticos de la ecuación de Glover para el cálculo del perfil del acuífero.

Para el desarrollo de este caso concreto se obtienen los datos de profundidad del acuífero inferior compuesto por materiales carbonatados de la Sierra de Gádor de la bibliografía y se calcula directamente la temperatura de caudal obtenida. Gracias a los trabajos de Fernández Barella [68] y Vallejos Izquierdo et al [40] se puede establecer que la temperatura en el Acuífero Inferior Occidental supera los 35 °C y la profundidad de este recurso en la ubicación seleccionada se puede obtener del trabajo de Molina et al [39], especificada en 600 metros la profundidad del sondeo en este caso.

Por estas características, el código de Matlab empleado para las otras dos ubicaciones no funciona en esta; se realiza un segundo código, extraído y adaptado del primero, para resolver esta ubicación. El nuevo código se encuentra en el Anexo II.

Aplicando estos datos en el modelo, se obtiene que la temperatura obtenida en la superficie es de 34,82 °C, lo que supone una pérdida de potencia térmica de 15,18 kW, la alta velocidad del fluido a través de la tubería y la gran resistencia térmica que aporta el conjunto de la tubería y la cementación permiten alcanzar este descenso tan pequeño en la temperatura. El ahorro gracias al uso del agua mineral salada se observa en la Figura 30:



Fuente: Propia.

Figura 30: Comparativa de la necesidad de potencia térmica adicional necesaria para calentar el caudal hasta los 70 °C en el Campo de Dalías.

En esta figura se puede apreciar que la potencia térmica necesaria para completar la desalación permanece constante en un valor de 3 MW si se opta por la instalación del sondeo; mientras que, si se recurre al método convencional, el rango varía desde los 4,7 MW de máxima en los meses invernales, hasta un mínimo de 3,9 MW en agosto. El porcentaje de ahorro mensual conseguido se aprecia en la Tabla 21:

Tabla 21: Ahorro de potencia térmica necesaria causado por la implementación del sondeo en el Campo de Dalias.

Mes	Porcentaje de necesidad térmica ahorrado [%]
Enero	37,7
Febrero	35,76
Marzo	35,63
Abril	35,16
Mayo	31,67
Junio	28,89
Julio	23,23
Agosto	21,85
Septiembre	26,16
Octubre	28,1
Noviembre	32,1
Diciembre	33,59

El ahorro responde de acuerdo con lo esperado: un mayor porcentaje para los meses más fríos por la mayor diferencia de temperaturas entre los dos casos.

Para este caso, la potencia calculada en la bomba es de 206,86 kW.

4.3 Resultados para la isla de Gran Canaria.

En este caso, las características térmicas del perfil del subsuelo se aprecian en la Tabla 22:

Tabla 22: Valores empleados en el modelo de conductividad y difusividad térmica para las distintas capas del subsuelo de la isla de Gran Canaria.

Fuente: IDAE [69] y García de la Noceda y Albert Beltrán [70].

Material	Conductividad $\left[\frac{W}{mK}\right]$	Capacidad Térmica Volumétrica $\left[\frac{MJ}{m^3K}\right]$	Difusividad $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
Depósitos aluviales, eólicos, etc (Cuaternarios)	0,4	1,4	$2,86 \times 10^{-7}$
Basaltos	1,8	2,4	$7,5 \times 10^{-7}$

Donde la conductividad térmica ha quedado establecida en $1,8 \frac{W}{mK}$ al ser mayor la potencia de la capa basáltica. Ante la ausencia de bibliografía acerca de los valores de difusividad, se ha recurrido a la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} = \frac{k}{C_v}$$

Donde C_p y C_v representan el calor específico en $\frac{J}{kgK}$ y la capacidad calorífica volumétrica en $\frac{J}{m^3K}$. Mientras tanto, ante la ausencia de datos acerca de las salidas al mar del acuífero estudiado, se recurre a la última información existente en el Plan Hidrológico [45] mencionado para la masa de agua colindante, ubicada al norte: ES70GC004. En el que se calculan las salidas

al mar en 2,8 hm³ anuales obtenidas del ciclo con periodo 1949/50-2015/15, sabiendo que la línea de costa de este acuífero es 18,8 kilómetros y con el mismo procedimiento que en los apartados anteriores, obtenemos el flujo base de ese acuífero, que es aplicado al acuífero estudiado, ver Tabla 23:

Tabla 23: Parámetros hidrogeológicos del acuífero de Gran Canaria.

Fuente: Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria [45].

Transmisividad $\left[\frac{m^2}{d}\right]$	10
Flujo base $\left[\frac{m^2}{d}\right]$	0,408
Coefficiente de Almacenamiento [-]	0,015
Conductividad hidráulica $\left[\frac{m}{d}\right]$	0,8

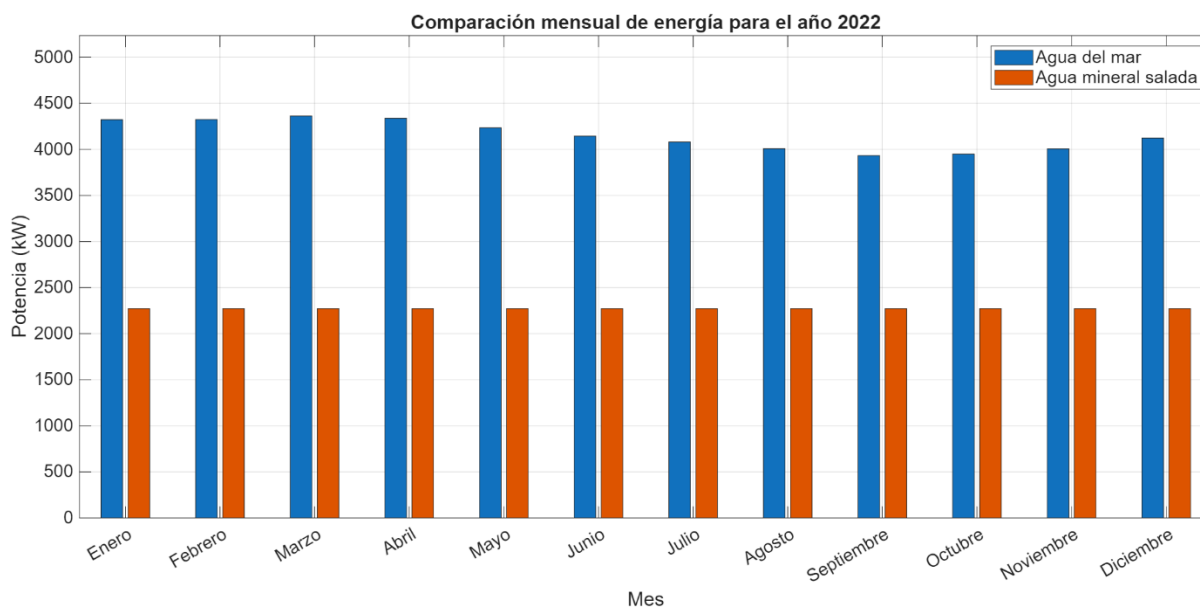
La temperatura del mar se obtiene nuevamente para el pasado año 2022, en este caso de la boya de Las Palmas Este, ver Tabla 24:

Tabla 24: Temperatura media mensual del Océano Atlántico en la boya de Las Palmas Este.

Fuente: Red Exterior de boyas del Estado [55].

Mes	Temperatura [°C]
Enero	19,56
Febrero	19,55
Marzo	19,09
Abril	19,38
Mayo	20,59
Junio	21,64
Julio	22,39
Agosto	23,23
Septiembre	24,11
Octubre	23,92
Noviembre	23,25
Diciembre	21,89

Tras ejecutar el modelo, el resultado obtenido muestra un caudal constante a 43,45 °C, lo que supone una pérdida de potencia térmica a lo largo del sondeo de 12,58 kW gracias, nuevamente, a que la alta velocidad del agua a través de la tubería de impulsión reduce significativamente las pérdidas de calor por la parte advectiva. El ahorro en el uso de agua mineral salada se observa en la Figura 31:



Fuente: Propia.

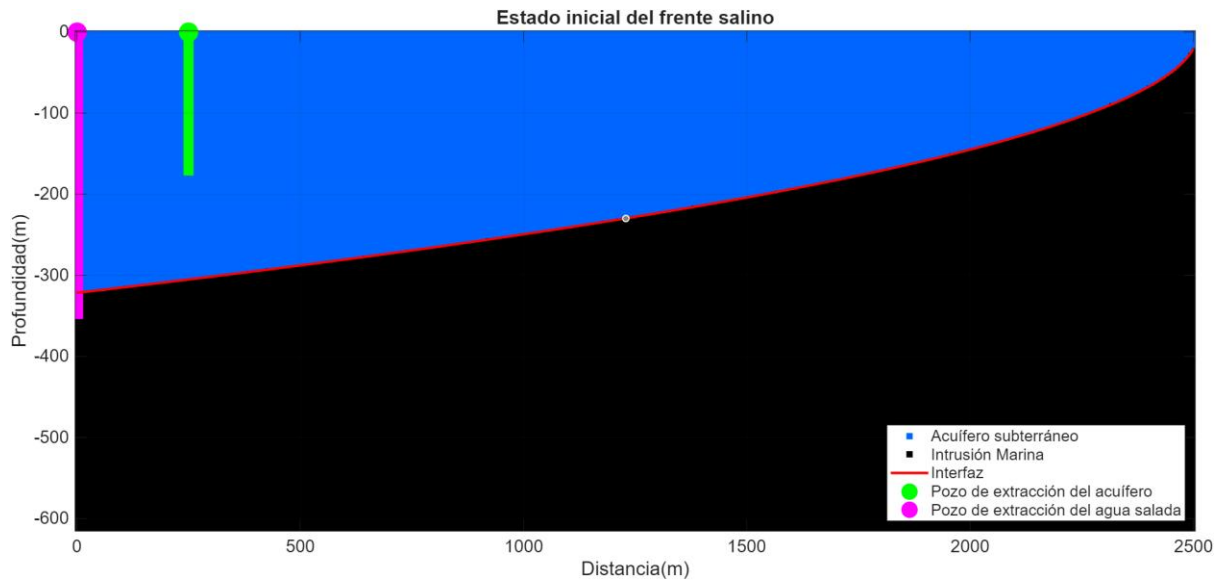
Figura 31: Comparativa de la necesidad de potencia térmica adicional necesaria para calentar el caudal hasta los 70 °C en la isla de Gran Canaria.

Donde las necesidades adicionales de calor con la utilización de agua mineral salada permanecen constantes a 2,27 MW durante todo el año, mientras que el rango de potencia térmica adicional necesaria en el caso de emplear agua directamente del mar va desde los 4,3 MW en los meses más fríos hasta los 3,9 MW en el mes de septiembre. El porcentaje de ahorro mensual que supone usar este sondeo se ve en Tabla 25:

Tabla 25: Ahorro de potencia térmica necesaria causado por la implementación del sondeo en Gran Canaria.

Mes	Porcentaje de necesidad térmica ahorrado [%]
Enero	47,37
Febrero	47,38
Marzo	47,86
Abril	47,56
Mayo	46,27
Junio	45,11
Julio	44,24
Agosto	43,24
Septiembre	42,15
Octubre	42,39
Noviembre	43,22
Diciembre	44,82

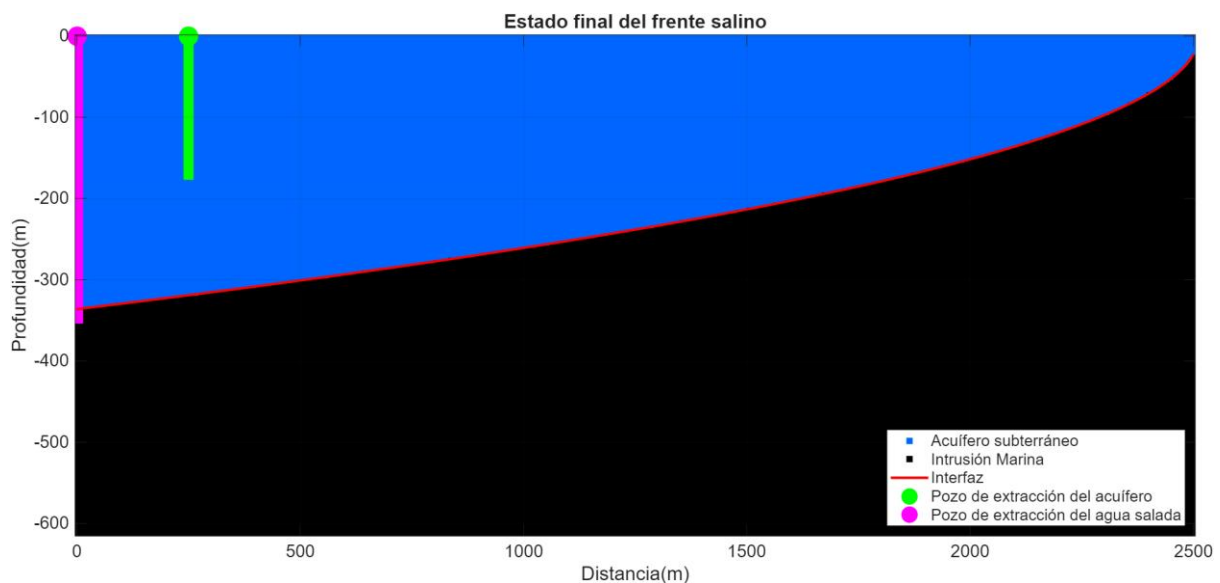
Donde se aprecia que el mayor ahorro se produce en los meses más fríos debido a la mayor diferencia entre el agua subterránea y la superficial. El sondeo en este caso alcanza los 354 metros de profundidad, y la necesidad de longitud de la zona de admisión es de 2,65 metros. Por otra parte, el efecto de la extracción del agua mineral salada se observa en las siguientes figuras, el estado inicial antes del bombeo en la Figura 32:



Fuente: Propia.

Figura 32: Estado del frente de intrusión marina antes de la extracción del agua mineral salada en el acuífero de Gran Canaria.

Tras el trabajo de bombeo durante el período de un año, el estado final de la intrusión se puede observar en la Figura 33:



Fuente: Propia.

Figura 33: Estado del frente de intrusión marina tras el primer año de extracción del agua mineral salada en el acuífero de Gran Canaria.

El programa calcula el retroceso vertical de este frente en 14,6 metros; si bien, como se ha explicado previamente, esta sección del programa no se puede tener en cuenta cuantitativamente, sí sirve para hacerse una idea del comportamiento de este frente en presencia de este tipo de bombeo.

Por otra parte, estas necesidades en cuanto a la potencia eléctrica para bombear el agua mineral salada se estiman en 122,05 kW.

4.4 Discusión de los resultados.

Los resultados obtenidos se analizarán teniendo en cuenta principalmente el análisis del ahorro energético de una planta desaladora por destilación multiefecto, al ser el objetivo principal. Se analizará también el comportamiento del frente de intrusión marina en las ubicaciones donde fue posible calcular el comportamiento del frente de intrusión marina y la potencia necesaria en cada grupo de bombeo.

La instalación de este tipo de sondeos en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena no supone un gran descenso en las necesidades térmicas de la instalación, si bien es verdad que para ciertos meses puede suponer un ahorro notable, pudiendo alcanzar el 17,2 % en febrero, para los meses de julio, agosto y septiembre la desalación resultaría más eficiente si el agua se obtuviera del mar directamente; en concreto, supondría un sobrecoste 5,5 %, 7,02 % y 3,84 %, respectivamente. Se puede apreciar también que el frente de intrusión marina retrocede cuando entra en acción el funcionamiento del sondeo.

El planteamiento de este tipo de instalaciones en el municipio de El Ejido significa un aumento notable de la eficacia del proceso de desalación; este rango iría desde el 21,85 % hasta el 37,7 %. Como es mencionado en su apartado, el comportamiento del frente de intrusión marina no se puede calcular.

Si la instalación del sondeo se traslada a la isla de Gran Canaria, concretamente en el acuífero ES70GC005M, el ahorro en la instalación alcanza el máximo si se compara con los otros dos escenarios, el porcentaje se encuentra durante todos los meses entre el 40 % y el 50 %, llegando a su máximo en marzo, con un ahorro que asciende hasta el 47,92 %. Por su parte, el frente de intrusión marina retrocede hacia el mar, mejorando la salud del acuífero.

Finalmente, al estar evaluando el mismo caudal de extracción en los tres escenarios, la potencia del grupo de bombeo se diferencia en cada uno de ellos por la altura necesaria de elevación del agua. Por este motivo, la mayor potencia se encuentra en El Ejido, seguida por Gran Canaria y por Los Alcázares, respectivamente.

5.- CONCLUSIONES.

Para rematar este proyecto, se van a comentar los resultados principales por cada ubicación y se va a concluir, desde un punto de vista térmico, la viabilidad de la instalación de este tipo de sondeos. El criterio a seguir será indicar como viable la instalación en aquellas ubicaciones en las que suponga una mejora energética durante todos los meses.

Los resultados han sido variados, como ya se explica en la sección anterior, para todos ellos se puede concluir que el proyecto ha logrado el objetivo de desarrollar un programa que calcule el ahorro térmico que se obtiene con la implementación de este tipo de sondeos.

En la localidad de Los Alcázares, la instalación de este tipo de infraestructura puede incluso suponer un aumento de las necesidades térmicas del proceso, sobre todo en los meses de verano, cuando el agua en la superficie del mar tiene una temperatura mayor que la del subsuelo. Esto se explica por la situación hidrogeológica existente en el subsuelo de la región, donde el acuífero se encuentra dividido horizontalmente por capas de muy baja conductividad hidráulica; lo que provoca que el acuífero superior, el principal afectado por la intrusión marina, no tenga la profundidad necesaria para aprovechar el gradiente geotérmico de la zona.

Se concluye entonces que la instalación de un sondeo de aprovechamiento del agua mineral salada en este municipio no es viable desde un punto de vista térmico.

En lo que se refiere al municipio de El Ejido, la estructura geológica impide calcular analíticamente el estado de la intrusión marina, por lo que se ha recurrido a la bibliografía para poder realizar el cálculo del sondeo. Tras su realización, se establece que el empleo del agua mineral salada supone una mejora notable en la eficiencia térmica de la instalación. Sin embargo, la existencia de una capa de margas con una potencia que llega hasta los 1000 metros puede dificultar el cálculo de la profundidad del sondeo, que será bastante más profundo que en el caso anterior.

El resultado es ambiguo debido a la formación geológica existente que ubica al acuífero afectado por agua de mar a profundidades mayores que en los otros casos, lo que provoca que no se haya podido estudiar debidamente la interfaz dulce-salada. Sin embargo, el gran resultado obtenido en el estudio de ahorro energético indica que es una zona adecuada para la instalación.

El mayor gradiente geotérmico existente en la zona oriental de la isla de Gran Canaria permite obtener los mejores resultados de este proyecto; si bien es cierto que el acuífero estudiado no está delimitado por razones hidrológicas, como se explica con anterioridad, lo que puede afectar al cálculo del comportamiento hidráulico del acuífero y la intrusión marina. Al haber localizado la instalación tierra adentro, el sondeo llega a gran profundidad para alcanzar el frente de la intrusión marina.

En este caso los resultados arrojados indican que, térmicamente hablando, es una zona ideal para este tipo de extracciones.

En adición a lo comentado acerca del retroceso de la interfaz dulce-salada, la extracción del agua mineral salada presente en el acuífero disminuye el nivel piezométrico del acuífero, que tiene también sus efectos en los contaminantes con origen antrópico mencionados en este trabajo, recordando a Sánchez et al [31]: "...la subida del nivel freático del acuífero Cuaternario, dejándolo más expuesto a la lixiviación de nitrato... y aumentando las descargas de aguas ricas en nitratos al Mar Menor y al Mediterráneo". Esto previene la expansión de la contaminación a otros entornos.

La ausencia de un estudio económico no permite tener en cuenta una visión más realista de los resultados, pues para la realización de este tipo de proyectos, este es un aspecto clave para instalación, operación y mantenimiento. Con un análisis económico se podría hacer balance con los resultados térmicos y obtener resultados más cercanos a la realidad.

Con todo lo calculado, se incide nuevamente en que este proyecto satisface los objetivos establecidos, el programa calcula el ahorro térmico en el proceso de desalación y con esto se decide la viabilidad de la instalación. Además de esto, se destaca los cálculos acerca del comportamiento de la intrusión marina y el grupo de bombeo, que suponen una idea aproximada para futuros trabajos.

6.- LÍNEAS FUTURAS.

Para futuros estudios se recomienda un estudio hidrogeológico exhaustivo del suelo, pues es la parte que más información guarda acerca de la viabilidad del proyecto. Los cambios realizados en todos los ámbitos que rodean el consumo de agua subterránea y su contaminación presentan variaciones muy grandes con los años, por lo tanto, se recomienda que este estudio hidrogeológico se realice mediante pruebas y sondeos reales.

Este caso se ha desarrollado alrededor de la desalación de agua en el marco de la escasez actual de este recurso, si bien se analiza adecuadamente el ahorro energético que supone la procedencia del agua, lo cual es interesante desde el punto de vista de la infraestructura necesaria para elevar la temperatura hasta su objetivo final; pues si nos referimos a métodos de producción de calor que requiera de combustibles fósiles, se reduciría su consumo. Por otro lado, si el calor se obtiene a través de la energía solar térmica como se indica en el apartado dedicado a las desaladoras híbridas, supondría una disminución en la superficie utilizada para este fin. Un análisis completo de la planta hubiera arrojado resultados claros acerca de la cantidad real de energía ahorrada por unidad de volumen de agua potable producida.

Se recomienda, nuevamente, la realización de un estudio económico de todo este proyecto y las propuestas para trabajos futuros, pues es el verdadero parámetro que dictará la posibilidad de la realización. Para ello, en este trabajo se obtiene una aproximación de la profundidad del sondeo, que es un elemento para tener en cuenta en la inversión inicial; y otra aproximación de la potencia eléctrica del grupo de bombeo, cuyo consumo de electricidad es necesario tener en cuenta.

7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] J. Melgarejo y P. Fernández-Aracil, «Congreso Nacional del agua Orihuela. Innovación y sostenibilidad», 2019.
- [2] E. Koncagül, M. Tran, y R. Connor, «Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020», UNESCO, 2020.
- [3] J. Berbel y J. Espinosa-Tasón, «La gestión del regadío ante la escasez del agua: El caso de España», 2021.
- [4] E. C. Tena *et al.*, «Presupuesto y Gasto Público SE de P».
- [5] «Principales técnicas de desalación: cuáles son, en qué consisten.» Accedido: 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aedyr.com/principales-tecnicas-desalacion-cuales/>
- [6] «Procesos de desalación». Accedido: 22 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aedyr.com/procesos-desalacion-agua/>
- [7] R. Cárcela, «Un investigador andaluz consigue agua potable de máxima calidad con la desaladora ecología híbrida.» [En línea]. Disponible en: https://www.lavozdelsur.es/actualidad/ecologia/investigador-andaluz-consigue-agua-potable-maxima-calidad-con-desaladora-ecologica-hibrida_314479_102.html
- [8] M. A. Al-Obaidi, R. H. Zubo, F. L. Rashid, H. J. Dakkama, R. Abd-Alhameed, y I. M. Mujtaba, «Evaluation of solar energy powered seawater desalination processes: a review», *Energies*, vol. 15, n.º 18, p. 6562, 2022.
- [9] I. S. Al-Mutaz y I. Wazeer, «Comparative performance evaluation of conventional multi-effect evaporation desalination processes», *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, n.º 1, pp. 1194-1203, 2014.
- [10] M. Al-Shammiri y M. Safar, «Multi-effect distillation plants: state of the art», *Desalination*, vol. 126, n.º 1-3, pp. 45-59, 1999.
- [11] D. G. MUNDIAL, «La energía geotérmica», *Banco Mundial*. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/geothermal>, 2017.
- [12] I. IDAE, «Manual de geotermia», IDAE, Madrid, 2008.
- [13] A. J. Morano Rodríguez y J. L. Guillén Viñas, *Sondeos geotérmicos profundos*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2010.
- [14] K. Yadav y A. Sircar, «Application of low enthalpy geothermal fluid for space heating and cooling, honey processing and milk pasteurization», *Case studies in thermal engineering*, vol. 14, p. 100499, 2019.
- [15] J. A. Cherry y R. A. Freeze, *Groundwater*, vol. 370. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.
- [16] M. V. Vélez Otálvaro, «Hidráulica de aguas subterráneas», *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*, 1999.
- [17] J. Sanchez, «Ley de Darcy, conductividad hidráulica», *Departamento de Geología-Universidad de Salamanca (España)*, 2011.
- [18] A. J. Morano, «Utilización de recurso geotérmico. Tema 3.»
- [19] «American Petroleum Institute | API». Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.api.org/>

- [20] «UNE-EN ISO 11960:2021 (Ratificada) Industrias del petróleo y d...» Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065710>
- [21] «Tubo de Revestimiento y Casing API 5CT J55/K55», OctalAcero. Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.octalacero.com/tubo-de-revestimiento-y-casing-api-5ct-j55-k55>
- [22] Y. Yang, B. Li, L. Che, M. Li, Y. Luo, y H. Han, «Calculation model and influence factors of thermal conductivity of composite cement-based materials for geothermal well», *Geothermal Energy*, vol. 12, n.º 1, p. 3, 2024.
- [23] K. Salhein, C. Kobus, M. Zohdy, A. M. Annekaa, E. Y. Alhawsawi, y S. A. Salheen, «Heat Transfer Performance Factors in a Vertical Ground Heat Exchanger for a Geothermal Heat Pump System», *Energies*, vol. 17, n.º 19, p. 5003, 2024.
- [24] J. Li *et al.*, «Heat extraction model and characteristics of coaxial deep borehole heat exchanger», *Renewable Energy*, vol. 169, pp. 738-751, 2021.
- [25] «Guia tecnica. Seleccion de equipos de transporte de fluidos. Bombas y ventiladores.» Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10_Guia_tecnica_seleccion_de Equipos_de transporte_de fluidos._Bombas_y_ventiladores_758f070c.pdf
- [26] «Mapa de situación de Los Alcázares - Región de Murcia Digital». Accedido: 4 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?METHOD=AMPLIAFOTO&titulo=Los%20Alc%C3%A1zares&idImagen=1940>
- [27] C. Leduc, A. Pulido-Bosch, y B. Remini, «Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges», *Hydrogeology Journal*, vol. 25, n.º 6, pp. 1529-1547, 2017.
- [28] J. Jimenez-Martinez, J. L. Garcia-Arostegui, J. Hunink, S. Contreras, P. Baudron, y L. Candela, «The role of groundwater in highly human-modified hydrosystems: a review of impacts and mitigation options in the Campo de Cartagena-Mar Menor coastal plain (SE Spain)», *Environmental Reviews*, vol. 24, n.º 4, pp. 377-392, 2016.
- [29] M. Navarro, C. Pérez-Sirvent, M. Martínez-Sánchez, J. Vidal, P. Tovar, y J. Bech, «Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: a case study in a semi-arid zone», *Journal of Geochemical exploration*, vol. 96, n.º 2-3, pp. 183-193, 2008.
- [30] *Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources*, vol. 375. 1991. Accedido: 28 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj>
- [31] M. A. Sánchez, M. V. Martín, y D. M. Andries, «Contaminación por nitrato en las aguas subterráneas de la Demarcación Hidrológica del Segura (España) y su particular incidencia en el área de captación del Mar Menor», *Estudios geológicos*, vol. 80, n.º 1, pp. 1071-1071, 2024.
- [32] A. Martínez Tovar, «Estado del arte de la geotermia somera en la Región de Murcia: legislación aplicable en los principales municipios y empresas instaladoras», 2022.
- [33] M. Erena Arrabal *et al.*, «Gestión integrada del agua en la Región de Murcia: el caso del campo de Cartagena», *Gestión integrada del agua en la Región de Murcia: el caso del campo de Cartagena*, 2013.

- [34] J. Aparicio, L. Candela, O. Alfranca, y J. L. García-Aróstegui, «Economic evaluation of small desalination plants from brackish aquifers. Application to Campo de Cartagena (SE Spain)», *Desalination*, vol. 411, pp. 38-44, 2017.
- [35] S. Contreras, A. Alcolea, J. Jiménez-Martínez, y J. HUNINK, «Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario», *FutureWater Report*, vol. 176, 2017.
- [36] B. López-Felices, J. A. Aznar-Sánchez, J. F. Velasco-Muñoz, y E. Mesa-Vázquez, «Farmers' profiles and attitudes towards the implementation of rainwater harvesting systems in intensive agriculture», *International Journal of Agricultural Sustainability*, vol. 21, n.º 1, p. 2189402, 2023.
- [37] L. Molina Sánchez, «Hidroquímica e intrusión marina en el Campo de Dalías (Almería)», 1998.
- [38] L. Rodríguez Navarro, «Mitigación de los efectos medioambientales negativos de la técnica de solarización del suelo en los cultivos intensivos de la Comarca del Campo de Dalías», 2022.
- [39] L. Molina, A. Vallejos, A. Pulido-Bosch, y F. Sánchez-Martos, «Water temperature and conductivity variability as indicators of groundwater behaviour in complex aquifer systems in the south-east of Spain», *Hydrological processes*, vol. 16, n.º 17, pp. 3365-3378, 2002.
- [40] A. Vallejos Izquierdo, D. Daniele, F. Sola Gómez, L. Molina Sánchez, y A. Pulido Bosch, «Anthropic-induced salinization in a dolomite coastal aquifer. Hydrogeochemical processes», 2019.
- [41] M. D. Carrascosa Chisvert, «Estudio de las aguas subterráneas desde el punto de vista físico-químico y orgánico del acuífero de Amurga (sur de Gran Canaria)», 2007.
- [42] «ISTAC | Población según sexos y edades. Canarias, islas y municipios por años | Banco de datos». Accedido: 12 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www3.gobiernodecanarias.org/istac/statistical-visualizer/visualizer/data.html?resourceType=query&agencyId=ISTAC&resourceId=E30243A_000001#visualization/table
- [43] D. L. Jerez y C. J. I. García, «Los desequilibrios geodemográficos en Canarias: una expresión de su especialización económica», *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2023.
- [44] «12_1.pdf». Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://web.igme.es/actividadesigme/lineas/HidroyCA/publica/libros4_CCA/libro44/pdf/lib44/12_1.pdf
- [45] «PLAN HIDROLÓGICO DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE GRAN CANARIA», *Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria*.
- [46] C. G. de la Noceda y J. F. A. Beltrán, «The HYDROTHERM code as a tool for integrating geophysics in geothermal prospecting», *Boletín Geológico y Minero*, vol. 134, n.º 3, pp. 27-40, 2023.
- [47] «Red de Control 2009». Accedido: 15 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.aguasgrancanaria.com/red_control.php
- [48] «Modern Techniques in Well Design», TDI. Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dewateringinst.com/knowledge_centre/modern-techniques-in-well-design/

- [49] «Guia_buenas_practicas_pozos_digital.pdf». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.aih-ge.org/wp-content/uploads/Guia_buenas_practicas_pozos_digital.pdf
- [50] S. De Simone, B. Pinier, O. Bour, y P. Davy, «A particle-tracking formulation of advective–diffusive heat transport in deformable fracture networks», *Journal of Hydrology*, vol. 603, p. 127157, 2021.
- [51] A. M. Domingo, «Apuntes de Transmisión del calor».
- [52] IChemE, «Rules of Thumb: Centrifugal Pump Efficiency». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.thechemicalengineer.com/features/rules-of-thumb-centrifugal-pump-efficiency>
- [53] «Cálculo de Bombas y Tuberías». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ugr.es/~aulavirtualpfc/q/Bbombasytuberias>
- [54] P. P. Urone, R. Hinrichs, P. P. Urone, y R. Hinrichs, «11.2 Heat, Specific Heat, and Heat Transfer - Physics | OpenStax». Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://openstax.org/books/physics/pages/11-2-heat-specific-heat-and-heat-transfer>
- [55] «PORTUS (Puertos del Estado)». Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://portus.puertos.es/#/>
- [56] D. K. Todd y L. W. Mays, *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons, 2004.
- [57] S. Stein *et al.*, «The effects of long-term saline groundwater pumping for desalination on the fresh–saline water interface: Field observations and numerical modeling», *Science of the Total Environment*, vol. 732, p. 139249, 2020.
- [58] G. Hellström, «Ground heat storage: Thermal analyses of duct storage systems [Doctoral thesis]. Lund University. Lund; 1991».
- [59] T. Domański y K. Kmiecik, «Load-bearing capacity of the steel-to-timber connections in fire temperature», presentado en MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2019, p. 09005.
- [60] «UNE-EN 1993-1-2:2011 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de ...» Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048506>
- [61] «Cableizer - Parameter». Accedido: 17 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.cableizer.com/documentation/k_w/
- [62] J. M. Andújar Márquez, M. Á. Martínez Bohórquez, y S. Gómez Melgar, «Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. Application to very low enthalpy geothermal energy systems», *Sensors*, vol. 16, n.º 3, p. 306, 2016.
- [63] J. C. Domingo Pinillos, «Modificaciones hidrodinámicas a largo plazo en un acuífero multicapa con explotación intensiva. Campo de cartagena (se españa)», 2019.
- [64] «Anexo 6. Resultado modelo de flujo subterráneo para el año 2018/19. Estudio para la cuantificación de la descarga de agua subterránea al Mar Menor.», 2020.
- [65] «Sobre el Mar Menor – Canal Mar Menor». Accedido: 7 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://canalmarmenor.carm.es/el-mar-menor/sobre-el-mar-menor/>

- [66] Y. Popov *et al.*, «Thermal properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Impact Crater Chicxulub, Mexico)», *Geophysical Journal International*, vol. 184, n.º 2, pp. 729-745, 2011.
- [67] «índice de los S.A. I cap.II.doc». Accedido: 15 de enero de 2026. [En línea].
Disponible en: https://aguas.igme.es/igme/publica/libro20/pdf/lib20/los_s_a_1.pdf
- [68] D. A. Fernández Barella, «Procesos hidrogeoquímicos en el acuífero de Balanegra (SE, España)», 2015.
- [69] «documentos_14_Guia_tecnica_diseno_de_sistemas_de_intercambio_geotermico_de_circuito_cerrado_1d03dc08.pdf». Accedido: 16 de enero de 2026. [En línea].
Disponible en:
https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_14_Guia_tecnica_diseno_de_sistemas_de_intercambio_geotermico_de_circuito_cerrado_1d03dc08.pdf
- [70] C. García de la Noceda y J. Albert-Beltrán, «The HYDROTHERM code as a tool for integrating geophysics in geothermal prospecting», 2023.

8.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO.

De acuerdo con el Real Decreto 1125/2003, un crédito ECTS equivale a entre 25 y 30 horas de trabajo, en la planificación del Máster Universitario en Ingeniería de la Energía, el Trabajo Fin de Máster tiene un peso de 18 ECTS, lo que supone un mínimo de 450 horas y un máximo de 540 horas.

Se establece la fecha de inicio del proyecto en el día 8 de septiembre del año 2025, y su fecha de finalización en el día de entrega a Indusnet, el 2 de febrero de 2026, lo que supone una diferencia de 147 días entre ambos. Las horas dedicadas a este proyecto se estiman en 510, lo que supone una dedicación diaria aproximada de tres horas y media. El trabajo se diferencia principalmente en tres etapas:

- **Primera etapa:** de un mes de duración, desde el 8 de septiembre hasta el 8 de octubre de 2025, donde, tras la primera reunión en la que se establecen los objetivos principales, el trabajo se centra especialmente en el desarrollo de un primer boceto del software realizado en MATLAB R2025a, se emplea el tiempo también en adquirir conocimientos técnicos respecto a las facetas del software que se desconocían; y teórica, en la que se hace recopilación y estudio de documentos para un mejor entendimiento de los procesos y su aplicación.
- **Segunda etapa:** de dos meses de duración, entre el 9 de octubre y el 10 de diciembre de 2025, en la que se desarrolla casi la totalidad del programa y se empieza a establecer la estructura de la presente memoria y comienza la búsqueda de referencias.
- **Tercera etapa:** de un mes y medio de duración, desde el 11 de diciembre de 2025 hasta el 2 de febrero de 2026, consiste en el perfeccionamiento del código de MATLAB y la redacción de la presente memoria; con su consiguiente revisión.

Tras conocer el proceso de realización de este trabajo, se pasa a la realización de un estudio económico en el que se tendrán en cuenta las horas trabajadas, tanto por parte del alumno, que será tomado como ingeniero becario con un coste de 10 € por hora; y por parte del profesor, que será tomado como ingeniero superior con un coste de 90 € la hora, el desglose por etapas se aprecia en la Tabla 26:

Tabla 26: Valoración económica del estudio.

Etapa	Precio (€)/hora		Nº horas	Total (€)
1	Becario	10	75	750
	Ingeniero Superior	90	5	450
2	Becario	10	210	2100
	Ingeniero Superior	90	10	900
3	Becario	10	225	2250
	Ingeniero Superior	90	10	900
Valoración total del estudio antes de impuestos				7350
21 % I.V.A.				1543,5
Valoración total final del estudio				8893,5

9.- EVALUACIÓN DE IMPACTOS.

La consecución del proyecto realizado supondría una serie de impactos en las comunidades en las que se instale, estos efectos no corresponden a una única dimensión, y debido a esta transversalidad se puede hablar principalmente de los siguientes impactos:

- Impacto medioambiental: debido a que el objetivo principal de este trabajo es la captación de agua mineral salada con un origen perjudicial para la vida de los acuíferos costeros, como es la intrusión marina, el empleo de esta para la producción de agua potable mediante el uso de energías renovables supone impactos muy positivos en el medio ambiente local.
- Impacto social: la necesidad de agua en las zonas de estudio provoca una disminución en los niveles de seguridad alimentaria, tanto por parte del consumo como por parte de las necesidades agrícolas y ganaderas.
- Impacto económico: a parte de los empleos generados en la investigación, desarrollo y construcción del sondeo. Su empleo en desaladoras provocaría una mayor cantidad de agua disponible para los cultivos, pues son un agente económico común en las ubicaciones seleccionadas.

10.- ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS LEGALES Y ÉTICOS PERTENECIENTES A SU ELABORACIÓN Y/O APLICACIÓN.

En cuanto al marco legislativo, se tiene que diferenciar entre la legislación estatal y la local para cada ubicación estudiada.

En cuanto a la legislación estatal:

- Real Decreto Legislativo 1/2001, del 20 de julio, en el que se aprueba la Ley de Aguas, que establece las aguas continentales subterráneas y los acuíferos como dominio público hidráulico.
- Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, por el que se modifica el Dominio Público Hidráulico, especialmente su Anexo III: Instrucciones básicas para la protección de las aguas subterráneas frente a la entrada de contaminantes.

Para el caso de la Región de Murcia:

- La normativa desarrollada por la Confederación Hidrográfica del Segura, establecida en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura.
- Las normas sobre contenidos esenciales de los proyectos de industria, energía y minas, realizadas por la Dirección General de Industria, Energía y Minas.

Para el caso del Campo de Dalías:

- Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, resolución de 21 de junio de 2022, consiste en un acuerdo de la Dirección General de Recursos Hídricos por el que se procede a hacer público el trámite de audiencia relativo al procedimiento de Constitución de Usuarios de la Masa de Agua Subterránea Campo de Dalías-Sierra de Gador (060.013).
- Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas 2022-2027, realizado por la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

Para el caso de la isla de Gran Canaria:

- Decreto 370/2023, de 18 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria, tercer ciclo (2021-2027).

En cuanto a los aspectos éticos del proyecto, este proyecto se ha realizado siguiendo los principios de profesionalidad propios de la ingeniería, garantizando la corrección técnica, la corrección de resultados y transparencia en hipótesis y metodologías empleadas.

Los resultados obtenidos se presentan con un enfoque estrictamente técnico y académico, evitando interpretaciones que puedan inducir a un uso inadecuado o fuera del ámbito previsto. Además, se han considerado estándares técnicos habituales en el sector, como las normas UNE empleadas, lo que facilita la aplicación en un escenario real.

En un contexto de aplicación real, la utilización de este proyecto debería realizarse bajo la supervisión de personal cualificado, asegurando que se tengan en cuenta las limitaciones del modelo y las condiciones reales de la operación en función de su localización. Garantizando un uso ético y responsable de las herramientas desarrolladas.

11.- CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se crearon con el propósito de acabar con todas las formas de pobreza y alcanzar un futuro sostenible. Este trabajo consigue cumplir con los siguientes objetivos:

- Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. Corresponde con el objetivo principal del proyecto, pues la generación de agua potable es esencial, sobre todo si se tienen en cuenta regiones áridas o propensas a sequías. Es un concepto clave para la seguridad alimentaria.
- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. La consecución del presente proyecto no se entiende sin el empleo de energías renovables, en especial la geotérmica. Además, supone un aumento en la eficiencia tanto por parte del consumo eléctrico como del consumo de energía térmica.
- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura. Pues se promueve una industrialización sostenible e innovadora, y apoya infraestructuras claves como el riego.
- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles. Comunidades de agricultores se podrían ver beneficiadas de esta forma de obtener agua potable para aumentar su producción de manera sostenible.
- Objetivo 12: Producción y consumo responsables. El aprovechamiento de la intrusión marina como recurso para generar agua potable y la energía geotérmica para reducir las necesidades térmicas del proceso son formas de producir y consumir agua potable de forma sostenible.
- Objetivo 13: Acción por el clima. El cambio climático genera episodios de sequía que reducen la cantidad disponible de aguas superficiales, lo que provoca una mayor explotación de acuíferos subterráneos, provocando intrusión marina en zonas costeras. El sondeo desarrollado en el presente trabajo permite generar agua potable y hacer retroceder a la intrusión marina.

12.- ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Diagrama simplificado del proceso de desalación multiefecto.	7
Figura 2: Representación de un acuífero costero en presencia de intrusión marina.	10
Figura 3: Representación de la sección transversal del sondeo.	13
Figura 4: Ubicación del municipio de Los Alcázares en la Región de Murcia.	14
Figura 5: Distribución espacial de las concentraciones medias anuales de nitrato en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrológica del Segura durante 2021.	16
Figura 6: Unidades hidrográficas de la Región de Murcia.	17
Figura 7: representación de los acuíferos mencionados en el Campo de Cartagena.	18
Figura 8: Penetración máxima de la intrusión marina en el acuífero cuaternario.	19
Figura 9: Ubicación del Campo de Dalías en la provincia de Almería.	20
Figura 10: Mapa del acuífero Balerna-Las Marinas con curvas de igual contenido en nitrato.	20
Figura 11: Situación y geografía de las unidades hidrogeológicas en el Campo de Dalías.	21
Figura 12: Modelo conceptual de los procesos hidrogeoquímicos reconocidos en la zona de estudio.	22
Figura 13: Tabla descriptiva de los materiales que componen el perfil hidrogeológico del Campo de Dalías.	22
Figura 14: Situación geográfica de la isla de Gran Canaria (resaltada) en el archipiélago canario.	23
Figura 15: Evolución del consumo, en hm ³ al año, de agua en Gran Canaria.	23
Figura 16: Mapa de isóneas de nitratos (<i>mg/l</i>) y ubicación de los pozos y sondeos del área de estudio en el año 2004.	24
Figura 17: Ubicación de la masa de agua estudiada (ES70GC005M) en la Isla de Gran Canaria.	25
Figura 18: Resultados de la simulación mediante el uso del código HYDROTHERM de las isoterms y los vectores de flujo en estado estacionario.	26
Figura 19: Discretización de la ecuación de difusión de calor.	30
Figura 20: Estado inicial del caso base del modelo de la intrusión marina.	32
Figura 21: Estado final del caso de extracción de agua dulce en el modelo de la intrusión marina.	33
Figura 22: Estado final del caso de extracción de agua salada en el modelo de la intrusión marina.	33
Figura 23: Representación del perfil térmico del subsuelo.	34
Figura 24: Evolución de la temperatura del agua mineral salada (en rojo) para el caso inicial a lo largo de la extracción en l tubería en comparación con la temperatura del terreno (en negro).	36
Figura 25: Evolución de la temperatura del agua mineral salada (en rojo) frente a la variación del caudal extraído a lo largo de la tubería en comparación con la temperatura del terreno (en negro).	37
Figura 26: Conductividad térmica del acero al carbón según la norma UNE-EN 1993-1-2:2011 [59].	38

Figura 27: Comparativa de la necesidad de potencia térmica adicional necesaria para calentar el caudal hasta los 70 °C en el Campo de Cartagena.	41
Figura 28: Estado del frente de intrusión marina antes de la extracción del agua mineral salada en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena.	43
Figura 29: Estado del frente de intrusión marina tras el primer año de extracción del agua mineral salada en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena.	43
Figura 30: Comparativa de la necesidad de potencia térmica adicional necesaria para calentar el caudal hasta los 70 °C en el Campo de Dalías.	45
Figura 31: Comparativa de la necesidad de potencia térmica adicional necesaria para calentar el caudal hasta los 70 °C en la isla de Gran Canaria.	48
Figura 32: Estado del frente de intrusión marina antes de la extracción del agua mineral salada en el acuífero de Gran Canaria.	49
Figura 33: Estado del frente de intrusión marina tras el primer año de extracción del agua mineral salada en el acuífero de Gran Canaria.	49

13.- ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Comparación de algunos de los métodos de destilación multiefecto y multietapa sobre determinados parámetros.	8
Tabla 2: Formato de los parámetros que respectan al perfil del suelo en el libro de Excel.	28
Tabla 3: Formato de los parámetros que respectan a las diferentes propiedades del acuífero.	28
Tabla 4: Formato de los parámetros de temperatura media mensual del mar.	28
Tabla 5: Formato de los parámetros de ubicación del sondeo.	28
Tabla 6: Datos geológicos utilizados para la validación del modelo del perfil térmico del suelo.	34
Tabla 7: Valores iniciales para comprobar el modelo de la pérdida de calor en la tubería.	35
Tabla 8: Resultado de las variables dependientes en el caso inicial.	35
Tabla 9: Resultado de las variables dependientes en caso de variar la conductividad térmica de la tubería.	36
Tabla 10: Resultado de las variables dependientes en caso de variar el caudal de extracción.	37
Tabla 11: Valores aplicados al software para el cálculo de las pérdidas térmicas.	38
Tabla 12: Resistencia térmica de los elementos empleados en el sondeo.	39
Tabla 13: Valores empleados en el modelo del conductividad y difusividad térmica para las distintas capas del subsuelo del Campo de Cartagena.	39
Tabla 14: Valores de los parámetros hidrodinámicos empleados.	40
Tabla 15: Parámetros hidrogeológicos del acuífero Cuaternario aplicados en el modelo.	40
Tabla 16: Temperatura media mensual del Mar Mediterráneo en la boya del Cabo de Palos.	41
Tabla 17: Ahorro de potencia térmica necesaria causado por la implementación del sondeo en el Campo de Cartagena.	42
Tabla 18: Valores empleados en el modelo del conductividad y difusividad térmica para las distintas capas del subsuelo del Campo de Dalías.	43
Tabla 19: Parámetros hidrogeológicos del acuífero Balerma - Las Marinas aplicados en el modelo.	44
Tabla 20: Temperatura media mensual del Mar Mediterráneo en la boya del Cabo de Gata.	44
Tabla 21: Ahorro de potencia térmica necesaria causado por la implementación del sondeo en el Campo de Dalías.	46
Tabla 22: Valores empleados en el modelo de conductividad y difusividad térmica para las distintas capas del subsuelo de la isla de Gran Canaria.	46
Tabla 23: Parámetros hidrogeológicos del acuífero de Gran Canaria.	47
Tabla 24: Temperatura media mensual del Océano Atlántico en la boya de Las Palmas Este.	47
Tabla 25: Ahorro de potencia térmica necesaria causado por la implementación del sondeo en Gran Canaria.	48
Tabla 26: Valoración económica del estudio.	59

ANEXO I: Programa empleado para la resolución general de los casos.

```

% ===== Localización, y cálculo y diseño de un sondeo profundo
para captación de agua =====
clc;
clear all;
close all;
% Datos
datos=readtable("ficha_cartagena.xlsx"); % En este caso obtiene de
Los Alcázares.
idx_capas=~isnan(datos.Profundidad);
profundidad=datos.Profundidad(idx_capas); % [m]
a_k_vec=datos.Difusividad(idx_capas); % [m2/s]
k_soil=datos.k_soil(~isnan(datos.k_soil)); % [W/mK]
k_soil=k_soil(1);
K=datos.K_hidr(~isnan(datos.K_hidr)); % [m/d]
K=K(1);
T=datos.T(~isnan(datos.K_hidr)); % [m2/d]
T=T(1);
S=datos.S(~isnan(datos.S)); % [-]
S=S(1);
Q0=datos.Q(~isnan(datos.Q)); % [m2/d]
Q0=Q0(1);

idx_temp=~isnan(datos.Temperatura);
temp_mar=datos.Temperatura(idx_temp); % [°C]

T_fluid=datos.Temp_recurso(~isnan(datos.Temp_recurso)); % [°C]
T_fluid=T_fluid(1);
W=datos.Ancho(~isnan(datos.Ancho)); % [m]
W=W(1);
L=datos.Distancia(~isnan(datos.Distancia)); % [m]

```

```
L=L(1);
L_recurso=datos.Prof_recurso(~isnan(datos.Prof_recurso));
L_recurso=L_recurso(1);

% Radios del sondeo en metros.
r_in=0.2225;
r_out=r_in+0.0125;
r_bore=r_out+0.05;
r_inf=r_bore+7;

% Conductividades térmicas, en W/mK.
k_pipe=52;
k_grout=0.6;

% Caudal a extraer.
Q_SI=0.02; % [m3/s]
v=Q_SI/(pi*r_in^2); % [m/s]
Q_ext=Q_SI*86400; % [m/d]

% Gradiente geotérmico local en °C/m.
gg=(T_fluid-20)/L_recurso;

% ---- Modelo de la intrusión marina ----
H=profundidad(end);
Nx=300;
Nz=200;
x=linspace(0,L,Nx);
z=linspace(0, -H,Nz);

gamma_d=1000; % Densidad agua dulce [kg/m3]
gamma_s=1025; % Densidad agua salada [kg/m3]
```

```
B=gamma_d/(gamma_s-gamma_d);

% Extracción en los pozos
Q_pozod=0; % Bombeo de agua dulce.
Q_pozos=Q_ext/W; % Bombeo del agua salada entre longitud de la
costa.
x_s=0; % Ubicación del pozo de extracción salada.
x_d=x_s+0.1*L; % Ubicación del pozo de extracción dulce.
% Tiempo de simulación.
dt=1;
Tmax=365;
Nt=Tmax/dt;

xprime=L-x;
Q=Q0;
Z=sqrt(2*B*Q.*xprime./K + (B*Q./K).^2);
z_front=-Z;

SAL_ini=zeros(Nz,Nx);
z_front_ini=zeros(1,length(z_front));

for t=1:Nt
Q_pozos_s=Q_pozos;

Q=Q0 - Q_pozod + Q_pozos_s;

Z_new=sqrt(2*B*Q.*xprime./K + (B*Q./K).^2);
alpha=0.1;
Z=(1-alpha)*Z+alpha*Z_new;
z_front=-Z;

SAL=zeros(Nz,Nx);
```

```

for i=1:Nx
SAL(z<= z_front(i),i)=1;
end

if t==1
SAL_ini=SAL;
z_front_ini=z_front;
end

end
SAL_fin=SAL;
z_front_fin=z_front;

[~,i_s]=min(abs(x-x_s));
delta_zfront=z_front_ini(i_s)-z_front_fin(i_s); % Retroceso del
frente de la intrusión marina
fprintf("El retroceso vertical de la intrusión marina es: %.2f \n",delta_zfront)
bs=H - abs(z_front_fin(i_s)); % Espesor estimado de la zona salada
que fluye
v_local=Q/bs; % Velocidad de Darcy promedio
i_local=v_local/K; % Gradiente hidráulico
fprintf("La velocidad de Darcy promedio es: %.4f m/d \n",v_local)
fprintf("El gradiente hidráulico promedio es: %.4f m/m \n",i_local)

v_ent=0.06; % Velocidad de entrada del agua a través de la sección
final del pozo.
L_s_req=Q_SI/(pi*r_in*0.2*v_ent); % Longitud de pantalla necesaria.

x0=Q0/(2*K*B); % Franja por la que escapa el agua al mar.
Z_long=ceil(abs(z_front_fin(i_s)-delta_zfront - L_s_req)); %
Longitud del sondeo.
fprintf("La profundidad estimada del sondeo es: %.2f metros
\n",Z_long)

```

```

figure % Representación de la intrusión marina en el momento
inicial.
imagesc(x,z, SAL_ini)
set(gca,"YDir","normal")
colormap([0 0.4 1;[0 0 0]])
hold on
line([x_d x_d],[0 -0.5*Z_long], "Color","g","LineWidth",8)
line([x_s x_s],[0 -Z_long], "Color","m","LineWidth",10)
h_interf=plot(x,z_front_ini,"r", "LineWidth",2);
h_d=plot(x_d,0,"go","MarkerFaceColor","g","MarkerSize",15);
h_s=plot(x_s,0,"mo","MarkerFaceColor","m","MarkerSize", 15);
title("Estado inicial del frente salino")
xlabel("Distancia(m)")
ylabel("Profundidad(m)")
h_acuifer=plot(nan,nan,"s","MarkerFaceColor",[0 0.4 1],
"MarkerEdgeColor",[0 0.4 1]);
h_intrusion=plot(nan,nan,"s", "MarkerFaceColor", [ 0 0
0],"MarkerEdgeColor",[0 0 0]);

legend([ h_acuifer h_intrusion h_interf h_d h_s], "Acuífero
subterráneo", "Intrusión Marina", "Interfaz", "Pozo de extracción
del acuífero", "Pozo de extracción del agua salada",
"Location","Southeast")

grid on
ax=gca;
ax.FontSize=14;

figure % Representación de la intrusión marina en el momento final.
imagesc(x,z, SAL_fin)
set(gca,"YDir","normal")
colormap([0 0.4 1;[0 0 0]])
hold on

```

```

line([x_d x_d],[0 -0.5*Z_long], "Color","g","LineWidth",8)
line([x_s x_s],[0 -Z_long], "Color","m","LineWidth",10)
h_interf=plot(x,z_front_fin,"r", "LineWidth",2);
h_d=plot(x_d,0,"go","MarkerFaceColor","g","MarkerSize",15);
h_s=plot(x_s,0,"mo","MarkerFaceColor","m","MarkerSize", 15);
title("Estado final del frente salino")
xlabel("Distancia(m)")
ylabel("Profundidad(m)")
h_acuifer=plot(nan,nan,"s","MarkerFaceColor",[0 0.4 1],
"MarkerEdgeColor",[0 0.4 1]);
h_intrusion=plot(nan,nan,"s", "MarkerFaceColor", [ 0 0
0],"MarkerEdgeColor",[0 0 0]);

legend([ h_acuifer h_intrusion h_interf h_d h_s], "Acuífero
subterráneo", "Intrusión Marina", "Interfaz", "Pozo de extracción
del acuífero", "Pozo de extracción del agua salada",
"Location","Southeast")

grid on
ax=gca;
ax.FontSize=14;

Nz=Z_long + 1;
Nr=Nz;
Nt=100;
Lr=Z_long;
r=linspace(0,Lr,Nr);
z=linspace(0,Z_long,Nz);
delta_sigma=r(2)-r(1);
delta_z=z(2)-z(1);
delta_tau=1;

% Vector difusividad
a_k_vec_grande=zeros(max(profundidad),1);
for jj=1:length(profundidad)

```

```
if jj==1
a_k_vec_grande(1:profundidad(jj))=a_k_vec(jj);
else
a_k_vec_grande(profundidad(jj-1)+1:profundidad(jj))=a_k_vec(jj);
end
end

B_r=zeros(Nr,Nz);
B_z=zeros(Nr,Nz);
for j=1:Nz
for i=1:Nr
if i==1
B_r(i,j)=a_k_vec_grande(j)*delta_tau./(delta_sigma).^2;
else
B_r(i,j)=a_k_vec_grande(j)*delta_tau./(r(i).*delta_sigma).^2;
end
end
end

% ---- Cálculo del perfil térmico del subsuelo ----
t=zeros(Nr,Nz);
t(:,1:9)=20; % El gradiente geotérmico no empieza a hacer efecto
hasta los 10 metros.
t(:,end)=20+gg*Z_long;
T_fluid=max(t(:,end));
t(:,10:Nz)=repmat(linspace(20,T_fluid,Nz-9),Nr,1);
for n=1:Nt
% Etapa 1: Dirección r (implícita en r, explícita en z)
t_half=t;
A=zeros(Nr,Nr);
b=zeros(Nr,1);
```

```

for j=2:Nz-1
for i=2:Nr-1
A(i,i-1)=-B_r(i,j);
A(i,i)=1+2*B_r(i,j);
A(i,i+1)=-B_r(i,j);
b(i)=B_z(i,j)*t(i,j-1)+(1-2*B_z(i,j))*t(i,j)+B_z(i,j)*t(i,j+1);
end
A(1,1)=1;
A(1,2)=0;
b(1)=t(1,j);
A(Nr,Nr)=1;
A(Nr,Nr-1)=0;
b(Nr)=t(Nr,j);

t_half(:,j)=A\b;
end
% Etapa 2: Dirección z (implícita en z, explícita en r)
t_new=t_half;

for i=2:Nr-1
A=zeros(Nz,Nz);
b=zeros(Nz,1);
A(1,1)=1;
A(1,2)=0;
b(1)=t_half(i,1);
A(Nz,Nz)=1;
A(Nz,Nz-1)=0;
b(Nz)=t_half(i,Nz);
for j=2:Nz-1
A(j,j-1)=-B_z(i,j);
A(j,j)=1+2*B_z(i,j);
A(j,j+1)=-B_z(i,j);

```

```

b(j)=B_r(i,j)*t_half(i-1,j)+(1-
2*B_r(i,j))*t_half(i,j)+B_r(i,j)*t_half(i+1,j);
end
t_new(i,:)=(A\b)';
end
t=t_new;
end

figure % Visualización del perfil térmico
imagesc(r,z,t');
xlabel("r(m)");
ylabel("z(m)")
colorbar;
title("Distribución de la temperatura t^{n+1}");
ax=gca;
ax.FontSize=14;

sondeo=round(Nr/2); % El sondeo se encuentra en la mitad del
terreno
vector_Z=t(sondeo,:);

figure % Representación del perfil de temperaturas del subsuelo
plot(r,vector_Z,"r","LineWidth",2)
xlabel("r(m)");
ylabel("T(°C)");
title("Perfil de temperaturas del subsuelo");
grid on
ax=gca;
ax.FontSize=14;

% ---- Pérdida de calor en tubería ----
T_in=T_fluid; % Agua que entra al pozo desde la intrusión marina
T_soil=vector_Z;

```

```

dz=Z_long/(Nz-1);
z_perd=linspace(0,H,Nz);
% Agua salada
mdot=Q_SI*gamma_s; % [kg/s]
cp=4180; % [J/kgK]
mu=0.0018; % [Pa·s]
k_f=0.61; % [W/mK]

A=pi*(r_in^2); % Sección de la tubería

Re=(4*mdot)/(pi*2*r_in*mu); % Número de Reynolds
Pr=(cp*mu)/k_f; % Número de Prandtl
Nu=0.023*(Re^0.8)*(Pr^0.4); % Número de Nusselt
h_i=Nu*k_f/(2*r_in) % Coeficiente de convección

% Resistencias térmicas
R_conv=1/(h_i*pi*2*r_in) % Convectiva
R_pipe=log(r_out/r_in)/(2*pi*k_pipe); % Tubería
R_grout=log(r_bore/r_out)/(2*pi*k_grout); % Cementación
R_soil=log(r_inf/r_bore)/(2*pi*k_soil); % Suelo

R_total=R_conv+R_pipe+R_grout+R_soil;

C_f=gamma_s*A*cp; % Caudal de capacidad calorífica

t_end=24*3600;
dt=1;
Nt=round(t_end/dt);

Tf=T_soil; % La temperatura del pozo es la misma que la del suelo

```

```

Tf_new=Tf;

for n=1:Nt
Tf_new(end)=T_in;
for i=1:Nz-1
adv=-v*dt/dz*(Tf(i)-Tf(i+1)); % Componente advectivo de las
pérdidas
loss=dt/(C_f*R_total)*(T_soil(i)-Tf(i));
Tf_new(i)=Tf(i)+adv+loss;
end
Tf=Tf_new;
end

T_out=Tf(1); % Temperatura del agua tras su paso por la tubería
Q_loss=mdot*cp*(T_in-T_out); % Pérdida de calor a lo largo de la
tubería

figure % Representación gráfica de la evolución de la temperatura
de fluido a lo largo de la tubería
prof=1:Z_long +1;
plot(prof,Tf,"r","LineWidth",2);
hold on
plot(prof,T_soil,"k--","LineWidth",2)
xlabel("Profundidad [m]")
ylabel("Temperatura [°C]")
legend("Agua mineral salada", "Terreno", "Location", "southeast",
"FontSize",18)
grid on
ax=gca;
ax.FontSize=14;
hold off
fprintf("La temperatura de salida es: %.2f °C\n",T_out)
fprintf("La pérdida de calor a lo largo de la tubería es: %.2f kW
\n",Q_loss/1000)

```

```

% ---- Comparativa de métodos ----

E_MEF_conv=zeros(1,length(temp_mar));
for x=1:length(temp_mar)
E_MEF_conv(x)=mdot*cp*(70-temp_mar(x))/1000;
end

E_MEF_opt=zeros(1,length(temp_mar(x)));
for y=1:length(temp_mar)
E_MEF_opt(y)=mdot*cp*(70-T_out)/1000;
end

meses=["Enero" "Febrero" "Marzo" "Abril" "Mayo" "Junio" "Julio"
"Agosto" "Septiembre" "Octubre" "Noviembre" "Diciembre"];

figure % Representación en gráfico de barras del ahorro
bar(1:12,[E_MEF_conv' E_MEF_opt'], "grouped")
set(gca,"XTick",1:12,"XTickLabel",meses)
legend("Agua del mar","Agua mineral salada","FontSize",14)
xlabel("Mes")
ylabel("Potencia (kW)")
ylim([0 1.2*max(E_MEF_conv)])
title("Comparación mensual de energía para el año 2022")
grid on
ax=gca;
ax.FontSize=14;

Ahorro=((E_MEF_conv-E_MEF_opt)./E_MEF_conv).*100;

% ----Bomba ----
H_g=Z_long; % Altura geométrica

```

```
f=0.316*Re^(-0.25); % Factor de fricción
D_in=2*r_in;
g=9.81; % Aceleración de la gravedad
H_perd=f*(Z_long/D_in)*(v^2)/(2*g);
H_m=1.2*(H_g+H_perd); % Altura manométrica, 20 % factor de
seguridad
eta_e=0.7; % Rendimiento eléctrico de la bomba

P_e=((gamma_s*g*Q_SI*H_m)/eta_e)/1000; % Potencia eléctrica de la
bomba
fprintf("La potencia estimada de la bomba es: %.2f kW \n",P_e)
```

ANEXO II: Programa modificado para el Campo de Dalías.

```

% ===== Localización, y cálculo y diseño de un sondeo profundo
para captación de agua =====
% Caso especial: Campo de Dalías.
clc;
clear all;
close all;
% Datos
datos=readtable("ficha_dalias.xlsx");
idx_capas=~isnan(datos.Profundidad);
profundidad=datos.Profundidad(idx_capas); % [m]
a_k_vec=datos.Difusividad(idx_capas); % [m2/s]
k_soil=datos.k_soil(~isnan(datos.k_soil)); % [W/mK]
k_soil=k_soil(1);
K=datos.K_hidr(~isnan(datos.K_hidr)); % [m/d]
K=K(1);
T=datos.T(~isnan(datos.K_hidr)); % [m2/d]
T=T(1);
S=datos.S(~isnan(datos.S)); % [-]
S=S(1);
Q0=datos.Q(~isnan(datos.Q)); % [m2/d]
Q0=Q0(1);

idx_temp=~isnan(datos.Temperatura);
temp_mar=datos.Temperatura(idx_temp); % [°C]

T_fluid=datos.Temp_recurso(~isnan(datos.Temp_recurso)); % [°C]
T_fluid=T_fluid(1);
W=datos.Ancho(~isnan(datos.Ancho)); % [m]
W=W(1);

```

```
L=datos.Distancea(~isnan(datos.Distancea)); % [m]
L=L(1);
L_recurso=datos.Prof_recurso(~isnan(datos.Prof_recurso));
L_recurso=L_recurso(1);

% Radios del sondeo en metros.
r_in=0.2225;
r_out=r_in+0.0125;
r_bore=r_out+0.05;
r_inf=r_bore+7;

% Conductividades térmicas, en W/mK.
k_pipe=52;
k_grout=0.6;

% Caudal a extraer.
Q_SI=0.02; % [m3/s]
v=Q_SI/(pi*r_in^2); % [m/s]
Q_ext=Q_SI*86400; % [m/d]

% Gradiente geotérmico local en °C/m.
gg=(T_fluid-20)/L_recurso;
gamma_s=1025; % Densidad agua salada [kg/m3]

N=ceil(L_recurso)+1;
dz=L_recurso/(N-1);
z_perd=linspace(0,L_recurso,N);
T_in=T_fluid;

t=zeros(1,N);
t(1:9)=20;
```

```

t(end)=20+gg*L_recurso;
t(10:end)=linspace(20,T_fluid,N-9);
T_soil=t;

% ---- Pérdida de calor en tubería ----
T_in=T_fluid; % Agua que entra al pozo desde la intrusión marina

dz=L_recurso/(N-1);
z_perd=linspace(0,L_recurso,N);
% Agua salada
mdot=Q_SI*gamma_s; % [kg/s]
cp=4180; % [J/kgK]
mu=0.0018; % [Pa·s]
k_f=0.61; % [W/mK]

A=pi*(r_in^2); % Sección de la tubería

Re=(4*mdot)/(pi*2*r_in*mu); % Número de Reynolds
Pr=(cp*mu)/k_f; % Número de Prandtl
Nu=0.023*(Re^0.8)*(Pr^0.4); % Número de Nusselt
h_i=Nu*k_f/(2*r_in); % Coeficiente de convección

% Resistencias térmicas
R_conv=1/(h_i*pi*2*r_in); % Convectiva
R_pipe=log(r_out/r_in)/(2*pi*k_pipe); % Tubería
R_grout=log(r_bore/r_out)/(2*pi*k_grout); % Cementación
R_soil=log(r_inf/r_bore)/(2*pi*k_soil); % Suelo

R_total=R_conv+R_pipe+R_grout+R_soil;

```

```

C_f=gamma_s*A*cp; % Caudal de capacidad calorífica

t_end=24*3600;
dt=1;
Nt=round(t_end/dt);

Tf=T_soil; % La temperatura del pozo es la misma que la del suelo
Tf_new=Tf;

for n=1:Nt
Tf_new(end)=T_in;
for i=1:N-1
adv=-v*dt/dz*(Tf(i)-Tf(i+1)); % Componente advectivo de las
pérdidas
loss=dt/(C_f*R_total)*(T_soil(i)-Tf(i));
Tf_new(i)=Tf(i)+adv+loss;
end
Tf=Tf_new;
end

T_out=Tf(1); % Temperatura del agua tras su paso por la tubería
Q_loss=mdot*cp*(T_in-T_out); % Pérdida de calor a lo largo de la
tubería

figure % Representación gráfica de la evolución de la temperatura
de fluido a lo largo de la tubería
plot(z_perd',Tf,"r","LineWidth",2);
hold on
plot(z_perd',T_soil,"k--","LineWidth",2)
xlabel("Profundidad [m]")
ylabel("Temperatura [°C]")
legend("Agua mineral salada", "Terreno", "Location", "southeast",
"FontSize",18)

```

```

grid on
ax=gca;
ax.FontSize=14;
hold off
fprintf("La temperatura de salida es: %.2f °C\n",T_out)
fprintf("La pérdida de calor a lo largo de la tubería es: %.2f kW
\n",Q_loss/1000)

% ---- Comparativa de métodos ----

E_MEF_conv=zeros(1,length(temp_mar));
for x=1:length(temp_mar)
E_MEF_conv(x)=mdot*cp*(70-temp_mar(x))/1000;
end

E_MEF_opt=zeros(1,length(temp_mar(x)));
for y=1:length(temp_mar)
E_MEF_opt(y)=mdot*cp*(70-T_out)/1000;
end

meses=["Enero" "Febrero" "Marzo" "Abril" "Mayo" "Junio" "Julio"
"Agosto" "Septiembre" "Octubre" "Noviembre" "Diciembre"];

figure % Representación en gráfico de barras del ahorro
bar(1:12,[E_MEF_conv' E_MEF_opt'], "grouped")
set(gca,"XTick",1:12,"XTickLabel",meses)
legend("Agua del mar","Agua mineral salada","FontSize",14)
xlabel("Mes")
ylabel("Potencia (kW)")
ylim([0 1.2*max(E_MEF_conv)])
title("Comparación mensual de energía para el año 2022")
grid on

```

```
ax=gca;
ax.FontSize=14;

Ahorro=((E_MEF_conv-E_MEF_opt)./E_MEF_conv).*100;

% ----Cálculo para la bomba ----
H_g=L_recurso; % Altura geométrica
f=0.316*Re^(-0.25); % Factor de fricción
D_in=2*r_in;
g=9.81; % Aceleración de la gravedad
H_perd=f*(L_recurso/D_in)*(v^2)/(2*g);
H_m=1.2*(H_g+H_perd); % Altura manométrica, 20 % factor de
seguridad
eta_e=0.7; % Rendimiento eléctrico de la bomba

P_e=((gamma_s*g*Q_SI*H_m)/eta_e)/1000; % Potencia eléctrica de la
bomba
fprintf("La potencia estimada de la bomba es: %.2f kW \n",P_e)
```

ANEXO III: Fichas Excel utilizadas con la información de cada ubicación.

Ficha del Campo de Cartagena:

Capa	Profundidad	Difusividad	k_soil	K_hidr	T	S	Q	Mes	Temperatura	Temp_recurso	Distancia	Ancho	Prof_recurso
No saturado	15.00	0.00	2.00	2.10	315.00	0.65	0.32	Enero	15.36	30	300	73000	150
Cuaternario	150.00	0.00						Febrero	15.00				
								Marzo	15.13				
								Abril	15.47				
								Mayo	18.70				
								Junio	23.32				
								Julio	26.90				
								Agosto	27.51				
								Septiembre	26.21				
								Octubre	23.91				
								Noviembre	21.27				
								Diciembre	17.75				

Ficha del Campo de Dalías:

Capa	Profundidad	Difusividad	k_soil	K_hidr	T	S	Q	Mes	Temperatura	Temp_recurso	Distancia	Ancho	Prof_recurso
Calcarenitas	75	0.0000008	2.1	0.086	190	0.04	0.292	Enero	15.29	35	5000	37500	600
Margas	575	0.00000105						Febrero	15.24				
Calizas	1575	0.00000099						Marzo	15.35				
								Abril	15.75				
								Mayo	18.52				
								Junio	20.53				
								Julio	24.18				
								Agosto	24.99				
								Septiembre	22.36				
								Octubre	21.1				
								Noviembre	18.22				
								Diciembre	17.03				

Ficha de Gran Canaria:

Capa	Profundidad	Difusividad	k_soil	K_hidr	T	S	Q	Mes	Temperatura	Temp_recurso	Distancia	Ancho	Prof_recurso
Depósitos aluviales	114	0.000000286	1.8	0.8	10	0.015	0.408	Enero	19.56	60	2500	41000	600
Basaltos	614	0.00000075						Febrero	19.55				
								Marzo	19.09				
								Abril	19.38				
								Mayo	20.59				
								Junio	21.64				
								Julio	22.39				
								Agosto	23.23				
								Septiembre	24.11				
								Octubre	23.92				
								Noviembre	23.25				
								Diciembre	21.89				