

05-017

GIS BASED METHODOLOGY FOR MAPPING AND ASSESSMENT OF THE SHALLOW GEOTHERMAL POTENTIAL IN THE REGION OF MURCIA (SPAIN)

Ramos Escudero, Adela⁽¹⁾; García Cascales, Socorro⁽¹⁾; Urchueguía, Javier F⁽²⁾

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Cartagena, ⁽²⁾Universitat Politècnica de València

Ground Source Heat Pump (GSHP) is a low carbon heating and cooling technology which can make an important contribution to the CO₂ reduction targets set by the European Union. The economic and technical suitability of this technology strongly depends on the thermal and hydrogeological properties of the ground, which determine the shallow geothermal potential at the installation site. A new methodology has been created which is capable of assessing quantitatively this potential and to determine those areas where both the highest economic as well as environmental benefits can be expected. The spatial analysis, based on Geographical Information System (GIS), uses various input layers on e.g. thermal properties and hydrogeological parameters, to assess the shallow geothermal potential and to identify the optimum areas for its exploitation through GSHP (high shallow geothermal potential, housing target areas or high population density among others). The Region of Murcia (Spain) has been selected as a case study, however, this methodology is applicable to other areas where this decision making tool can improve the integration of shallow geothermal energy investments in local energy efficiency programs.

Keywords: *Shallow geothermal potential; Geographical Information System (GIS); Ground Source Heat Pump (GSHP); decision-making tool; energy efficiency.*

METODOLOGÍA BASADA EN SIG PARA EL MAPEADO Y VALORACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO SUPERFICIAL EN LA REGIÓN DE MURCIA (ESPAÑA)

Las bombas de calor geotérmicas (BCG) son una tecnología baja en carbono que contribuyen de forma significativa a alcanzar los objetivos de reducción de CO₂ establecidos por la Unión Europea. Su idoneidad económica y técnica depende considerablemente de las características térmicas e hidrogeológicas del suelo, las cuales determinarán el potencial geotérmico superficial donde se van a instalar. Para su valoración, se ha desarrollado una metodología que permite evaluar cuantitativamente este potencial y determinar aquellas zonas donde su explotación conlleva mayores beneficios económicos y medioambientales. Para ello, se propone un estudio y análisis espacial basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde se utilizan varias capas de datos de entrada (propiedades térmicas, hidrogeología, etc.) para calcular y mostrar los datos de salida (potencial geotérmico) permitiendo realizar un estudio espacial de las zonas óptimas para su explotación mediante BCG (alto potencial geotérmico, nuevas zonas urbanizables, alta densidad de población, etc.). Esta metodología servirá como herramienta de toma de decisiones para mejorar los programas de eficiencia energética a nivel regional y para instaladores de energía geotérmica a nivel particular y la cual puede ser replicada a cualquier área, presentando para ello a la Región de Murcia como caso de estudio.

Palabras clave: *Potencial geotérmico superficial; Sistema de Información Geográfico (SIG); Bomba de Calor Geotérmica (BCG); toma de decisiones; eficiencia energética*

Correspondencia: Adela Ramos Escudero adela.ramos.escudero@gmail.com; Socorro García Cascales socorro.garcia@upct.es

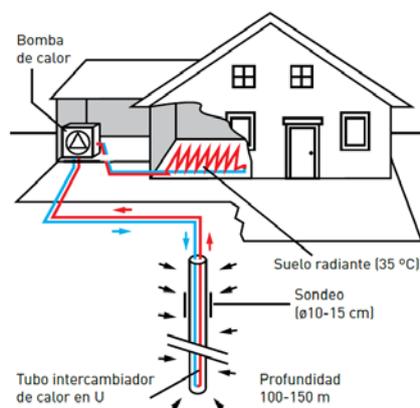


©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La energía geotérmica como fuente de energía medioambientalmente sostenible y con emisiones de gases mucho más bajas que los sistemas de energías convencionales cuenta con tres diferentes aplicaciones que incluyen: generación de electricidad, climatización directa y climatización a través de las Bombas de Calor Geotérmicas (BCG). Las BCG intercambian calor con el suelo superficial, que es considerado como un gran reservorio de energía, y lo hacen a través de pozos de intercambiadores de calor donde un fluido intercambia calor con el suelo circulando en pozos verticales. Ver Figura 1.

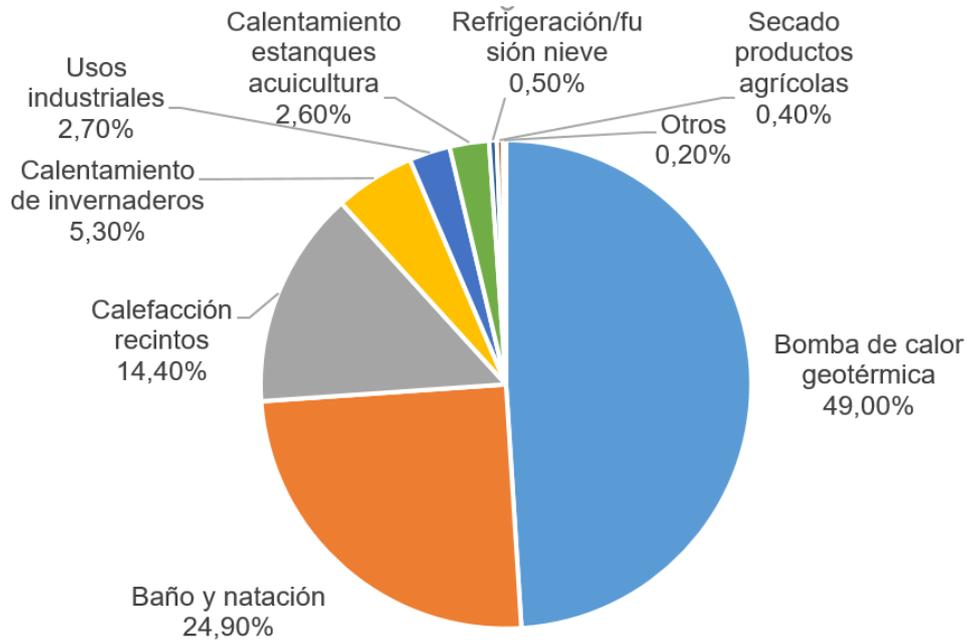
Figura 1. Esquema de un sistema de climatización con BCG



El uso directo de la energía geotérmica se está incrementando en todo el mundo y en término de número de instalaciones, capacidad instalada y energía producida, el mercado de las BCG, dentro del campo de la energía geotérmica superficial, es el mayor de ellos con diferencia (Figura 2). No obstante, la tasa de crecimiento en Europa de este mercado está disminuyendo del 10% al 2% en los últimos 5 años: se consiguió a finales de 2015 una capacidad de más de 20 GWt, distribuida en más de 1,7 millones de instalaciones en Europa, siendo Suecia, Alemania, Francia y Suiza los países que poseen el mayor número ya que cuentan con más del 70% de la capacidad instalada (Figura 3).

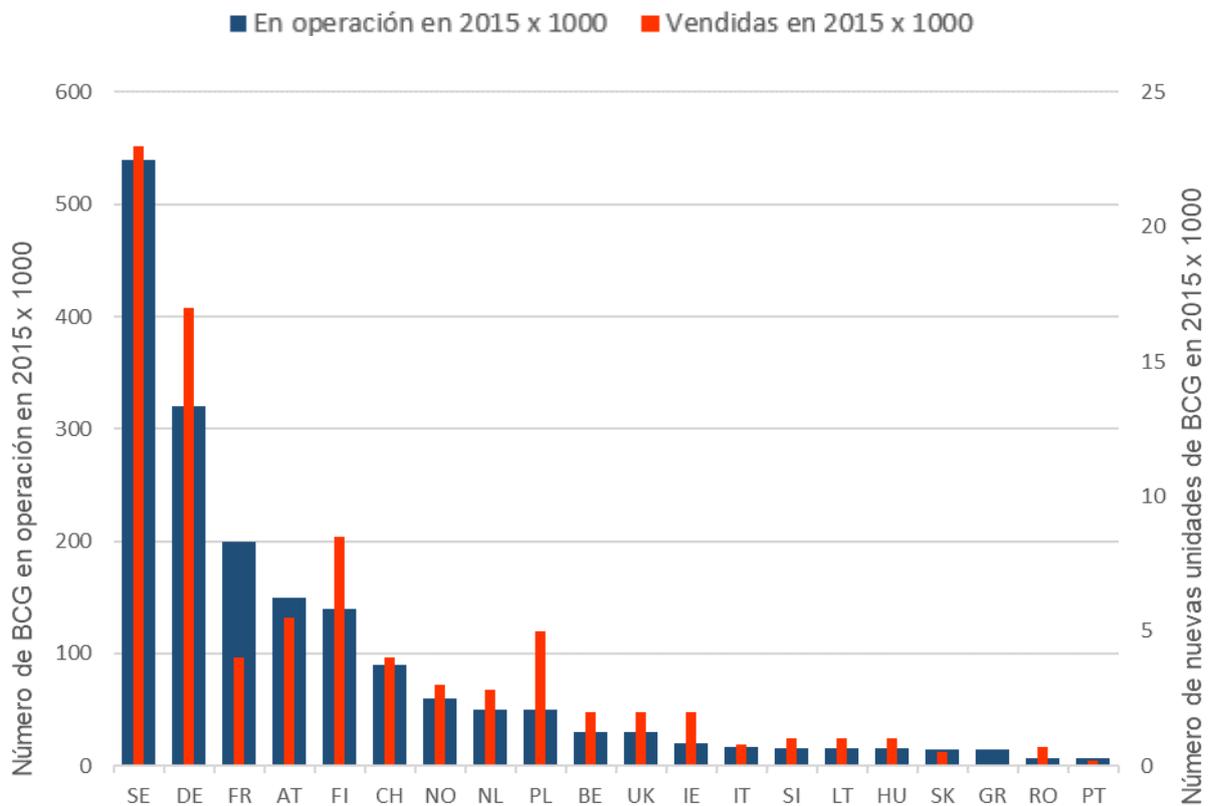
En España, la capacidad instalada se estima en 141 MWt y una utilización anual de 190 Gwh/año (Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE) y se espera que para el 2020 la capacidad instalada esté entre 247 a 1.379 MWt, según el escenario de evolución que se considere. Para que esto suceda, el IDAE propone como medidas de fomento y desarrollo el aprovechamiento a corto plazo de los recursos geotérmicos, la simplificación de los trámites jurídico-administrativos de las instalaciones, la facilitación de la financiación de las instalaciones, más medidas de difusión y, por último, medidas para la mejora del conocimiento del recurso geotérmico.

Figura 2. Energía geotérmica utilizada en usos directos e indirectos en el mundo en 2010



Fuente: Evaluación del Potencial de la Energía Geotérmica. IDAE.

Figura 3. Número de unidades de BCG instaladas y nuevas instaladas en 2015 en Europa.



Fuente: EGEC Geothermal Market Report 2016. Key findings.

Así pues, el presente trabajo se centra en el estudio y aplicación de los sistemas climatización que aprovechan la energía geotérmica superficial (de circuito cerrado) con el objetivo de aumentar su uso y que se postule como una energía renovable económica y técnicamente viable siguiendo las medidas de fomento y desarrollo propuestas por IDAE. Para tal fin, se presenta una metodología que valora especialmente el potencial geotérmico superficial basado en un sistema de información geográfico GIS (Geographical Information System), que destaca las dependencias espaciales en la distribución de los recursos geotérmicos. Aunque ya se han desarrollado algunas metodologías que permiten la valoración de este potencial, ninguna de ellas permite ser aplicada en diferentes escalas. Además, las escalas más utilizadas han llegado a cubrir zonas a nivel regional y nunca a nivel nacional o continental. En este trabajo, la metodología podrá ser aplicada en zonas de estudio que van desde escala regional a escala continental, lo cual permitirá comparar resultados entre los distintos países.

El modelo además estará basado en una valoración práctica de este potencial obtenido desde parámetros físicos que consistirá en el análisis de una serie de factores técnicos y económicos que permitirá evaluar la actual accesibilidad de los territorios a este tipo de energía. El modelo también permitirá valorar de forma segmentada aquellos aspectos que a nivel normativo están ralentizando el despliegue del uso de estos sistemas. De igual forma, mediante Métodos de Decisión Multicriterio MCDM (Multi-Criteria Decision Making) se determinará cuáles son las zonas donde el aprovechamiento de este tipo de energía conlleva los mayores beneficios, así como los elementos que permitan una óptima aplicación de la tecnología.

En el punto 2 del presente artículo se detallan los objetivos principales del trabajo. En el punto 3, se desarrolla el estado del arte que se ha realizado hasta el momento de redacción del presente artículo. En el punto 4 se desarrolla la metodología propuesta para la realización de dicho trabajo. En el punto 5 se reflejan las conclusiones a las que se ha llegado y por último, en el punto 6 se detallan las referencias principales utilizadas durante el desarrollo del presente trabajo.

2. Objetivos

El principal objetivo es dar visualización al potencial que la energía geotérmica superficial posee como recurso sostenible renovable local y que puede reducir las emisiones de CO₂ significativamente en el sector de las energías térmicas. No solo se pretende apoyar su uso sino realzar la conversión del consumo a energías renovables entre los usuarios, empresarios y tomadores de decisiones que realizan las planificaciones energéticas a nivel local, nacional y europeo.

Así, los resultados de la investigación pretenden ser de utilidad entre los tomadores de decisiones de las políticas energéticas a nivel europeo, al ser el único modelo aplicable a escala continental que permitirá evaluar los recursos geotérmicos superficiales de manera homogénea. Ello permitirá una cuantificación, tanto a efectos de ahorro de emisiones como de producción de EERR, de diferentes áreas en Europa en el contexto de las Directivas que fomentan la decarbonización de los distintos sectores energéticos.

Por último, señalar que el presente trabajo se enmarca en las actividades del paquete de trabajo 1 del Proyecto Europeo H2020 GEOCOND (Advanced materials and processes to improve performance and cost-efficiency of Shallow Geothermal systems and Underground Thermal Storage) que se centra en el desarrollo de novedosos materiales para los SBCG (Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas), tanto para las tuberías de plástico de los intercambiadores, los material de relleno entre el intercambiador y el suelo e incluyendo la posible utilización de materiales de cambio de fase en tales rellenos.

3. Estado del arte

Una de las grandes problemáticas actuales a nivel mundial es la emisión de gas de efecto invernadero que se vierten diariamente a la atmósfera. Las políticas de reducción de estos gases en la UE y el objetivo de mantener el incremento global de las temperaturas en 2°C compromete a la UE y sus estados miembros a la reducción de sus emisiones hasta al menos el 20% de los niveles de 1990-2020 y de 80-95% para 2050 (Köhler, 2012). Una gran parte de las emisiones actuales están relacionadas con la vivienda y construcción (Faber, Sevenster, & Markowska, 2012)

En este sentido, el sector residencial posee un ahorro potencial de emisiones de CO₂ del 90% para 2050 que podría alcanzarse mediante la inserción de las nuevas tecnologías para las viviendas pasivas y la sustitución de las energías fósiles por la electricidad y las renovables (Faber et al., 2012).

Así, la Directiva del Rendimiento Energético de Edificios, legislación principal europea de eficiencia energética en edificios, aboga por el uso de bombas energéticas y energías renovables y la Agencia Internacional de la Energía (IAE) recomienda la instalación de bombas de calor para climatización de viviendas como una prioridad inmediata.

Los SBCG utilizan una tecnología madura que ha sido ampliamente utilizada en viviendas para climatización y producción de ACS (Migliani, Orehounig, & Carmeliet, 2018) debido a su gran potencial de ahorro de gases de efecto invernadero (entre el 15 y el 77% en comparación con los sistemas de climatización convencionales, dependiendo del origen de la energía utilizada (Blum, Campillo, Münch, & Kölbl, 2010) y de reducción de la contaminación en zonas urbanas (Casasso & Sethi, 2016) debido a su alto rendimiento (COP) (Saner et al., 2010) lo que las convierte en una atractiva opción para conseguir los objetivos energéticos marcados por la UE. Entre los SBCG existentes, los sistemas de bucle cerrado con intercambiadores verticales son los más utilizados y disfrutan de un mayor despliegue en la EU con un número aproximado de 1,4 millones de bombas instaladas (EGEC, 2016) representando una capacidad instalada de aproximadamente 16,5 MWth.

Según el *World Geothermal Congress Report* de 2010, la capacidad mundial de las Bombas de Calor Geotérmicas (BCG) se ha incrementado 6,28 veces de 2000 a 2009 (Lund & Boyd, 2016) pero, aunque es una tecnología económicamente viable, aún sigue siendo una de las energías renovables menos explotadas. Una de las barreras que más limita la difusión de las instalaciones geotérmicas superficiales es la falta de conocimiento acerca de la idoneidad de los terrenos para tal fin debido a que el potencial geotérmico superficial depende de las propiedades térmicas e hidrogeológicas de cada ubicación en particular (Casasso & Sethi, 2016). No obstante, estas características se pueden conocer mediante la realización de costosos TRT's (Tests de Respuesta Térmica) aunque solo aportan conocimiento del punto concreto donde se realiza la prueba.

Aparte de esto, existen numerosas metodologías desarrolladas que permiten valorar el potencial geotérmico superficial, la mayoría de ellas basadas en estudios espaciales regionales de las propiedades térmicas e hidrogeológicas del terreno realizados en GIS (*Geographical Information System*), herramienta que permiten decidir de forma eficaz y a bajo coste dónde invertir (Somogyi, Sebestyén, & Nagy, 2017).

La Norma alemana VDI 4640 es muy utilizada en todas estas metodologías la cual ofrece el valor del potencial de calor extraíble (W/m) para diferentes tipos de litologías considerando dos tipos perfiles de uso (1.800 y 2.400 horas de uso al año).

En este sentido, (Galgaro et al. 2015) desarrollaron una metodología donde evaluaban la viabilidad tecno-económica de los SBGC que aplicaron en 4 regiones del sur de Italia (Campania, Apulia, Calabria y Sicilia) para calefacción y refrigeración, basada en simulaciones de transferencia de calor para la calibración de correlaciones empíricas válidas solo en el territorio mapeado. El producto final fue el mapa del máximo calor intercambiable con el suelo evaluado en base a condiciones geológicas y climáticas y de demanda energética de los edificios. (Gemelli et al., 2011) adoptaron también la normativa alemana para asesorar el potencial de los SBGC en la región de Marche en Italia, estimando que es necesaria una longitud de los pozos intercambiadores de calor (BHE, *Boreholes heat exchangers*) que varía en el rango de 60 a 160 metros para satisfacer una carga de demanda térmica de 5 kW.

El Departamento de Energía y Cambio Climático del Reino Unido también ofrece tablas de referencia para evaluar el potencial geotérmico superficial de sistemas de bucle cerrado verticales y horizontales (Curtis, Pine, & Wickins, 2013) en función de la longitud de la estación de calefacción, la conductividad térmica y la temperatura del suelo. Posteriormente (García-Gil et al. 2015) estudiaron el potencial de SBGC y de los BHE en el área metropolitana de Barcelona con un método que cuantificaba la potencia térmica máxima por unidad de superficie que puede ser intercambiada con el suelo en un área urbana tan densamente poblada como esa. (Cassaso et al. 2016) desarrollaron el modelo G.POT. basado en un modelo simplificado de transferencia de calor del BHE en un medio puramente conductivo basado en datos geológicos, hidrogeológicos y topográficos disponibles y que aplicaron a la provincia de Cuneo en Italia. También (Schiel et al. 2016) desarrollaron un modelo espacial para determinar el potencial geotérmico en función de la demanda de calefacción y de ACS de cada edificio y del potencial de extracción de calor específico para cada parcela que, junto con el espacio disponible por parcela para los BHE, permite calcular el porcentaje de la demanda de energía que puede ser suministrada y el potencial de reducción de las emisiones de CO₂. (Luo et al. 2018) investigaron el potencial geotérmico superficial en la ciudad china de Wuhan para distintos sistemas: sistemas de bombas de calor de agua superficial (SWHP, *Surface water heat pump system*), sistemas de bombas de calor para agua subterránea (GWHP, *Groundwater heat pump system*) y sistemas de bombas de calor con intercambiador enterrado (GCHP, *Ground coupled heat exchanger*) a través del estudio de las propiedades geológicas, climáticas, caudal de aguas subterráneas para SWHP y GWHP y la conductividad térmica para GCHP. (Noorollahi et al. 2017) desarrollaron una metodología espacial que incluye una modelización numérica y optimización de los SBGC a nivel regional y que a través de una interpolación espacial escalaron a todo el país para conseguir un mapa donde las 234 ciudades en Irán resultaron categorizadas en 5 grupos en función de la conveniencia de cada región para el uso de la energía geotérmica superficial. (Galgaro et al. 2017) también desarrollaron una metodología específica para sistemas verticales de bucle cerrado en base a información geológica y tecnológica que aplicaron a varias regiones del sur de Italia resultando en mapas GIS de potencial geotérmico por unidad de espacio (kW/m²).

Ahora bien, todas las metodologías recién mencionadas se basan en el estudio espacial a nivel local o regional, pero hasta la fecha ninguna investigación ha aplicado su modelo a escala nacional, a excepción de (Noorollahi et al. 2015) que extrapola a nivel nacional los datos obtenidos regionalmente. La obtención de resultados con una misma metodología aplicados a una zona más amplia, que incluyera diferentes países, permitiría la comparación de los resultados entre sí para determinar y evaluar las debilidades y fortalezas de cada país en cuanto al avance de los SBGC con el objetivo de corregir las debilidades y copiar los modelos de los países más fuertes en cuanto a ahorros, normativas, subvenciones, aplicaciones, etc. por parte de los tomadores de decisiones.

Para evaluar alternativas y resolver problemas sobre energía, los tomadores de decisiones suelen aplicar de forma efectiva los Métodos de Decisión Multi-Criterio (MCDM Multicriterio Decision Making) como herramientas científicas (Kaya, Çolak, & Terzi, 2018) siendo el método AHP (Analytic Hierarchy Process) el más utilizado (Chatzimouratidis & Pilavachi, 2008). (Al Garni et al. 2018) aplicaron un sistema de decisión multicriterio para evaluar las fuentes de generación renovables en Arabia Saudí, cuyo estudio concluyó que la aplicación de MCDM no solo facilita la inclusión de criterios sociales, políticos y medioambientales en el proceso de decisión para la promoción del uso de las energías renovables sino que además apoya la involucración de diferentes actores, lo cual implica un mayor consenso, aceptabilidad, reparto justo de responsabilidad y resultados creíbles. (Sánchez-Lozano et al. 2017) determinaron las zonas óptimas de localización de plantas solares en el sureste español mediante herramientas GIS y MCDM. De igual forma, varios han sido los autores que han utilizado MCDM junto con GIS para realizar exploraciones iniciales geotermales y así poder estrechar la búsqueda de zonas potenciales, como es el caso de (Yalcin et al. 2017) que utilizaron MCDM junto con GIS en la cuenca Akarcay, en Turquía, usando AHP en la etapa de análisis de decisión y un método de comparación por pares para determinar el peso relativo de cada criterio. Sin embargo, estas dos herramientas juntas no han sido utilizadas hasta la fecha para determinar zonas potenciales de aprovechamiento geotérmico superficial, sino que la mayoría de autores aplican únicamente herramientas GIS para tal fin.

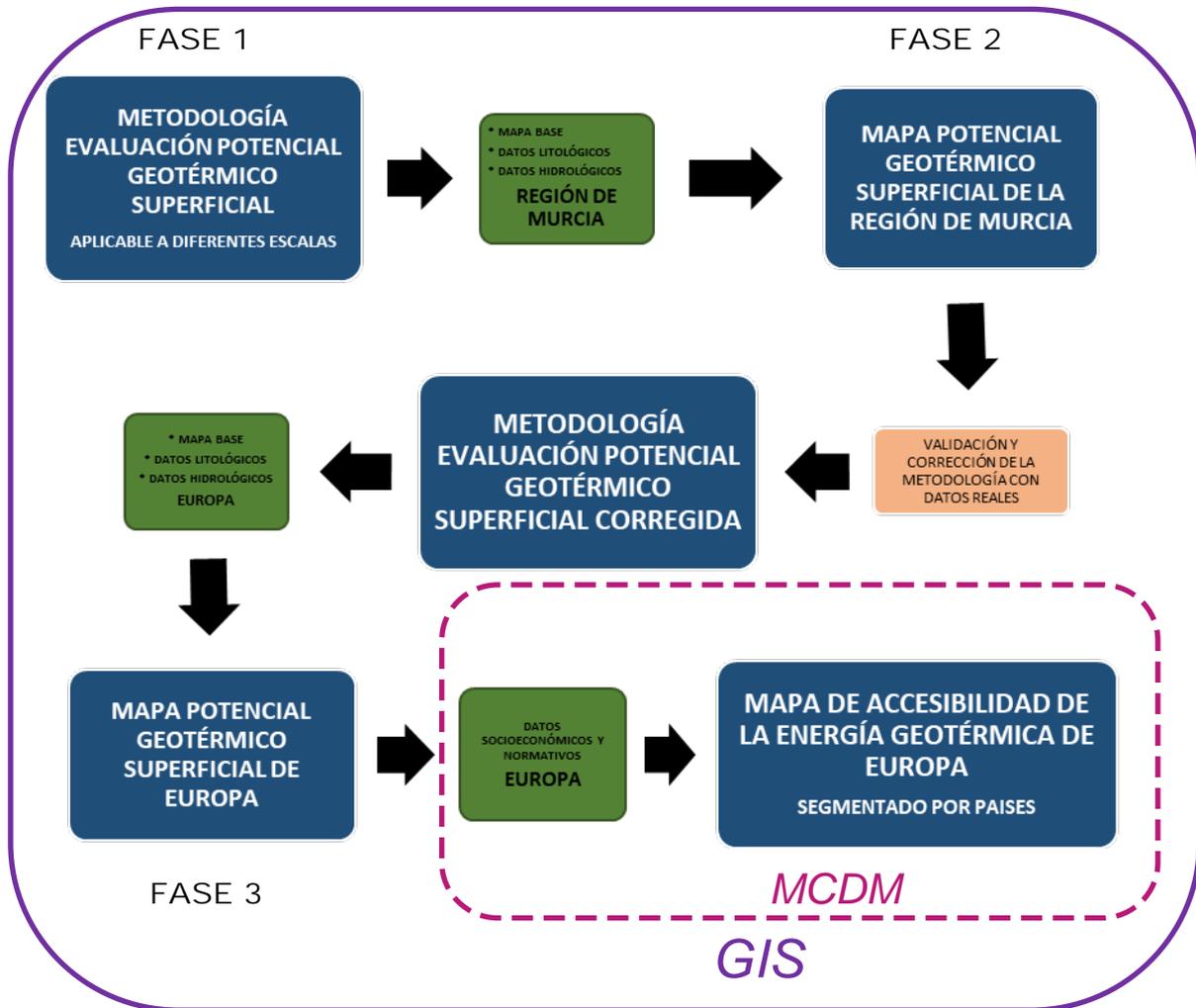
La mayoría de los estudios mencionados en este apartado tienen como objetivo principal la exploración del recurso geotérmico superficial para su aplicación en la climatización del sector residencial. No obstante, en los últimos años están surgiendo nuevas tecnologías que combinan los SBCG con otras tecnologías de fuentes renovables para la producción y aprovechamiento directo de energía térmica como es el caso de la combinación con la energía solar para la generación de calor como propone Sanner B. o la combinación con la energía fotovoltaica como propone Acuña A. et al. para cubrir la demanda de refrigeración de una vivienda. Además, otros usos directos están surgiendo como el de la energía geotérmica profunda para precalentamiento del fluido primario en ciclos combinados Erdeweghe et al., la combinación con otros sistemas energéticos de gran eficiencia como el *district heating and cooling* (Zajacs, Nazarova, & Borodinecs, 2009) para abastecer ciudades enteras de energía térmica, el calentamiento de granjas (Alberti et al., 2018) que propone la extracción de agua no solo para su aprovechamiento térmico sino también para el riego. De igual forma están surgiendo aplicaciones indirectas que aprovechan la energía geotérmica superficial para otros usos, como es el caso de la desalinización de agua (Bundschuh et al., 2015).

Por último, cabe mencionar los diferentes Proyectos Europeos H2020 que están llevando a cabo estudios que evalúan el potencial geotérmico superficial de diferentes países con varios objetivos. Por su relevancia con la presente tesis doctoral merecen especial mención el proyecto CHEAP-GSHP enfocado al desarrollo de sistemas geotérmicos más eficientes y seguros y a la reducción de los costes totales de la instalación, el proyecto GEOTeCH que tiene como objetivo la estimulación y promoción de un mayor uso de la energía geotérmica superficial para climatización a través de un avance en las tecnologías de perforación y de intercambiadores de calor más rentables y eficientes que las actuales, y el ya finalizado proyecto ReGeoCities, el cual se centró en la consecución de los objetivos marcados en los Planes de acción nacionales sobre energía renovable (NREAP) con respecto a los sistemas de energía geotérmica someros por medio de la eliminación y la clarificación de las barreras regulatorias a niveles locales y regionales.

4. Metodología

La metodología se llevará a cabo en 3 etapas distintas, según la Figura 4.

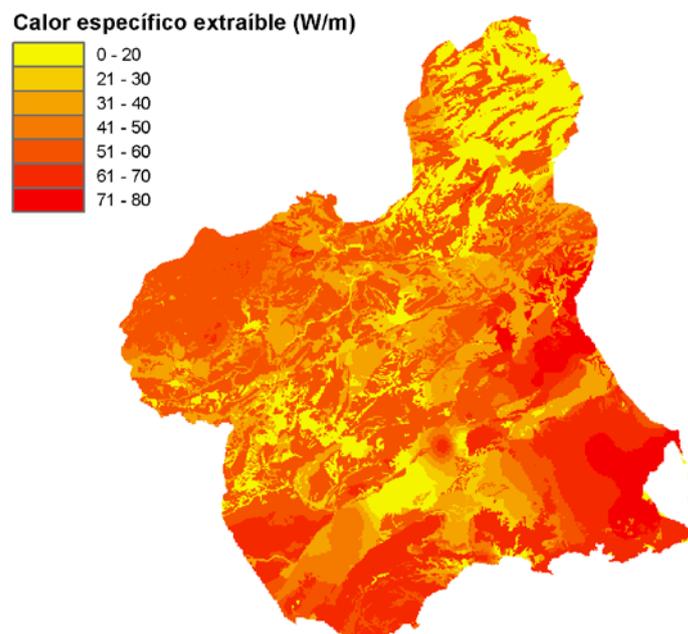
Figura 4. Diagrama de la Metodología



Previo a la primera fase, se ha llevado a cabo el trabajo de investigación y recolecta de información para realizar el estado del arte utilizándose una metodología de búsqueda específica. Las búsquedas se han realizado en las bases de datos SCOPUS y mayormente en Sciencedirect.com para todos los países del mundo. Se han utilizado los conectores lógicos AND y OR con las siguientes palabras claves: *shallow geothermal energy*, *GIS*, *MCDM*, *GSHP (Ground source heat pump)* y *mapping* principalmente. Han sido descartados casi en su totalidad, al considerarse no relevantes, todos aquellos resultados obtenidos para energía geotérmica profunda debido a que la forma de valorar estos recursos de forma espacial es completamente distinta a la superficial, ya que en el primer caso los recursos se encuentran de forma muy puntual y están asociados a fenómenos geológicos mientras que en el segundo, el recurso está en todas partes, con mayor o menor potencial, en dependencia de las características físicas del terreno. Paralelamente, se ha creado una base de datos propia para organizar y priorizar la información encontrada.

Durante la fase 1 se propondrá la Metodología para medir el potencial geotérmico somero y se probará en la fase 2 con la introducción de datos pertenecientes a la Región de Murcia, como son: mapa base litológico, datos climáticos, calidad de los acuíferos para tal aplicación y niveles freáticos principalmente. Será necesaria la obtención de estos datos en archivos shape o la conversión de ellos a este formato para poder trabajarlos con GIS. La fase 2 tendrá como resultado principal el Mapa del Potencial Geotérmico Superficial para la Región de Murcia, como el que se muestra en la Figura 5, que es el resultado de otra metodología diferente propuesta para el mismo fin. Con este mapa se llevará a cabo la corrección de la metodología propuesta en la Fase 1 mediante la comparación de los datos obtenidos con datos reales.

Figura 5. Mapa Potencial Geotérmico Superficial de la Región de Murcia



La Fase 3 dará comienzo con la aplicación de la Metodología en todo el territorio europeo para obtener el Mapa de Potencial geotérmico europeo, haciendo uso del mismo tipo de datos de entrada que en la Fase 2. Posteriormente, se llevará a cabo un estudio y valoración de los datos obtenidos para evaluar la accesibilidad de los sistemas geotérmicos de forma segmentada. Para ello, será necesario introducir nuevos datos de entrada que definirán la situación socioeconómica y burocrática actual de cada territorio, como los que se pueden ver de la Figura 6 a Figura 8 a modo de ejemplo obtenidas de otro caso de estudio. Esta parte dará como resultado el Mapa de Accesibilidad de los sistemas geotérmicos superficiales en Europa. Se estudiarán las normativas del sector aplicadas a cada zona para valorar y replicar los casos donde los resultados sean los más óptimos. Este estudio se llevará a cabo con el uso conjunto de herramientas GIS y MCDM. Las ventajas del uso de GIS es que nos permite trabajar con gran cantidad de datos espaciales con una representación gráfica segmentada por zonas, mientras que la aplicación de los MCDM permitirá establecer criterios para decidir las mejores zonas donde la explotación de la Energía Geotérmica Superficial conlleva los mayores beneficios económicos, técnicos y/o medioambientales.

Figura 6. Mapa de profundidad del intercambiador geotérmico y Figura 7. Mapa del coste de perforación segmentado por comarcas en la Región de Murcia

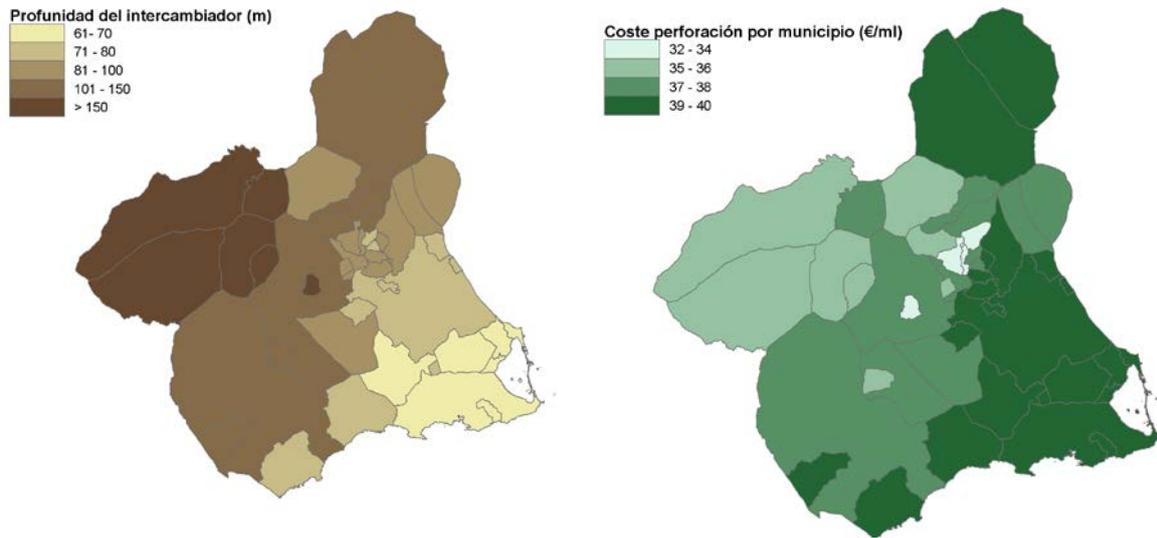
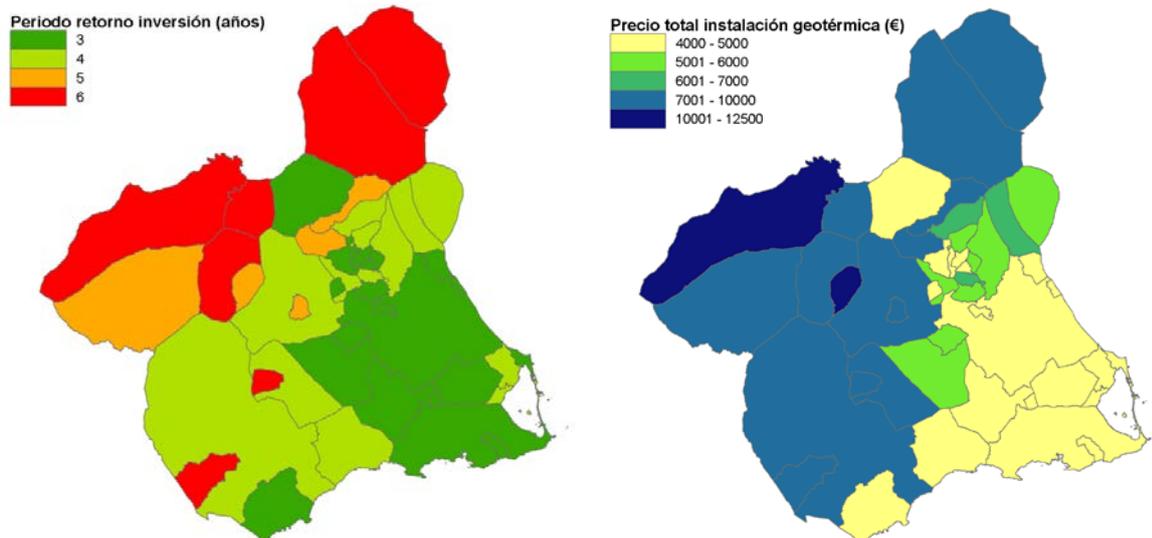


Figura 8. Mapa del precio total de una instalación geotérmica y Figura 9. Período de retorno de la inversión.



5. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas hasta la fecha en este estudio, son:

- Se han desarrollado muchas metodologías para determinar el potencial geotérmico superficial, la mayoría de ellas realizadas en GIS, basadas en modelos numéricos físicos, literatura específica y datos obtenidos de diferentes sondeos.
- La norma alemana VDI 4640 es ampliamente la metodología/guía más utilizada para cuantificar la conductividad térmica por litologías o tipos de suelos.
- Las metodologías desarrolladas se han aplicado en diferentes escalas, desde urbana hasta regional, pero hasta ahora ninguna metodología cubre escalas más grandes

como la nacional o la continental. Además, la mayoría de las metodologías desarrolladas han sido aplicadas a una única zona por lo que no se ha realizado un estudio de consistencia de los resultados obtenidos en diferentes zonas con la misma metodología.

- Los MCDM han sido muy utilizados para la toma de decisiones en el sector energético siendo AHP (Analytic Hierarchy Process) el más utilizado entre ellos.
- Hasta la fecha no se han utilizado conjuntamente GIS y MCDM para la determinación de las zonas óptimas en el mapeado de la energía geotérmica superficial, aunque sí para energía geotérmica profunda. La innovadora combinación de ambas herramientas permitirá obtener resultados más afines a las características de suelos y escenarios reales económicos y medioambientales de cada país.
- Aparte de la climatización, están surgiendo en los últimos años diferentes aplicaciones de la energía geotérmica superficial, tales como la desalación de agua, y nuevas combinaciones con otras tecnologías renovables, como fotovoltaica y solar, que se presentan como alternativas viables económica y medioambientalmente.

6. Referencias bibliográficas

- Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>
- Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>
- Alberti, L., Antelmi, M., Angelotti, A., & Formentin, G. (2018). Geothermal heat pumps for sustainable farm climatization and field irrigation. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.009>
- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., & Kölbl, T. (2010). CO2 savings of ground source heat pump systems - A regional analysis. *Renewable Energy*, 35(1), 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.034>
- Bundschuh, J., Ghaffour, N., Mahmoudi, H., Goosen, M., Mushtaq, S., & Hoinkis, J. (2015). Low-cost low-enthalpy geothermal heat for freshwater production: Innovative applications using thermal desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.102>
- Casasso, A., & Sethi, R. (2016). G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, 765–773. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.091>
- Chatzimouratidis, A. I., & Pilavachi, P. A. (2008). Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*, 36(3), 1074–1089. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.028>
- Curtis, R., Pine, T., & Wickins, C. (2013). Development of new ground loop sizing tools for domestic GSHP installations in the UK. *European Geothermal Congress 2013*, (ie), 1–10.

- EGEC European Geothermal Energy Council (2017) . *EGEC Geothermal market report 2016*. Key Findings.
- Erdeweghe, S. Van, Bael, J. Van, Laenen, B., & William, D. (2017). Preheat-parallel configuration for low-temperature geothermally-fed CHP plants, *142*, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.022>
- Faber, J., Sevenster, M., & Markowska, A. (2012). Behavioural Climate Change Mitigation Options, (April).
- Galgaro, A., Di Sipio, E., Teza, G., Destro, E., De Carli, M., Chiesa, S., ... Manzella, A. (2015). Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale. *Geothermics*. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.06.017>
- Garapati, N., Adams, B. M., Bielicki, J. M., Schaedle, P., Randolph, J. B., Kuehn, T. H., & Saar, M. O. (2017). A Hybrid Geothermal Energy Conversion Technology - A Potential Solution for Production of Electricity from Shallow Geothermal Resources. *Energy Procedia*, *114*(November 2016), 7107–7117. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1852>
- García-Gil, A., Vázquez-Suñe, E., Alcaraz, M. M., Juan, A. S., Sánchez-Navarro, J. Á., Montlleó, M., ... Lao, J. (2015). GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account. *Renewable Energy*, *77*, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.096>
- Gemelli, A., Mancini Adriano, A., & Longhi, S. (2011). GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renewable Energy*, *36*(9), 2474–2483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.014>
- IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Evaluación del Potencial de la Energía Geotérmica. Estudio Técnico. PER 2011-2020.
- IEA International Energy Agency. (2013). *Transition to Sustainable Buildings*. Recuperado de https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Building2013_free.pdf
- Kaya, İ., Çolak, M., & Terzi, F. (2018). Use of MCDM techniques for energy policy and decision-making problems: A review. *International Journal of Energy Research*, (January), 1–29. <https://doi.org/10.1002/er.4016>
- Köhler, J. (2012). *Behavioural Climate Change Mitigation Options and Their Appropriate Inclusion in Quantitative Longer Term Policy Scenarios Technical Report on the appropriate inclusion of results of the analysis in model-based quantitative scenarios*.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, *60*(3), 66–93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Luo, J., Luo, Z., Xie, J., Xia, D., Huang, W., Shao, H., ... Rohn, J. (2018). Investigation of shallow geothermal potentials for different types of ground source heat pump systems (GSHP) of Wuhan city in China. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.017>
- Miglani, S., Orehounig, K., & Carmeliet, J. (2018). A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.100>
- Noorollahi, Y., Gholami Arjenaki, H., & Ghasempour, R. (2017). Thermo-economic modeling and GIS-based spatial data analysis of ground source heat pump systems for regional shallow geothermal mapping. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

72(December 2015), 648–660. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.099>

- Sánchez-Lozano, M., J., Teruel-Solano, Jerónimo, Soto-Elvira, L., P., & Socorro García-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., & Bayer, P. (2010). Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1798–1813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.002>
- Sanner, B. (2003). Integrated use of geothermal and other renewable energy sources - heat pumps, solar thermal, combined heat and power, (September).
- Schiel, K., Baume, O., Caruso, G., & Leopold, U. (2016). GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 1023–1036. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.017>
- Somogyi, V., Sebestyén, V., & Nagy, G. (2017). Scientific achievements and regulation of shallow geothermal systems in six European countries – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 934–952. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.014>
- Unión Europea. Directiva 2010/31/EU Del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 de Eficiencia Energética en Edificios (refundido). *Official Journal of the European Union*, 13–35. https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng
- Yalcin, M., & Kilic Gul, F. (2017). A GIS-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (Afyonkarahisar). *Geothermics*, 67, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.002>
- Zajacs, A., Nazarova, J., & Borodinecs, A. (2009). Review of Geothermal Energy Potential in Europe, 108–115.