



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

El uso de SIG para la localización de sistemas de recarga gestionada de acuíferos

Trabajo realizado por:

Javier Ignacio Martínez Canales

Dirigido por:

Paula Rodríguez Escales

Albert Folch Sancho

Máster en:

Ingeniería Ambiental

Barcelona, 15 Septiembre 2021

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

ÍNDICE

RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS (MAR)	2
1.1.1. Tipos de recarga gestionada de acuíferos (MAR)	2
1.1.2. Criterios de decisión para la ubicación de MAR.....	5
1.2. TRATAMIENTO DE SUELO Y ACUÍFERO (MAR-SAT)	7
1.2.1. Funcionamiento	7
1.2.2. Beneficios de la implementación de MAR-SAT	8
1.2.3. Consideraciones de prediseño para MAR-SAT	9
1.3. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES DE ESTUDIOS DE LOCALIZACIÓN DE MAR-SAT.....	13
2. OBJETIVO.....	16
3. ÁREA DE ESTUDIO	17
4. METODOLOGÍA.....	20
4.1. Identificación de zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en Cataluña	21
4.2. Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT.....	24
4.3. Categorización de las EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes.....	30
4.4. Selección de sitios disponibles para realizar MAR-SAT con agua regenerada de EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes	32
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
5.1. Identificación de zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en Cataluña	35
5.2. Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT.....	36
5.3. Categorización de las EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes.....	44
5.4. Selección de sitios disponibles para realizar MAR-SAT con agua regenerada de EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes	49
6. CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Componentes de los sistemas de recarga gestionada de acuíferos (MAR).	5
Tabla 2: Restricciones técnicas y ambientales consideradas en la identificación de zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en Cataluña.....	21
Tabla 3: Restricciones técnicas y económicas para la categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT.....	25
Tabla 4: Categorías consideradas para la clasificación del territorio de Cataluña para la implementación de MAR-SAT.....	29
Tabla 5: Agrupación de los valores de píxel resultantes asociados a cada categoría considerada.	30
Tabla 6: Sustancias consideradas para la categorización de las EDAR, sus límites y normativa asociada.....	30
Tabla 7: Categorías consideradas para la clasificación de las EDAR de Cataluña consideradas para la implementación de MAR-SAT.....	32
Tabla 8: Restricciones económicas consideradas para la evaluación de las EDAR.....	34
Tabla 9: Agrupación de los valores de píxel resultantes asociados a cada categoría considerada incorporando la evaluación de las EDAR.....	34
Tabla 10: Concentraciones de Nitrógeno, Fósforo, COT y Cloruros en las aguas rengeradas de cada EDAR analizada según promedio de emisión del 2018-2019 en base a datos obtenidos del PRTR y la categoría adoptada.	44
Tabla 11: Superficie por EDAR evaluada y categoría de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de recarga gestionada de acuífero (MAR). Fuente: Adaptado de Australian Guidelines (2009).....	4
Figura 2: Estructura de la toma de decisión para la identificación de zonas viables para implementar MAR. Adaptado de Imig et al., (2020).....	6
Figura 3: Esquema de funcionamiento del Tratamiento de Suelo y Acuífero (MAR-SAT). Adaptado de Velásquez (2016).....	8
Figura 4: Valoración del estado de las masas de agua de Cataluña. En Rojo se representan las masas de agua en mal estado a causa de la presencia de nitratos en las aguas subterráneas (valores superiores a 50 mg/L). Fuente: ACA (2016).	17
Figura 5: Esquema conceptual de la metodología realizada.	20
Figura 6: Zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en Cataluña.	35
Figura 7: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Tarragona para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.	38
Figura 8: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Tarragona para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.....	39
Figura 9: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Barcelona para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.	40
Figura 10: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Barcelona para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.....	40
Figura 11: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Girona para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.	42
Figura 12: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Girona para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.	42

Figura 13: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Lleida para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.43

Figura 14: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Lleida para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.
.....44

Figura 15: EDAR con capacidad superior a 100.000 hab. categorizadas según la calidad del agua regenerada junto con la categorización de las zonas de implementación de MAR-SAT.
.....48

Figura 16: EDAR factibles de aplicar MAR-SAT con un radio de 8km y la categorización de las zonas de implementación.....50

RESUMEN

La escasez hídrica corresponde a un problema de carácter global que ocurre actualmente, debido principalmente a las grandes presiones que existen sobre los recursos hídricos dado el crecimiento de la población y el aumento de las urbanizaciones. Lo anterior, deriva en episodios de frecuentes sequías y contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, tal como lo han vivido en los últimos años países como Bélgica, España o Italia. El caso de Cataluña no ha sido diferente, así lo demuestran los siete episodios de sequía relevante que se han vivido en los últimos 40 años, por lo que buscar fuentes de agua alternativas que permitan mejorar la seguridad hídrica y nuevos métodos de gestión, como la recarga gestionada de acuíferos (en inglés, *Managed Aquifer Recharge, MAR*) se vuelve necesario para mantener, mejorar y asegurar el recurso hídrico.

Existen diferentes tipos de *MAR*, uno de éstos que permite no sólo la recarga gestionada de acuíferos sino también la gestión de la calidad del agua de recarga es el de tratamiento de suelo y acuífero (del inglés, *Soil Aquifer Treatment, SAT*). En el contexto de Cataluña, donde el 50% de las masas de agua subterránea se han declarado en mal estado químico, de las cuales, en su mayoría es debido a un mal estado por exceso de nitratos, la calidad del agua de recarga toma aún mayor importancia.

El presente estudio propone una metodología que permite identificar y categorizar zonas factibles de realizar recarga gestionada de acuíferos mediante el tipo de Tratamiento de Suelo y Acuífero (*MAR-SAT*), utilizando las aguas residuales tratadas, permitiendo así, fomentar la economía circular. Lo anterior, se realiza al considerar una serie de restricciones técnicas, ambientales y económicas. Se incorpora en el análisis, una categorización de las EDAR evaluadas en función de la calidad de sus efluentes, pudiendo identificar cuáles presentan las condiciones óptimas de recarga de acuíferos. Para lo anterior, se utilizan técnicas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y un análisis MULTI-CRITERIO.

Se logró analizar el 93% del territorio de Cataluña en base a datos públicos disponibles. Las principales zonas de recarga se obtuvieron para la provincia de Tarragona y Girona, alcanzando superficies superiores a los 1000 km² y 400 km², respectivamente. Las principales comarcas que presentan superficies óptimas de recarga corresponden a la del Montsià y del Baix Ebre, de la provincia de Tarragona y a la comarca del Alt Empordà de la provincia de Girona, todas con superficies disponibles para recarga de acuíferos superiores a los 200 km².

Se analizaron y categorizaron un total de 36 EDAR en función de la calidad de sus efluentes, evaluando las concentraciones de Nitrógeno Total, Fósforo, Carbono Orgánico Total (COT) y Cloruros según distintas normativas. De éstas, sólo 10 resultaron tener las condiciones óptimas de recarga al no superar ninguna concentración de las sustancias evaluadas. Las EDAR con condiciones óptimas de calidad de agua para recarga de acuífero se ubicaron en las provincias de Barcelona y Girona, realizando una categorización de las zonas próximas a éstas, pudiendo identificar sitios disponibles de recarga.

ABSTRACT

The water scarcity corresponds to a global problem that is currently occurring. This problem mainly occurs due to the vast pressures that exist on water resources given the growth of the population and the increase of urbanizations. The above, derives from episodes of frequent droughts and contamination of superficial water and groundwater, as they have existed in recent years in countries such as Belgium, Spain or Italy. The case of Catalonia has not been different. There have been seven episodes of relevant droughts in the last 40 years, so looking for alternative water sources that allow improvements to water security and new management methods, such as the Managed Aquifer Recharge (MAR) becomes necessary to maintain, improve and secure the water resource.

There are different types of MAR. One of these allows not only the managed recharge of aquifers, but also the management of the quality of the recharging water is the Soil Aquifer Treatment (SAT). In the context of Catalonia, where 50% of the underground water masses have been declared in poor chemical state, of which, it is predominantly due to poorly conditions caused by excess nitrates, the quality of the recharge water is of major importance.

The present study proposes a methodology that allows us to identify and categorize feasible areas to carry out MAR through SAT (MAR-SAT), using the treated wastewater, thus allowing it to promote the circular economy. This is done by considering a series of technical, environmental and economic restrictions. Incorporated into the analysis is a categorization of the Wastewater Treatment Plant (WWTP), evaluated depending on the quality of its effluents, being able to identify which ones have the optimal aquifer recharge conditions. For the above, techniques of Geographic Information Systems (GIS) and a multi-criteria analysis are used.

93% of the territory of Catalonia was analyzed based on public data available. The main recharging areas were obtained for the province of Tarragona and Girona, reaching surfaces upper than 1000 km² and 400 km², respectively. The main regions that have optimal recharge surfaces correspond to the Montsià and the Baix Ebre, of the province of Tarragona and the Alt Empordà in the province of Girona, all with available surfaces for aquifer recharge upper than 200 km².

A total of 36 WWTPs were analyzed and categorized according to the quality of their effluents, evaluating the concentrations of Total Nitrogen, Phosphorus, Total Organic Carbon (TOC) and Chlorides according to different regulations. Of these, only 10 proved to

have the optimum recharge conditions, by not exceeding any concentration of those substances evaluated. The WWTPs with optimal recharge conditions, according to the quality of their effluents, were located in the province of Barcelona and Girona. In the areas near to these WWTPs, a categorization was carried out to identify the best available sites.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión sostenible de los recursos hídricos corresponde a una tarea compleja y es uno de los principales desafíos que enfrenta la sociedad humana en todo el mundo (Thon, 2014). El suministro de agua dulce es limitado, y no puede satisfacer la creciente demanda (Wild *et al.*, 2007; Thon, 2014). La escasez de agua es un problema actual que se ve acrecentado por factores de contaminación de aguas superficiales y subterránea, la distribución desigual de los recursos hídricos y las frecuentes sequías causadas por distintos patrones climáticos globales extremos (Thon, 2014; Velasquez, 2016).

El crecimiento de la población y el aumento de las urbanizaciones inducen indudablemente una mayor presión sobre los recursos hídricos, provocando una mayor demanda de éstos para la producción de comida (Corcoran, 2010; Thon, 2014). La urbanización y la expansión industrial pueden también ejercer un impacto ambiental sobre las aguas superficiales generando una contaminación de diferentes compuestos orgánicos traza (Schmidt *et al.*, 2007). Además, patrones de explotación excesivo y tasas de bombeo de las aguas subterráneas, por encima de la reposición natural, provocan una rápida disminución de los niveles de agua subterráneas generando finalmente, el agotamiento de los recursos de aguas subterráneas (Asano & Cotruvo, 2004; Abel *et al.*, 2012; Thon, 2014).

La medida de reducción del consumo de agua como una estrategia de conservación, junto con avances tecnológicos y la búsqueda de nuevas fuentes de agua son las principales formas de reducir la presión sobre el suministro ante la escasez física (Velasquez, 2016). Las nuevas fuentes de agua pueden incluir la recuperación de escorrentía de aguas de lluvia, desalinización de agua de mar o aguas subterráneas salobres, la reutilización de aguas grises en el sitio y la recuperación de efluentes de aguas residuales municipales (NRC, 2012). La recuperación de aguas residuales se refiere al proceso en que se tratan aguas residuales con altos estándares de calidad, pudiendo ser aptas para su reutilización y aplicación para distintos fines (Velasquez, 2016; Drewes & Khan, 2010).

Europa está agotando sus recursos hídricos esenciales. Países como España, Bélgica o Italia están consumiendo anualmente el 20% o más de sus suministros a largo plazo (Comisión Europea, 2010; Seguí *et al.*, 2019). Según La Vanguardia (2020) Cataluña ha vivido siete episodios de sequía relevante en los últimos 40 años, siendo los más recientes en 2002, 2005, entre 2007 y 2008; y entre 2016 y 2017. En septiembre del 2020 las reservas de las cuencas internas se situaban alrededor del 56%, luego de mantener meses de descenso “lento pero constante”, tal como lo definió el Gobierno de Cataluña.

Existen fuentes de agua alternativas que permiten incrementar la disponibilidad del recurso, mejorando la seguridad hídrica, pudiendo contar con este, tanto en periodos normales como de alta demanda. El mar Mediterráneo recibe grandes cantidades de agua proveniente de escorrentía superficial y descarga de ríos, aguas residuales tratadas y no tratadas o exceso de agua de diversas fuentes en periodos de baja demanda. Estas fuentes de agua alternativa podrían ser aprovechadas, sin embargo, existen factores que obstaculizan su uso eficaz. Principalmente, estos factores están relacionados con una preocupación acerca de la calidad de las aguas y una falta de opciones suficientes que permitan asegurar el almacenamiento intermedio a bajo costo. En este último punto, la recarga gestionada de acuíferos (*MAR*, por sus siglas en inglés) asoma como una opción interesante, pudiendo ser un almacenador disponible, aún mejor en sitios que posean acuíferos poco profundos y con zonas gruesas no saturadas, o acuíferos que ya hayan sido sobreexplotados, y se encuentren agotados (Rodríguez *et al.*, 2018).

1.1. RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS (*MAR*)

La recarga gestionada de acuíferos (del inglés *Managed Aquifer Recharge, MAR*) es un término concebido por el hidrogeólogo británico Ian Gale, en el año 2000, utilizado para mejorar la cantidad y calidad de las aguas subterráneas. La *MAR* tiene el objetivo de aumentar la cantidad de agua almacenada en los acuíferos. El tiempo de residencia del agua en el subsuelo es mucho mayor que el de superficie, por lo que la recarga gestionada contribuye a aumentar las reservas de agua dulce. Así, la *MAR* corresponde al conjunto de métodos que se utilizan cada vez más, y que permiten mantener, mejorar y asegurar los sistemas de aguas subterráneas que se encuentran sometidos a estrés (Dillon *et al.*, 2018).

Un acuífero corresponde a un depósito subterráneo de agua que se encuentra contenida en rocas o materiales no consolidados (arena, grava, arcilla o limo), del cual es posible extraer agua subterránea. efectuar la recarga del acuífero de forma controlada, se puede utilizar agua reciclada, proveniente de la recolección de aguas pluviales o de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR); o se puede utilizar agua natural proveniente de un río o lago. De esta forma, es posible almacenar excedentes de agua para su uso posterior o un beneficio ambiental (Australian Guidelines, 2009).

1.1.1. Tipos de recarga gestionada de acuíferos (*MAR*)

Los métodos de recarga gestionada de acuíferos se pueden lograr esparciendo agua en la superficie intencionalmente, utilizando pozos de recarga o alterando las condiciones naturales permitiendo de esta forma, el aumento de la infiltración con el propósito de

reponer un acuífero y poder almacenar agua debajo de la superficie al mismo tiempo. Este conjunto de técnicas de *MAR* corresponde a soluciones prometedoras en relación con la gestión del agua, teniendo beneficios directos al contrarrestar los impactos generados por el cambio climático; por lo que asoman cada vez más como técnicas interesantes de implementar (Dillon *et al.*, 2018; Imig *et al.*, 2020).

Según Australian Guidelines (2009) es posible identificar 13 tipos de *MAR* los cuales se presentan en la Figura 1. De éstos, los 2 más comunes corresponden al Sistema de almacenamiento y recuperación de agua subterránea (*ASTR*) y el Sistema de infiltración por Tratamiento de Suelo y Acuífero (*MAR-SAT*). El sistema que se adoptará va a estar influenciado por distintos factores, tales como, (i) una fuente adecuada de agua para la recarga, (ii) presencia de un acuífero adecuado para el almacenamiento y recuperación de agua, (iii) terreno disponible para la construcción de la instalación, (iv) demanda suficiente del agua recuperada y (v) capacidad de gestión eficiente del proyecto; pudiendo condicionar la viabilidad del proyecto de *MAR* (Rodríguez *et al.*, 2018). Por otro lado, en Australian Guidelines (2009) se definen 7 componentes comunes para todos los tipos de *MAR*, los cuales son listados y comentados en la Tabla 1.

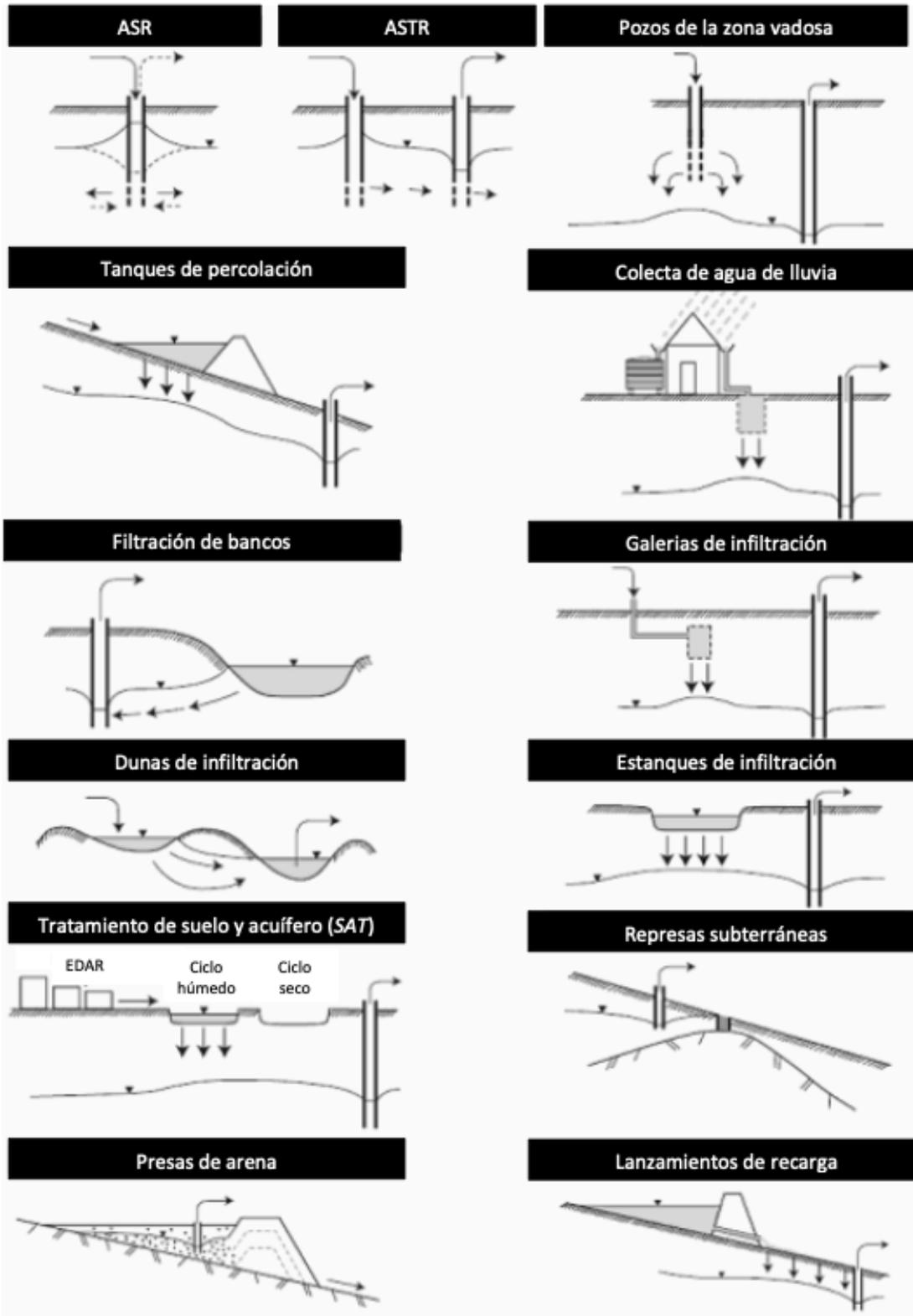


Figura 1: Tipos de recarga gestionada de acuífero (MAR).

Fuente: Adaptado de *Australian Guidelines* (2009).

Tabla 1: Componentes de los sistemas de recarga gestionada de acuíferos (*MAR*).

Número	Componente	Ejemplos
1.	Zona de captación	<ul style="list-style-type: none"> - Captación de aguas pluviales utilizando vertederos o humedales - Conexión por tubería de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)
2.	Pretratamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas pasivos de tratamiento como humedales - Tratamientos diseñados (si es necesario) para producir agua apta para realizar la recarga
3.	Recarga	<ul style="list-style-type: none"> - Pozo de inyección - Zanjas de infiltración
4.	Almacenamiento subterráneo	<ul style="list-style-type: none"> - Corresponde al acuífero dónde se almacena el agua y ocurre el tratamiento pasivo del acuífero
5.	Recuperación	<ul style="list-style-type: none"> - Pozo de extracción - Descarga intencional a un ecosistema dependiente de las aguas subterráneas
6.	Post tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas pasivos como humedales - Tratamientos de ingeniería (si es necesario) para producir agua adecuada para el uso previsto
7.	Uso final	<p>Distribución a usuarios como:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Suministro de agua potable - Regantes o industrias - Ecosistemas acuáticos (receptores ambientales y salud humana)

Fuente: Adaptado de *Australian Guidelines* (2009).

1.1.2. Criterios de decisión para la ubicación de *MAR*

Tal como se presentó en el apartado anterior, existen diferentes tipos de *MAR*. El tipo que se adoptará va a depender de diversos factores, tanto como técnicos, ambientales y económicos. Según Imig *et al.*, (2020), dónde se establecen condiciones bases para el apoyo

a la toma de decisión transnacional en la designación de potenciales sitios para la ubicación de *MAR* en europa central, se definen 3 componentes principales:

- Criterio de **selección climatológica**, que permiten averiguar dónde se necesitan o será necesario realizar *MAR* en el futuro.
- Criterio de **selección geológica e hidrogeológica**, que permite identificar áreas donde es posible realizar *MAR*.
- Sensibilidad de los sistemas *MAR* a los efectos secuenciales y combinados de los extremos climáticos, para evaluar dónde y cómo se pueden aplicar los esquemas *MAR* si se producen situaciones climáticas extremas, como las sequías o períodos húmedos, así como también la identificación del riesgo potencial relacionado.

Los criterios de selección destinados a la identificación de potenciales sitios de *MAR* son propuestos como una ayuda a la toma de decisiones, que permite identificar las zonas idóneas para su implementación. Una vez que se han identificado las áreas para la aplicación de *MAR*, se deben evaluar otros aspectos que aseguren la viabilidad de los proyectos relaciondos con criterios técnicos, ambientales y económicos. Estos aspectos pueden tener relación entre demanda y suministro de agua, soluciones técnicas adecuadas, y costo-beneficio, los cuales estarán condicionando la materialización del proyecto. En la Figura 2 se presenta el esquema propuesto por Imig *et al.*, (2020) para la toma de decisiones y evaluación de la implementación de *MAR*.

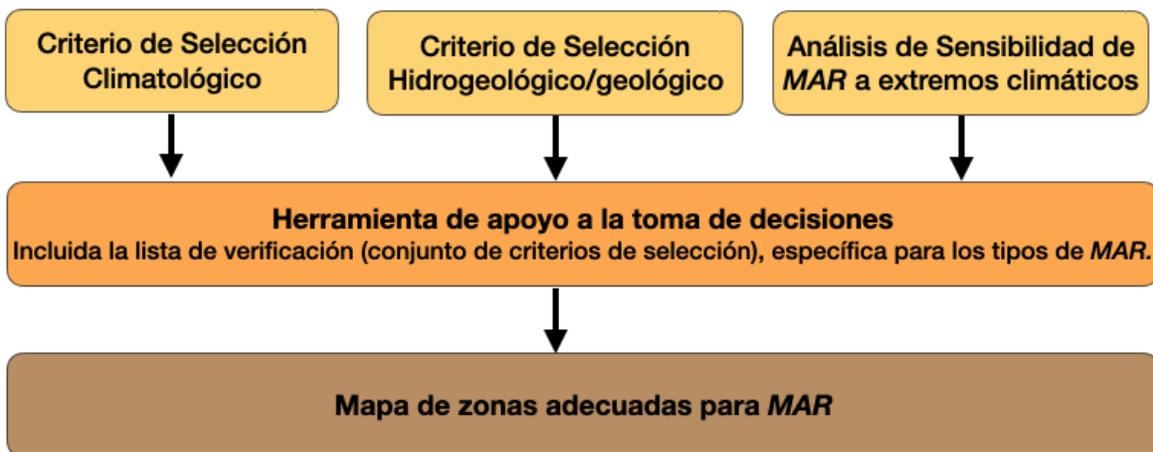


Figura 2: Estructura de la toma de decisión para la identificación de zonas viables para implementar *MAR*.
Adaptado de Imig *et al.*, (2020).

1.2. TRATAMIENTO DE SUELO Y ACUÍFERO (MAR-SAT)

Un paso más allá de la recarga gestionada de acuíferos, es la gestión de la calidad del agua de recarga. Es decir, no sólo proveer de agua a los acuíferos, sino que esta agua sea de calidad. En este contexto, surge el tratamiento de suelo y acuífero (del inglés, *Soil Aquifer Treatment, SAT*).

1.2.1. Funcionamiento

El tratamiento de suelo y acuífero (*MAR-SAT*) corresponde a un método de tratamiento y recuperación de aguas residuales que utiliza los estratos presentes en el suelo para recargar el acuífero presente en una zona determinada. Este método de tratamiento tiene la ventaja de aliviar los efectos adversos que pueden producirse cuando las aguas tratadas residuales son descargadas directamente sobre aguas superficiales (Sharma *et al.*, 2008). El método de tratamiento está basado en un principio de geo-purificación, en el cual, el acuífero se recarga a partir de aguas residuales tratadas parcialmente, las cuales pasan a través de los distintos estratos del suelo insaturado antes de mezclarse con el agua subterránea nativa (Bdour *et al.*, 2009). Los procesos que ocurren en *MAR-SAT* durante la percolación mejoran la calidad del agua filtrante a través de su paso por la zona vadosa o insaturada antes de mezclarse y diluirse en el acuífero (Nema *et al.*, 2001; Quanrud *et al.*, 2003).

Este método de tratamiento se define por tres componentes principalmente, la zona de infiltración, la zona vadosa (correspondiente a la región de aireación sobre el nivel freático) y el almacenamiento del acuífero. En la Figura 3 se presenta un esquema básico del funcionamiento del método de recarga de *MAR-SAT*, el que consiste en la infiltración del efluente de aguas residuales a través de una cuenca de recarga seguida por la recuperación posterior mediante pozos de extracción. La remoción de contaminantes involucra procesos físicos, químicos y biológicos por la zona insaturada y la zona saturada (acuífero). El desempeño que tendrá el método de recarga *MAR-SAT* en el tratamiento de las aguas infiltradas dependerá de la calidad de las aguas residuales del afluente, las características específicas del sitio, tanto geológicas e hidrogeológicas, y el cronograma operativo de las cuencas de infiltración (Velásquez, 2016).

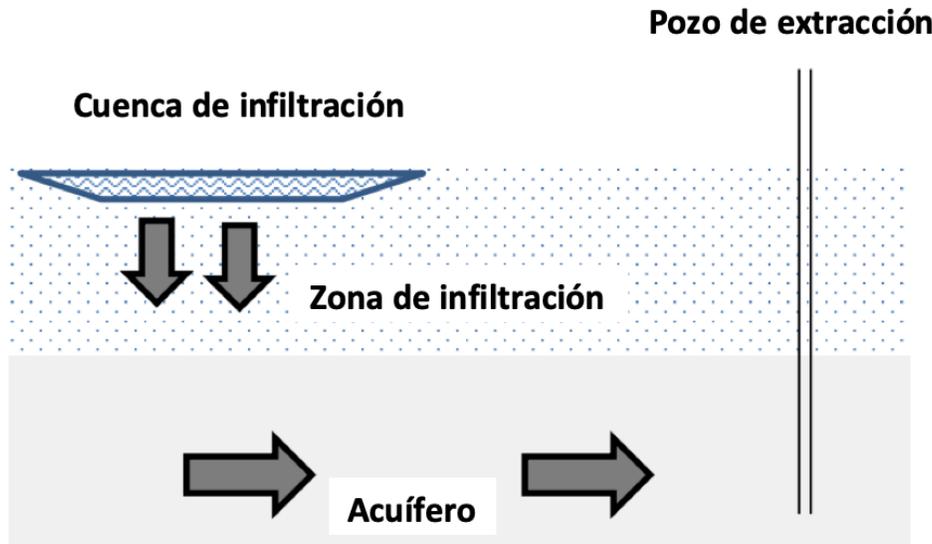


Figura 3: Esquema de funcionamiento del Tratamiento de Suelo y Acuífero (*MAR-SAT*).
Adaptado de Velásquez (2016).

Es importante diferenciar entre los tipos de recargas de acuífero, como la inyección directa y el sistema de *MAR-SAT*. La recarga de acuífero por inyección directa involucra el uso de un pozo de inyección donde se ingresan a los acuíferos los efluentes altamente tratados para su posterior reutilización. En cambio, el método de recarga por *MAR-SAT* involucra la infiltración en el suelo del efluente hasta llegar al acuífero, considerando una escala de tiempo distinta y más larga. La condición de someter el efluente secundario al contacto con el suelo, lo somete a condiciones de óxido-reducción (REDOX) a medida que se mueve a través de las zonas saturadas e insaturadas; encontrándose el efecto más importante sobre las reacciones mediadas biológicas dado las condiciones REDOX en la zona instaurada (Velásquez, 2016).

1.2.2. Beneficios de la implementación de *MAR-SAT*

La recarga gestionada de acuíferos genera una serie de beneficios sociales y económicos al mejorar la seguridad en el suministro del agua, mejorar los servicios urbanos, mitigar inundaciones y entregarle un mayor valor a la tierra. Además, en algunos casos, la recarga de acuíferos mejora la calidad del agua receptora y protege los ecosistemas aguas abajo de la recarga. Debido a lo anterior, es que la viabilidad de los proyectos de recarga gestionada de acuíferos deben considerar factores más allá que tan solo los costos del suministro del agua, denominado como "economía de alcance", siendo parte de una evaluación completa que involucra los aspectos sociales, ambientales y económicos (Australian Guidelines, 2009).

Esta recarga intencional de agua en un acuífero puede ser por diferentes motivos, presentándose a continuación algunos de estos:

- Almacenamiento agua para un suministro de emergencia.
- Recuperación de agua para consumo humano, suministros industriales o de riego.
- Mantener flujos ambientales y de vegetación freatófítica (plantas con raíces profundas) en sistemas superficiales o sistemas subterráneos que se encuentran sometidos a estrés.
- Barrera hidráulica para prevenir la intrusión salina en acuíferos sobreexplotados.

En particular, el sistema de *MAR-SAT* es una alternativa de bajo costo ya que no requiere mucha energía ni uso de químicos y permite la recuperación de las aguas residuales, transformándolo en un método adecuado para países desarrollados y en vías de desarrollo. El agua infiltrada mediante *MAR-SAT* hacia el acuífero es retardada debido a la serie de procesos físicos, químicos y biológicos a los que es sometida en su trayecto, logrando transformar los contaminantes presentes disueltos durante su paso por el suelo (Martin & Koerner, 1984). Durante el proceso de *MAR-SAT* se logran eliminar eficazmente compuestos orgánicos, nitrógeno, fósforo, sólidos en suspensión (SS), metales traza, virus y bacterias mediante procesos de sorción, reacción química, biotransformación, extinción y depredación (Kanarek & Michail, 1996; Zhang *et al.*, 2007).

1.2.3. Consideraciones de prediseño para *MAR-SAT*

1.2.3.1. Uso previsto del agua recuperada de *MAR-SAT*

El agua que se recupera después de la implementación de *MAR-SAT* se adapta a una gran variedad de aplicaciones, entre las que se puede incluir el riego de jardines, agua residencial, recreativa, recarga de agua subterránea, acuicultura y agua para enfriamiento industrial (Huertas *et al.*, 2008). El percolado de *MAR-SAT* puede utilizarse en zonas costeras para la recarga de acuíferos con la intención de protegerlos de la intrusión de agua salina y poder almacenar agua excedente en acuíferos para el uso posterior en épocas de escasez de agua (Dillon *et al.*, 2018).

Existen diferentes aplicaciones de reutilización para el agua recuperada de *MAR-SAT*, estando estas aplicaciones normadas y reguladas, debiendo cumplir ciertos requisitos de procesos y tratamientos obteniendo una calidad respectiva del agua (USEPA, 2006). Es por esto, que, es necesario que en la etapa de planificación sea fundamental comenzar por identificar la aplicación de reutilización que se necesitará, permitiendo que los diseñadores

y planificadores del proyecto evalúen la viabilidad de *MAR-SAT* con respecto al propósito de reutilización, analizando los requisitos de calidad previos y posteriores que deben cumplir (Thon, 2014).

1.2.3.2. Salud pública

En todos los programas de reutilización de agua destinados a prevenir la degradación ambiental, la protección de la salud pública es uno de los objetivos más críticos (USEPA, 2012). Antes de emprender un proyecto de recarga de acuíferos se debe evaluar cuidadosamente el contexto y origen de las aguas a infiltrar, siendo comúnmente utilizadas las aguas residuales municipales recuperadas, presentando un desafío primordial para el cuidado de la salud de las personas (Asano & Cotruvo, 2004). Para abordar las preocupaciones ambientales y de salud pública que tienen relación con la reutilización de aguas residuales, es necesario conocer la composición o sustancias presentes en la fuente de aguas residuales y el nivel de tratamiento que se requiere para llevarla a niveles aceptables o niveles de calidad normados (USEPA, 2012). Por último, para evitar cualquier riesgo o aliviar los impactos negativos para la salud de cualquier proyecto de reutilización de agua, es necesario considerar factores claves como la distancia a asentamientos humanos con respecto al sitio de reutilización, contacto humano con el agua, ingesta humana y exposición directa de las aguas residuales con los propios trabajadores, entre otras (Toze, 1997).

1.2.3.3. Aspectos económicos

El precio del tratamiento adoptado para un agua residual influirá indudablemente en la calidad final, pudiendo obtener cualquier nivel de calidad previsto según el agua que se desee obtener, existiendo una relación entre calidad y costo (Salgot, 2008). La maximización de los recursos hídricos limitados mediante la reutilización de aguas residuales puede contribuir al desarrollo económico al reducir los presupuestos asignados para energía, adquisición de productos químicos utilizados en desinfección y reducir el uso de agua que se encuentra altamente tratada con fines no potables (Janosova *et al.*, 2006). En general, el costo de *MAR-SAT* es relativamente más bajo que el sistema convencional de tratamiento por encima del suelo y su operación es bastante simple, además, no se requieren unidades o equipos de tratamiento costosos (Sharma *et al.*, 2011). En particular, el agua reutilizada en agricultura es considerada como un elemento integral en la gestión sostenible de los recursos limitados de agua dulce, al proporcionar beneficios ambientales y económicos,

debiendo incluir también el consumo de fertilizantes menos sintéticos y protección de los sitios de descarga de aguas residuales (Janosova *et al.*, 2006).

1.2.3.4. Regulaciones y líneas de bases

Existen diferentes regulaciones y líneas de bases acerca de la reutilización y recuperación de agua, las cuales están encargadas de controlar y salvaguardar la salud pública, siendo importantes para limitar los impactos ambientales adversos (Metcalf *et al.*, 2007). En el mundo difieren ampliamente las regulaciones y pautas de reutilización del agua recuperada en los diferentes usos posteriores, ya sea para riego, agua no potable, industrial, recarga, etc., siendo un tema particular y específico del sitio del proyecto (Thon, 2014). La disponibilidad de tecnologías y la presencia de agencias reguladoras que obligan a cumplir las regulaciones han permitido a los países desarrollados cumplir con los estrictos estándares de reutilización, a diferencias de países en desarrollo. Algunos países y regiones han implementado estrictos estándares tomando como referencia a los de Australia y EE. UU., mientras que otros se han basado en las pautas dispuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para sus respectivos estándares, las cuáles son menos estrictas en comparación a las de Australia o EE. UU. Ejemplo de lo anterior, es el estado de California, que desde 1918 ha servido como base para el desarrollo de diferentes estándares de reutilización al ser de las primeras regularizaciones en EE. UU. sobre esta materia (Crook *et al.*, 2005); así como también se podría considerar a Australia que desde sus primeras *Guidelines*, del 2006, denominada “Directrices Australianas para el reciclaje del agua: gestión de los riesgos para salud y el medio ambiente (Fase 1)”, han sido consideradas en diferentes países, destacando principalmente por su enfoque basado en los riesgos.

1.2.3.5. Aspectos técnicos

Existen tres factores generales que afectan directamente el rendimiento del sistema *MAR-SAT*, el nivel de pretratamiento del efluente de aguas residuales a infiltrar, las condiciones de operación planteadas para el sistema y las características del sitio donde se pretende ubicar. La operación y mantenimiento del sistema *MAR-SAT* estará afectado por el nivel de pretratamiento que exista en el efluente a infiltrar, condicionando directamente el contenido orgánico e inorgánico del agua. También, las características propias del sitio influyen en el funcionamiento, debiendo ser las idóneas en función de la geología e hidrogeología local (Fox *et al.*, 2001). Los requisitos principales en la identificación de sitios para *MAR-SAT* tienen relación con la presencia de un acuífero no confinado, una zona vadosa que no se encuentre contaminada, sin una capa restrictiva junto con suelos que sean

lo suficientemente gruesos (que permita infiltración), y al mismo tiempo, suelos finos que permitan darle un tratamiento correcto al agua a infiltrar (Thon, 2014). Cabe destacar, que, el funcionamiento del tratamiento *MAR-SAT* es mediante ciclos alternos húmedos/secos, permitiendo restaurar las tasas de infiltración e interrumpir al mismo tiempo el ciclo de vida de los insectos (Fox *et al.*, 2001).

1.2.3.6. Aspectos sociopolíticos

La escasez de agua es la causa que ha provocado la necesidad de implementar proyectos que involucren la reutilización de aguas residuales, ya sea directa o indirectamente en muchos países desarrollados o en vías de desarrollo, tales como Australia, Estados Unidos, Israel o varios países europeos (Thon, 2014).

En la reutilización de aguas dos factores son sumamente importantes, la estética y la aceptación pública, principalmente porque los consumidores son quienes se pueden ver afectados directamente (Levine & Asano, 2004). La recuperación de agua mediante sistemas naturales aumenta la confianza de los consumidores en los proyectos de reciclaje, al involucrar un intermediario antes del consumo, devolviendo el agua en arroyos y acuíferos antes de su consumo (Dillon *et al.*, 2006). Un hecho a destacar del sistema *MAR-SAT* es que rompe la conexión de tubería a tubería de reutilización directa de aguas provenientes de EDAR, haciendo que la reutilización de agua potable proveniente de agua reciclada sea “estéticamente” más aceptable para los consumidores, ya que el agua proviene ahora de pozos de extracción y no de depuradoras (Thon, 2014). Según Po *et al.* (2003) la aceptabilidad de un proyecto de agua reutilizada está relacionada directamente con la cercanía a los centros urbanos, mientras más cercano más oposición tendrá.

1.2.3.7. Aspectos institucionales

La eficacia y la idoneidad de la tecnología de reutilización de agua a adoptar son factores importantes para el éxito de un proyecto de este tipo, sin embargo, la existencia de un marco institucional que permita realizar eficientemente la distribución y uso del agua reutilizada contribuyen al éxito de los proyectos (Lawrence *et al.*, 2003). Definir claramente las responsabilidades de las organizaciones gubernamentales involucradas en la reutilización de aguas provenientes de EDAR, puede garantizar el éxito de este tipo de proyectos evitando conflictos de intereses. Sin embargo, en algunas ocasiones resulta difícil identificar claramente las partes interesadas e instituciones involucradas en este tipo de proyectos (Al Kubati, 2013).

1.3. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES DE ESTUDIOS DE LOCALIZACIÓN DE *MAR-SAT*

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido una herramienta bastante útil en el último tiempo, permitiendo la georreferenciación, organización, procesamiento y análisis de información compleja, pudiendo unir información de distinto tipo en un mismo entorno. Los SIG han sido utilizados en ciencias ambientales para la generación de mapas de idoneidad en la ubicación de diferentes tipos de proyectos, modelación de contaminación urbana difusa, gestión territorial, entre otros usos (Pedrero *et al.*, 2011).

Kallali *et al.*, (2006) propone un estudio basado en análisis MULTI-CRITERIO mediante herramientas SIG para una zona acotada referente al acuífero Hammamet-Nabeul en Túnez. Para esto considera el cruce de información mediante la combinación de restricciones técnicas, ambientales y económicas. Para el análisis consideró 5 restricciones técnicas (pendiente, textura de suelo, salinidad del suelo, geología y profundidad del acuífero), 2 restricciones ambientales (distancia de 200 metros a aglomeraciones urbanas y 500 metros a reservorios de agua) y 2 criterios económicos (distancia y elevación del sitio con respecto a la EDAR). Luego de realizar una operación booleana de estas restricciones consideradas, obtiene mapas de idoneidad acerca de las zonas óptimas para implementar *MAR-SAT* en el acuífero de estudio. De esta forma, concluye que mediante las herramientas SIG es posible identificar, como paso previo a investigaciones de campo, sitios donde es posible implementar recarga de acuíferos sin realizar esfuerzos y gastos adicionales. Además, comenta que, a partir de esto, es necesario realizar estudios más detallados que permitan afinar la implementación de *MAR-SAT* en las zonas idóneas obtenidas.

En 2008, Anane, M. Kallali, H & Jellali, S. realizaron un estudio para la Isla de Jerba en Túnez, donde generaron mapas de idoneidad de sitios para la implementación de *MAR-SAT* mediante el uso de herramientas SIG y análisis MULTI-CRITERIO. Al igual que el estudio anterior realizado por Kallali en 2006, para la selección de sitios consideraron restricciones técnicas, ambientales y económicas. Para este estudio, consideraron las mismas restricciones técnicas utilizadas en el estudio realizado para el acuífero de Hammamet-Nabeul, añadiendo esta vez una restricción más, referida a la salinidad del agua subterránea, siendo en total, 6 restricciones técnicas. Las restricciones ambientales y económicas fueron las mismas que se utilizaron en el estudio comentado anteriormente. En la metodología se añade una particularidad, ya que se definen diferentes pesos a para cada restricción considerada, ponderando como más importante una que otra en base a criterios de expertos. En el estudio las restricciones de geología y áreas residenciales representan los criterios más restrictivos, mientras que la pendiente es la menos restrictiva.

También, se comenta que los sitios idóneos se encuentran en áreas agrícolas y cerca de la costa, por lo que podrían ser sitios potenciales que permitan la disponibilidad de agua subterránea para riego y también para mitigar el problema de intrusión marina que existe en el acuífero de Jerba.

Pedrero *et al.* (2011) considera en su estudio la aplicación de SIG junto con un análisis Multi-Criterio para la selección de sitios de recarga de acuífero con agua regenerada de pequeñas instalaciones de tratamiento de aguas residuales, en zonas rurales de la región de Beira Interior, en Portugal. Para lo anterior, plantea el cruce de 2 criterios económicos (referidos a distancia y elevación del sitio con respecto a la EDAR), 3 criterios ambientales (referidos a distancias mínimas con respecto a centros urbanos, áreas protegidas y vulnerabilidad de recursos hídricos) y 6 restricciones técnicas (referidas a uso de suelo, pendiente, textura del suelo, tipo de suelo, profundidad del acuífero y distancia a carreteras). Realizando la operación booleana de estas restricciones obtiene el mapa de idoneidad, pudiendo identificar las zonas óptimas de recarga. A diferencia de los otros estudios analizados, en éste se incorpora al análisis el tipo de suelo y una restricción sobre áreas protegidas, así como también un análisis químico de los efluentes generados por la EDAR de Vila Fernando, posibles para utilizar en la recarga. Cabe destacar, que el análisis químico sólo se realiza para esta EDAR. De esta forma, se identificaron sitios disponibles para realizar recarga de acuífero utilizando el agua regenerada de esta EDAR rural, pudiendo reducir la descarga del agua en arroyos transformándose en una nueva fuente de recarga.

Otro estudio interesante de analizar corresponde al realizado por Tsangaratos *et al.*, (2017) debido a la dimensión del análisis. Los estudios anteriores analizados se centraban en zonas acotadas del territorio, mientras que en este se presenta un análisis MULTI-CRITERIO utilizando SIG para la identificación de sitios óptimos para la implementación de *MAR-SAT* en la Región de Ática en Grecia. Para la generación de los mapas de idoneidad de las zonas de recarga se consideraron criterios técnicos, ambientales y económicos, además de una ponderación con respecto a su importancia en base a criterio de expertos, tal como se realizó en el estudio de Kallali *et al.*, (2008). En el estudio se utilizaron datos relevantes que brindan las características hidrogeológicas, las formaciones geológicas, pendiente, profundidad del nivel freático, usos de suelo, proximidad a estructura vial, proximidad a fuentes de agua y fuentes de contaminación de aguas subterráneas. Se plantea como crucial obtener datos de la hidrogeología del lugar, así como la conductividad hidráulica del acuífero, ya que permiten identificar formaciones consolidadas o no consolidadas, siendo algo crucial dentro del análisis. Además, en su análisis consideraron las EDAR de las

principales ciudades de la región de Ática. Identificaron distintas zonas óptimas de recarga, dando énfasis en que el estudio desarrollado es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, debiendo aplicar tecnologías de investigación exhaustiva en los sitios óptimas antes de una decisión final. Además, comentan la influencia que tiene la ponderación de juicio de expertos, entregando resultados bajo un contexto particular de análisis, el cual puede variar de acuerdo con los diferentes puntos de vista. También, se plantea que la metodología empleada puede ser replicable para diferentes métodos de recarga, no sólo siendo aplicable para *MAR-SAT*.

Dentro de los documentos internacionales relevantes acerca de la recarga de acuíferos se encuentran las Australian Guidelines (2009), las cuales presentan una serie de directrices para la recarga de acuíferos mediante una perspectiva de los riesgos para la salud y el medio ambiente. En el documento se definen diferentes tipos de *MAR*, así como también distintos parámetros químicos para diferentes sustancias (como patógenos, salinidad, nutrientes, turbidez, gases de efecto invernadero, entre otros) que se deben cumplir tanto en la fuente de recarga como en los acuíferos, siendo bastante rigurosa y considerada como referencia para otros países en el mundo. Además, plantea distintas características técnicas que deben poseer los acuíferos para la factibilidad de la recarga.

Otro documento interesante de análisis fue el que presenta Thon (2014), en su tesis doctoral acerca de la recarga de acuíferos mediante *MAR-SAT* y su evaluación y aplicabilidad de la reutilización de efluentes primarios en países desarrollados. En el documento enfocado netamente en la aplicabilidad de *MAR-SAT* se presentan distintas restricciones técnicas, ambientales y económicas interesantes de considerar, aunque muchas de éstas complejas de obtener (pruebas de laboratorio), debiendo ser consideradas en los estudios posteriores de detalle, una vez identificado los sitios óptimos de recarga. También, entrega recomendaciones acerca de las características químicas de los efluentes de las EDAR consideradas, así como ejemplos del funcionamiento de *MAR-SAT* en el mundo.

Considerando los estudios y documentos anteriormente descritos, es que resulta interesante proponer una metodología que permita identificar y categorizar las zonas factibles de realizar recarga gestionada de acuíferos, mediante *MAR-SAT*, utilizando aguas residuales tratadas que permitan fomentar la economía circular. Además, incorporar una categorización de las EDAR en base a la calidad de sus efluentes de acuerdo con normativa aplicable, algo que en los estudios anteriormente analizados no se ha considerado. Para lo anterior, se plantea la utilización de herramientas SIG y un análisis MULTI-CRITERIO.

2. OBJETIVO

Atendiendo a la información anteriormente presentada, el objetivo general de este Trabajo de Final de Máster es proponer una metodología que permita identificar y categorizar zonas factibles de realizar recarga gestionada de acuíferos mediante el tipo de Tratamiento de Suelo y Acuífero (*MAR-SAT*) aprovechando las aguas residuales tratadas, fomentado, así, la economía circular. Para llegar a este objetivo se utilizan herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten unir en un solo entorno distintos niveles de información ligada al territorio.

Una vez definida la metodología, se hace una primera aplicación en Cataluña. Este TFM se enmarca en el proyecto de investigación RESTORA (ACA210/18/00040)¹. Así, los objetivos específicos de esto proyecto son:

- Identificar zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en Cataluña.
- Categorizar las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT*.
- Categorizar las EDAR de Cataluña con una capacidad superior a 100.000 habitantes en función de sus emisiones.
- Identificar sitios disponibles para implementar *MAR-SAT* con agua regenerada de EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes.

Para obtener dichos objetivos, en primer lugar, se ha realizado un análisis del territorio en función de restricciones técnicas y ambientales que permiten acotar la zona de estudio. Luego, estas zonas disponibles de recarga se han categorizado en función de restricciones técnicas y económicas. Por otro lado, se han categorizado las EDAR con una capacidad superior a 100.000 habitantes en función de sus emisiones de Nitrógeno Total, Fósforo, Carbono Orgánico Total y Cloruros según distintas normativas aplicables. Las categorías consideradas tanto para el territorio como para las EDAR fueron cuatro, No Situable, Poco Aceptable, Moderadamente Aceptable y Aceptable. Finalmente, en base a restricciones económicas relacionadas con las EDAR en análisis, se identificaron sitios disponibles para implementar *MAR-SAT* con agua regenerada de las EDAR con categoría Aceptable, siendo éstas las que no superan la concentración normada de ninguna de las sustancias evaluadas.

¹ Ficha del proyecto RESTORA: http://aca.gencat.cat/web/.content/10_ACA/G_R_D_I/Projectes-subvencionats-ACA/RDI_RESTORA.PDF

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a Cataluña, la cuál se ha visto afectada en el último tiempo por periodos de sequía y episodios de contaminación de sus acuíferos provocando indudablemente una afectación en la cantidad y calidad de las aguas subterráneas. En 2019 las reservas de agua de las cuencas internas de Cataluña se situaban por debajo del 60%, es decir, bajo del límite que establece el “Plan de Sequía” de Cataluña para declarar un estado de pre-alerta por sequía, alcanzando reservas cercanas al 50% (Coll, 2019).

El principal problema de contaminación difusa que afecta a las aguas subterráneas de Cataluña corresponde a la presencia de compuestos nitrogenados (especialmente nitratos), siendo el principal responsable del mal estado de las masas de agua. El 50% de las masas de aguas subterráneas se han declarado en mal estado químico, y de estos, por exceso de nitratos se han visto afectado el 83% (concentraciones superiores a 50 mg/L). De esta forma, el 41% de las masas de agua subterráneas de Cataluña se encuentran declaradas en mal estado por exceso de nitratos (ACA, 2016) (Figura 4).

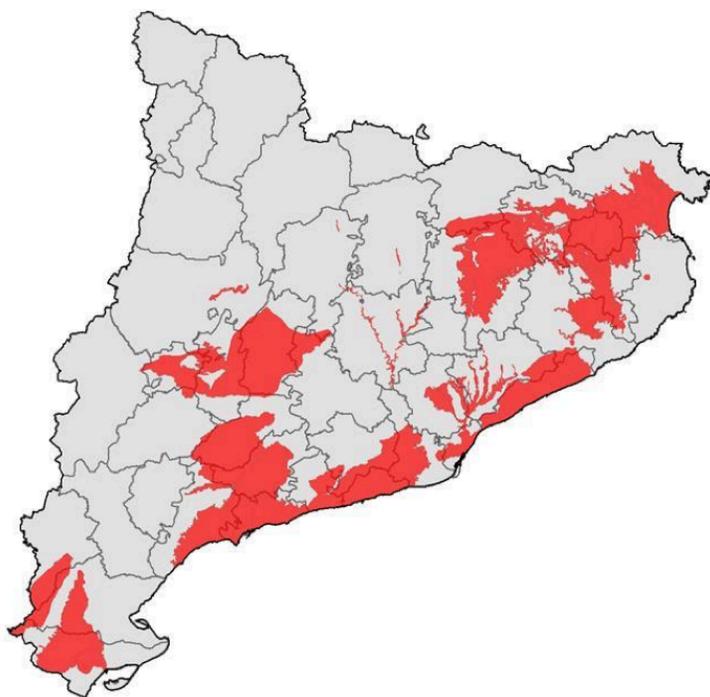


Figura 4: Valoración del estado de las masas de agua de Cataluña. En Rojo se representan las masas de agua en mal estado a causa de la presencia de nitratos en las aguas subterráneas (valores superiores a 50 mg/L).

Fuente: ACA (2016).

La Agencia Catalana del Agua (ACA) realiza el control del estado de las masas de agua, tanto subterráneas como superficiales y costeras, a través de los Programas de Seguimiento y

Control (PSiC). Los PSiC han sido aprobados por el Gobierno de la Generalitat de Catalunya mediante los acuerdos GOV/128/2008 y GOV/139/2013, que permiten hacer el seguimiento al estado de las masas de agua (ACA, 2016).

Las diferentes zonas vulnerables debido a la afección por nitratos de origen agrario en Cataluña se han delimitado mediante el Decreto 283/1998, del 21 de octubre, el Decreto 476/2004, del 28 de diciembre, el Acuerdo de Gobierno GOV/128/2009, de 28 de julio y el Acuerdo de Gobierno GOV/13/2015, del 3 de febrero. En estas zonas se han distribuidos diferentes puntos de control que permiten realizar un seguimiento de la afección de nitratos de origen agrario. Existen otros puntos que se ubican fuera de estas zonas, dónde podría haber una afección. La red unificada de control está constituida por dos redes, por un lado, se encuentra la red operativa de nitratos de las masas de aguas subterráneas, la cual está constituida por 263 puntos de control que se encargan de realizar un muestreo anual. Por otro lado, está la red de control de las zonas protegidas denominadas “zonas vulnerables”, formada por 450 puntos de control, ubicados en estas zonas que muestrean anualmente, y en ciertos casos, con periodicidad trimestral. De esta forma, con la información obtenida se elaboran los informes cuatrienales que se envían a la Comisión Europea para dar cumplimiento a la Directiva 91/676/CEE (ACA, 2016).

La reutilización de aguas depuradas es el proceso que permite volver a utilizar las aguas tratadas en las depuradoras, asomando como una opción de segundo uso viable que permita contrarrestar problemas de abastecimiento de agua o de contaminación, al generar una dilución de sustancias. En este contexto, en España el Real Decreto (RD) 1620/2007, de diciembre, establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, permitiendo la integración de la reutilización dentro de la planificación de los recursos hídricos, garantizando una adecuada protección a la salud humana y del medio ambiente.

Esta normativa establece cinco usos para las aguas regeneradas: urbanos, agrícolas, industriales, recreativos y ambientales. La recarga de acuíferos está incorporada en el uso ambiental, diferenciando en el tipo de recarga, si es mediante percolación localizada del terreno o inyección directa. En particular, para la recarga mediante percolación localizada del terreno regula concentración de *Escherichia Coli*, Sólidos en Suspensión, Turbidez, Nitrógeno Total y Nitratos. Dado el contexto de Cataluña, la cuál presenta gran parte de sus masas de agua subterráneas contaminadas con nitratos (alrededor del 41% de éstas), el RD 1620/2007 juega un rol fundamental al regular las concentraciones de esta sustancia, así como de otras que pueden afectar la calidad del agua subterránea, permitiendo una reutilización del agua regenerada desde una perspectiva de la seguridad en la calidad del

efluente de recarga, pudiendo generar beneficios en los acuíferos recargados mejorando el estado de las masas de aguas al generar la dilución de contaminantes.

Según datos del Visor Web de la ACA, en Cataluña existen un total de 527 EDAR, de las cuales solo 36 tienen una capacidad superior a 100.000 habitantes, debiendo realizar una declaración de sus emisiones en el Sistema de Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR) de España. La calidad de las aguas regeneradas está directamente relacionada con la zona dónde se encuentran ubicadas, debido al origen del agua que requiere tratamiento, pudiendo tener diferentes concentraciones de sustancias, debiendo cumplir siempre la normativa vigente dependiendo del uso previsto, estipulado en el RD 1620/2007.

Dado lo anterior, es que resulta interesante estudiar la posibilidad de implementar recarga gestionada de acuíferos, mediante el sistema de tratamiento de suelo y acuífero (*MAR-SAT*) en Cataluña, que permita contrarrestar los problemas de disponibilidad de agua, intrusión salina y contaminación de las aguas subterráneas. Lo anterior, en el marco del proyecto RESTORA de la ACA, el cuál pretende aumentar la seguridad hídrica de Cataluña mediante la recarga gestionada de acuíferos, como un método eficaz y económico. En particular, se plantea la recarga de acuíferos mediante la percolación del suelo (*MAR-SAT*) como un método de tratamiento terciario, adicional a los convencionales, mediante la depuración natural del suelo y subsuelo, incrementando los recursos subterráneos con agua de buena calidad. De esta forma, es posible mantener los servicios de agua más elevados, contribuyendo a la recuperación o mantención de los humedales y el intercambio hiporreico y sus servicios ambientales.

4. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en cuatro etapas principalmente, identificación de zonas potenciales para implementación de *MAR-SAT*, categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT*, categorización de las EDAR e identificación de sitios disponibles para la implementación de *MAR-SAT* con agua regenerada. La identificación de zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* se realizó aplicando restricciones técnicas y ambientales al territorio de Cataluña. Estas restricciones fueron procesadas en el software QGIS versión 3.16. Posteriormente, en el mismo software, se realizó un análisis MULTI-CRITERIO para categorizar el territorio según las mejores zonas disponibles para realizar la recarga. Para realizar el presente estudio, se optó por una perspectiva de economía circular considerando las EDAR con una capacidad superior a 100.000 habitantes, las cuales deben declarar sus emisiones en el Sistema de Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR) de España, pudiendo de esta forma dar un nuevo uso al agua regenerada. Las EDAR consideradas en el estudio fueron categorizadas en función de sus emisiones. Finalmente, se identificaron sitios óptimos para la implementación de *MAR-SAT* en las áreas cercanas a las EDAR que presentan condiciones Aceptables de calidad de agua para recarga, es decir, las que no superan los límites normados considerados para Nitratos, Fósforo, COT y Cloruros. La Figura 5 muestra un esquema conceptual del procedimiento realizado.

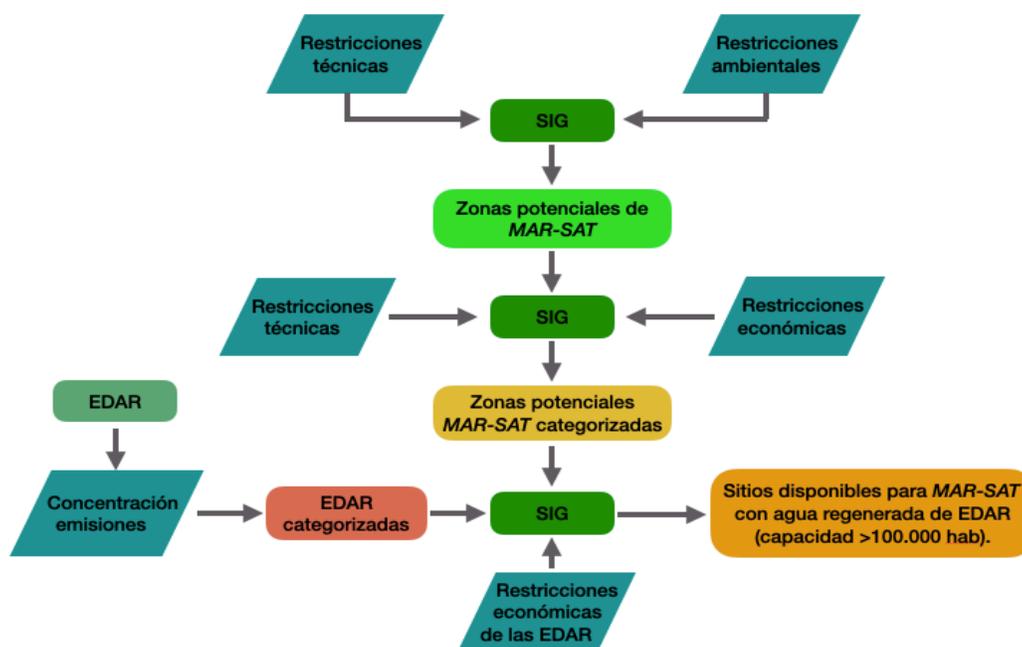


Figura 5: Esquema conceptual de la metodología realizada.

4.1. Identificación de zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en Cataluña

La identificación de zonas potenciales para realizar la recarga de acuífero mediante MAR-SAT se realizó por medio del procesamiento de restricciones técnicas y ambientales, las cuáles representan las condiciones mínimas que debe cumplir el territorio para este tipo de recarga de acuífero. Estas restricciones están basadas en bibliografía de estudios realizados en diferentes partes del mundo (Grecia, Portugal o Túnez), así como documentos y estudios internacionales relevantes, como la guía técnica de recarga de acuíferos que propone Australia o la tesis doctoral presentada por Thon (2014), respectivamente. De esta manera, es posible acotar el territorio de análisis a las zonas idóneas para la realización de la recarga de acuíferos mediante MAR-SAT. En la Tabla 2 se presentan estas restricciones.

Tabla 2: Restricciones técnicas y ambientales consideradas en la identificación de zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en Cataluña.

Factores	Restricción	Tipo de restricción	Referencia
Tipo de acuífero	Tipo Aflorante (S), en condición Libre o Parcialmente Libre	Técnica	Australian Guidelines (2009); Thon (2014)
Masas de agua subterráneas	Presencia de masas de aguas subterráneas		
Naturaleza del acuífero según medio litológico	Presencia de materiales poco permeables		Australian Guidelines (2009); Thon (2014); Kallali <i>et al.</i> (2006)
Distancia a centros urbanos	200 m	Ambiental	Australian Guidelines (2009); Pedrero <i>et al.</i> (2011); Kallali <i>et al.</i> (2006); Anane <i>et al.</i> (2008)
Distancia lagos	500 m		
Distancia embalses	500 m		

Factores	Restricción	Tipo de restricción	Referencia
Distancia zonas húmedas	500 m		(2006); Anane <i>et al.</i> (2008); Tsangaratos <i>et al.</i> (2017)

Las restricciones técnicas permiten acotar el territorio a zonas donde la recarga de acuíferos sea adecuada. La restricción del tipo de acuífero, que indica que debe ser de tipo aflorante y en condición libre o parcialmente libre está relacionada con el rendimiento y aplicabilidad de *MAR-SAT*. La restricción de la naturaleza del acuífero según medio litológico está relacionada con la correcta infiltración. Por último, la restricción de la presencia de masas de aguas subterráneas tiene relación con la capacidad de mezcla que habrá para el agua a infiltrar. Estas restricciones también son consideradas para proyectos de recarga gestionada de acuíferos en los cuales son parte integral de una propuesta que permita aumentar la extracción de agua en los mismos sitios (Australian Guidelines, 2009; Thon, 2014; Kallali *et al.*, 2006).

Las restricciones ambientales consideradas tienen relación con la idoneidad del sitio de *MAR-SAT* las cuales son: distancia a centros urbanos, distancia a lagos, embalses y a zonas húmedas. Se consideró una distancia de seguridad de 200 m alrededor de los centros urbanos, de manera de evitar el contacto directo del agua regenerada con la población. Por otro lado, se consideró una distancia de seguridad de 500 m alrededor de lagos, embalses y zonas húmedas de manera de evitar la posible contaminación por infiltración del agua regenerada. Estos criterios ambientales tienen relación con una lejanía mínima con respecto a la ubicación del sistema *MAR-SAT*. Mientras más lejos esté la cuenca de *MAR-SAT* de estas áreas, habrá menor posibilidad de contacto humano directo y contaminación de aguas (Australian Guidelines, 2009; Pedrero *et al.*, 2011; Kallali *et al.*, 2006; Anane *et al.*, 2008).

Dentro de las restricciones ambientales no se consideró las zonas protegidas, como la Red Natura 2000, ya que según la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, establece que podrán ejecutarse proyectos que beneficien el funcionamiento ecosistémico de dichas zonas o beneficien la estabilidad de aves migratorias o fauna del lugar, debiendo realizar previamente una adecuada evaluación. En relación con lo anterior, Thon (2014) comenta que la recarga de acuífero mediante *MAR-SAT* tiene múltiples beneficios, como la protección de fuentes de aguas, prevención de contaminación costera e intrusión salina,

recuperación de nutrientes para agricultura, aumento en el flujo de agua en los ríos o ahorros en el tratamiento de aguas residuales, pudiendo su implementación generar un impacto positivo en la zona. Por otro lado, tampoco se incorporó en las restricciones ambientales consideradas la zona de seguridad para los ríos, pese a estar presente en la mayoría de los artículos analizados. Esto tiene relación con la particularidad de la zona de estudio, debiendo considerar el contexto de Cataluña, en donde actualmente se descarga de forma directa el agua tratada por las EDAR a fuentes de agua superficiales como los ríos, por lo que el riesgo de contaminación o que el agua infiltrada tenga contacto con la fuente de agua superficial, no cambia la situación actual.

La información geoespacial fue procesada a través del software QGIS 3.16. Se procesaron en primer lugar las restricciones técnicas, seguidas de las restricciones ambientales. La información del tipo de acuífero y masas de aguas subterráneas fueron obtenidas desde el visor web de la Agencia Catalana del Agua (ACA)², mientras que la información de la naturaleza del acuífero según medio litológico fue obtenida desde la página web del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC)³. Primero, se filtró el archivo del tipo de acuífero dejando sólo las zonas donde hubiese un acuífero libre o parcialmente libre. Por otro lado, se filtró el archivo de naturaleza del acuífero según medio litológico quitando las zonas poco permeables que aparecían en la tabla de atributos. Por último, se interseccionaron los archivos ya filtrados junto con el archivo de masas de aguas subterráneas.

Las restricciones ambientales fueron obtenidas desde el visor web de la ACA. Se calculó el área de influencia (*buffer*) respectiva a centros urbanos, lagos, embalses y zonas húmedas, y posteriormente, se le extrajo al territorio obtenido de la intersección de las restricciones técnicas, obteniendo las zonas donde es posible implementar la recarga de acuífero mediante *MAR-SAT*.

² Visor web de la ACA: https://sig.gencat.cat/visors/VISOR_ACA.html

³ Instituto Geológico y Cartográfico de Cataluña: <https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Cartografia-geologica-i-geotematica/Cartografia-hidrogeologica>

4.2. Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT*

La categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* se realizó mediante un análisis MULTI-CRITERIO en el territorio obtenido en la sección anterior, de esta manera se pudo categorizarlo, identificando las mejores zonas de recarga de acuífero. Se consideraron restricciones técnicas y económicas las cuales se presentan en la Tabla 3, obtenidas de a partir de diferentes artículos y documentos internacionales. La categoría Aceptable representa al mejor escenario respecto a la restricción evaluada que permite la implementación de *MAR-SAT*. La categoría de Moderado representa una condición intermedia de viabilidad de implementación, mientras que la categoría de Poco Aceptable corresponde a la peor condición, siendo un sitio no recomendado de aplicabilidad de *MAR-SAT*.

Tabla 3: Restricciones técnicas y económicas para la categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT.

Factores	Restricción	Categoría	Valor	Formato	Tipo de restricción	Referencia
Tipo de acuífero	Libre	Aceptable	3	Shapefile	Técnica	Australian Guidelines (2009); Thon (2014)
	Parcialmente Libre	Moderado	2			
Permeabilidad del acuífero	$\geq 1,22 \text{ m/d}$	Aceptable	3	Shapefile		Thon (2014)
	$1,22 - 0,12 \text{ m/d}$	Moderado	2			
	$\leq 0,12 \text{ m/d}$	Poco Aceptable	1			
Profundidad del acuífero	$\geq 5 \text{ m}$	Aceptable	3	Shapefile		Kallali <i>et al.</i> (2006); Pedrero <i>et al.</i> (2011)
	$< 5 \text{ m}$	Poco Aceptable	1			
Pendiente	$\leq 5\%$	Aceptable	3	Ráster		Thon (2014); Tsangaratos <i>et al.</i> (2017)); Kallali <i>et al.</i> (2006); Pedrero <i>et al.</i> (2011); Anane <i>et al.</i> (2008))
	$5\% - 12\%$	Moderado	2			
	$\geq 12\%$	Poco Aceptable	1			
Zonas de inundación (periodos de retorno)	Sin inundación	Aceptable	3	Shapefile	Australian Guidelines (2009)	
	$T = 100 \text{ años}$	Moderado	2			
	$T = 10 \text{ años}$	Poco Aceptable	1			

Factores	Restricción	Categoría	Valor	Formato	Tipo de restricción	Referencia
Uso de Suelo	Cultivos, prados, matorrales, vegetación escasa/nula, zonas quemadas, arrozales, cítricos	Aceptable	3	Ráster		Tsangaratos <i>et al.</i> (2017); Pedrero <i>et al.</i> (2011)
	Frutales, viñedos, bosques	Moderado	2			
	Aguas marinas, continentales, urbanizaciones, infraestructura vial, zonas urbanas, zona industrial y comercial, arenales y playas, vegetación en zonas húmedas	Poco Aceptable	1			
Distancia a carretera	$\leq 50 m$	Aceptable	3	Shapefile	Económica	Australian Guidelines (2009); Tsangaratos <i>et al.</i> (2017); Pedrero <i>et al.</i> (2011)
	$> 50 m$	Moderado	2			

Las restricciones técnicas y económicas fueron procesadas en el Software QGIS 3.16. Para realizar el análisis se debieron transformar todos los archivos a formato *ráster* y reclasificarlos según las restricciones y valor correspondiente, presentados en la Tabla 3. Primero, se creó un archivo *ráster* con valores de 0 y de 10 x 10 metros con la forma de Cataluña, en adelante denominado *ráster base*, el cuál posteriormente se cortó con las restricciones que se encontraban en formato *shapefile* y reclasificó según correspondía. Las restricciones que se encontraban en formato *ráster* fueron reclasificadas directamente.

El archivo de tipo de acuífero fue obtenido de la sección anterior, una vez realizado el filtro correspondiente. Luego, este archivo se cortó con el *ráster base* y reclasificó según correspondía.

La permeabilidad y profundidad del acuífero se obtuvo desde las Fichas de las Masas de Agua que dispone la ACA. Para esto, se descargó el archivo de las unidades geológicas de Cataluña desde la página web del ICGC y se intersectó con el archivo de las zonas viables para realizar la recarga del acuífero mediante *MAR-SAT*, obtenido en la sección anterior, de esta forma se pudo identificar las características de los acuíferos de manera más fácil dentro de las Fichas. Se evaluaron dos escenarios, el primero, consideró los valores de permeabilidad obtenidos directamente desde las Fichas de Masas de las Masas de Agua. El segundo escenario, consideró la permeabilidad obtenida directamente de las Fichas de las Masas de Agua más una permeabilidad calculada para las zonas en que no se encontraba este valor disponible. Según Villarroya (2009) la permeabilidad es posible calcularla a partir de la relación entre la transmisividad y la zona saturada del acuífero. Estos datos se podían obtener directamente de las Fichas de las Masas de Agua de la ACA. La Ecuación 1 representa el cálculo de la permeabilidad. Una vez ingresado los valores de permeabilidad para los 2 escenarios evaluados y profundidad al *shapefile*, se filtró según las respectivas restricciones, para luego ser cortado con el *ráster base* y reclasificado.

$$Permeabilidad \left(\frac{m}{d} \right) = \frac{Transmisividad \left(\frac{m^2}{d} \right)}{Zona Saturada (m)} \quad (1)$$

La pendiente se obtuvo a partir de un Modelo de Elevación Digital (*DEM*, por sus siglas en inglés), el cuál fue descargado desde la página web del ICGC con una resolución de 5 x 5 metros, la cual fue posteriormente reclasificada en función de su restricción respectiva.

El archivo de zonas de inundación se analizó en función de periodos de retorno de 10 y 100 años, los cuales se obtuvieron desde el visor web de la ACA en formato de *shapefile*. Se procedió a cortar estas zonas con el *ráster base* y luego se reclasificó.

El archivo de uso de suelo se obtuvo desde la página web del ICGC en formato *ráster* y con resolución de 10 x 10 metros, el cuál fue posteriormente reclasificado.

El archivo de la distancia a las carreteras fue calculado en función de las rutas de transporte de Cataluña, obtenidas a partir de la página web de la Infraestructura de Datos Espaciales de España⁴, las que se obtuvieron en formato *shapefile*. Se procedió a realizar un área de influencia a las rutas de transporte de 50 metros. Luego, este archivo se cortó con el *ráster base* y se procedió a reclasificarlo.

Luego de obtener todas las restricciones en formato *ráster*, se creó un único mapa de idoneidad para la identificación de las áreas de infiltración para la recarga del acuífero en cada escenario evaluado, considerando un escenario con permeabilidad obtenida directamente de las Fichas de las Masas de Agua y otro escenario que considera además una permeabilidad calculada. Lo anterior, se realizó a partir del procesado de los siete mapas temáticos (tipo de acuífero, permeabilidad y profundidad del acuífero, pendiente, zonas de inundación, uso de suelo y distancia a carreteras) a través de operaciones algebraicas de mapas realizadas en “calculadora *ráster*”, tal como se presenta en la Ecuación 2.

$$\sum_{k=1}^{tm} (M_{ij}^k)_{mn} = \sum_{k=1}^{tm} \begin{pmatrix} M_{11}^k & M_{12}^k & \dots & M_{1n}^k \\ M_{21}^k & M_{22}^k & \dots & M_{2n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{m1}^k & M_{m2}^k & \dots & M_{mn}^k \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde M_{ij}^k es el vector de valores de celda de cada mapa temático en el cuál “*ij*” representan a la fila y columna, respectivamente. Por otro lado, “*mn*” representan a las dimensiones de cuadrículas del mapa temático, “*k*” representa el tipo de mapa temático y “*tm*” representa el número de mapas temáticos.

El valor de cada celda del mapa de idoneidad final resultó de la operación booleana entre los valores de 1, 2 o 3 almacenado en cada celda de cada mapa temático. De esta forma, se

⁴ Infraestructura de Datos Espaciales de España: <https://www.idee.es/web/idee/segun-tipo-de-servicio>

obtiene un *ráster* final de dimensiones “*mn*”, con valores ubicados en las filas y columnas “*ij*”, tal como se presenta en la Ecuación 3.

$$(S_{ij})_{mn} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Una vez generado cada *ráster* final para los dos escenarios evaluados, se procedió a reclasificarlos en función de los valores obtenidos pudiendo categorizar el territorio. Las categorías consideradas fueron cuatro: No Situable, Poco Aceptable, Moderado y Aceptable. La descripción de cada categoría considerada se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4: Categorías consideradas para la clasificación del territorio de Cataluña para la implementación de *MAR-SAT*.

Categoría	Descripción
No Situable por Condición Hidrogeológica	Zonas que no cumplen con las condiciones hidrogeológicas mínimas que permitan realizar recarga de acuíferos mediante <i>MAR-SAT</i> .
Poco Aceptable	Zonas en las cuales no es recomendable realizar recarga de acuífero mediante <i>MAR-SAT</i> , pese a cumplir con las condiciones mínimas debido a que la recarga no será de forma eficiente.
Moderadamente Aceptable	Zonas donde es posible realizar recarga de acuífero mediante <i>MAR-SAT</i> pudiendo existir dificultades para su implementación.
Aceptable	Zonas óptimas para realizar recarga de acuífero mediante <i>MAR-SAT</i> , ya que cumplen con la mayoría de las restricciones consideradas.

Se clasificó como No Situable a las zonas del territorio de Cataluña que quedan fuera de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT*, obtenidas del apartado anterior. Para las otras tres categorías consideradas, el valor mínimo y máximo que podría obtener el *ráster* final de cada escenario, debido al valor mínimo y máximo de cada restricción considerada, es de 9 y 21, respectivamente. De esta manera, los 13 posibles valores se

dividieron entre las tres categorías resultando una agrupación de 4 valores de píxel para dos categorías y de 5 valores de píxel para una categoría. Se optó por una perspectiva más restrictiva, dejando la agrupación de los 5 valores de píxel para la categoría de Moderadamente Aceptable. La agrupación de los valores de píxel resultantes asociados a cada categoría se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Agrupación de los valores de píxel resultantes asociados a cada categoría considerada.

Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
9	Poco Aceptable	13	Moderadamente Aceptable	18	Aceptable
10		14		19	
11		15		20	
12		16		21	
-		17		-	

4.3. Categorización de las EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes

Las EDAR consideradas fueron las que poseen una capacidad superior a 100.000 habitantes, pudiendo adoptar una perspectiva de economía circular que permita aprovechar las aguas regeneradas, además de poder utilizar la información declarada en el PRTR por estas entidades. En total se han considerado 36 EDAR. La categorización de las EDAR se realizó en función de la concentración de Nitrógeno, Fósforo, Carbono Orgánico Total (COT) y Cloruros en las aguas regeneradas según normativa. Lo anterior, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6: Sustancias consideradas para la categorización de las EDAR, sus límites y normativa asociada.

Sustancia	Valor límite	Normativa
Nitrógeno	10 mg/L	RD 1620/2007
Fósforo	20 mg/L	
COT	16 mg/L	Congreso Nacional de Medio Ambiente, 2020
Cloruros	250 mg/L	RD 140/2003

En primer lugar, se consideró lo estipulado en el RD 1620/2007, que establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, donde se estipula una concentración límite para Nitrógeno de 10 mg/L en las aguas regeneradas utilizadas para la recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno (*MAR-SAT*), considerado como un uso ambiental. Según Cárdenas & Sánchez (2013) es importante controlar las concentraciones de tanto el Nitrógeno como Fósforo de las aguas residuales, ya que pueden incidir en la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, eutrofización e incorporar niveles tóxicos que puedan afectar a la biodiversidad y a la salud humana, inclusive en bajas concentraciones. Debido a lo anterior, es que se consideró también las concentraciones de Fósforo de las EDAR. En este contexto, no se encontró una normativa asociada a concentraciones de Fósforo presente en aguas regeneradas que son utilizadas en recarga de acuíferos, sin embargo, el RD 1620/2007 regula el Fósforo en aguas regeneradas que serán utilizadas en un uso recreativo, estipulando un límite de 20 mg/L, siendo el valor adoptado en el presente análisis.

El Congreso Nacional de Medio Ambiente (2020) sobre la recarga gestionada de acuíferos en España, relacionado acerca de previsiones en materia de planificación y gobernanza en el corto plazo, comenta que los valores estipulados en el RD 1620/2007 para la recarga de acuíferos son escasos, pero altamente restrictivos, proponiendo la incorporación de otros parámetros y sustancias tal como lo sugiere la OMS. En este contexto, se propone limitar la concentración de Carbono Orgánico Total (COT) en las aguas regeneradas para la recarga artificial, estableciendo un límite de 16 mg/L. Según lo anterior, se consideró dicho límite para el COT presente en las aguas regeneradas de las EDAR.

Por último, se incluyó también en el análisis la concentración de Cloruros ya que corresponde a una sustancia que en contenido elevado puede dañar conducciones, estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal. Es importante mencionar, que, no representa un mayor inconveniente más que un gusto desagradable del agua para los seres humanos. Sin embargo, podría ser un potenciador negativo en zonas que ya tengan problemas de intrusión salina y elevadas concentraciones de sal (NaCl) (Chango, 2017). Para los Cloruros no existe una normativa que regule su concentración en las aguas regeneradas utilizadas en recarga de acuíferos, es por esto, que, se consideró como valor normativo el estipulado en el RD 140/2003, de criterios sanitarios del agua para consumo humano, dónde se establece un valor límite de 250 mg/L.

Para la categorización de las EDAR, primero, se obtuvo desde la página web del PRTR las concentraciones en kilogramos al año de Nitrógeno, Cloruros, Carbono Orgánico Total (COT) y Fósforo de los años 2018 y 2019. Además, se obtuvo el respectivo caudal de diseño de cada EDAR. Con esta información, y tal como se presenta en la Ecuación 4, se pudo obtener

la concentración promedio anual (basada en los datos de los años 2018 y 2019) por sustancia en las aguas regeneradas.

$$\text{Concentración sustancia } \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{\text{Promedio emisión } \left(\frac{kg}{año}\right) * 1000 \left(\frac{m^3 * mg}{kg * L}\right)}{\text{Caudal de diseño } \left(\frac{m^3}{día}\right) * 365 \left(\frac{día}{año}\right)} \quad (4)$$

Las concentraciones promedio anual en cada EDAR por sustancia evaluada fueron comparadas con los valores límites mencionados anteriormente. La categorización de las EDAR se realizó siguiendo el mismo principio del apartado anterior (4.2), efectuando un análisis MULTI-CRITERIO de éstas, pudiendo agruparlas en las mismas categorías utilizadas anteriormente. Se le atribuyó una categoría a cada EDAR en función de la cantidad de sustancias que superaban los límites considerados, de acuerdo con lo anterior, en la Tabla 7 se presenta la manera de realizar la categorización.

Tabla 7: Categorías consideradas para la clasificación de las EDAR de Cataluña consideradas para la implementación de MAR-SAT.

Categoría	Descripción
No Factible por Calidad de Agua	La EDAR supera los límites considerados de todas o al menos tres sustancias evaluadas.
Poco Aceptable	La EDAR supera el límite considerado de dos sustancias evaluadas.
Moderadamente Aceptable	La EDAR supera el límite de una sustancia evaluada.
Aceptable	La EDAR no supera el límite de ninguna sustancia evaluada.

4.4. Selección de sitios disponibles para realizar MAR-SAT con agua regenerada de EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes

La selección de sitios disponibles para realizar MAR-SAT se realizó una vez categorizadas las EDAR según el apartado anterior. Para esto, se consideraron las EDAR que adoptaron la categoría de “Aceptable” ya que cumplen con una calidad de agua regenerada óptima para realizar la recarga de acuífero.

A la categorización del territorio realizado en el apartado 4.2. basado en las siete restricciones técnicas y económicas, se le agregaron dos restricciones que son dependientes

directamente de las EDAR consideradas en el análisis. Estas restricciones están relacionadas a una distancia y una elevación máxima con respecto al sitio disponible para realizar la recarga de acuífero. Los valores considerados para la restricción de distancia y elevación se presentan en la Tabla 8.

El procesamiento de las restricciones fue el mismo que se realizó con las restricciones consideradas en el apartado 4.2. La restricción de la distancia con respecto a la EDAR se encontraba en formato *shapefile*, por lo que se debió transformar a *ráster* utilizando el archivo de “*ráster base*”, realizando posteriormente la respectiva reclasificación.

La restricción de la elevación con respecto a la EDAR se procesó considerando la restricción de distancia a la EDAR, por lo tanto, sólo se consideró para esta restricción las zonas que se encontraban dentro de un radio de 8 km, realizando en estas zonas la reclasificación del *ráster* de acuerdo con la restricción de altura. Para lo anterior, se utilizó el *DEM* obtenido de la página del ICGC con una resolución de 5 x 5 metros.

Una vez obtenidas las 2 nuevas restricciones en formato *ráster*, se realizó la operación booleana de éstas junto con las otras 7 restricciones consideradas en el apartado 4.2. En este análisis se consideró sólo el segundo escenario, que incorpora el cálculo de permeabilidad debido a que abarca una mayor cantidad de territorio de análisis. De esta forma, se logró re-categorizar el territorio, identificando dentro de un radio de 8 km los sitios óptimos para realizar la recarga de acuíferos utilizando el agua regenerada de las EDAR que poseían una categoría de Aceptable. La forma de realizar esta nueva categorización del territorio fue en función de los posibles valores adoptados por los píxeles divididos en la cantidad total de categorías consideradas. Cabe destacar, que, para esta clasificación coincidió que una categoría debería agrupar 5 valores de píxel, mientras que las otras dos categorías podrían agrupar 6 valores de píxel cada una. De esta forma, y tal como se presentaba en algunas restricciones, considerando sólo las categorías de “Moderadamente Aceptable” y “Aceptable”, es que se optó para agrupar en estas dos últimas categorías la mayor cantidad de píxeles. En la Tabla 9 se presenta la agrupación de los valores de píxel resultantes asociados a cada categoría considerada incorporando la evaluación de las EDAR.

Tabla 8: Restricciones económicas consideradas para la evaluación de las EDAR.

Factores	Restricción	Categoría	Valor	Formato	Tipo de restricción	Referencia
Distancia a la EDAR	$\leq 8 \text{ km}$	Aceptable	3	Shapefile	Económica	Pedrero <i>et al.</i> (2011); Kallali <i>et al.</i> (2006)
	$8 \text{ km} - 16 \text{ km}$	Moderado	2			
	$\geq 16 \text{ km}$	Poco Aceptable	1			
Elevación con respecto a la EDAR	$\leq 15 \text{ m}$	Aceptable	3	Ráster		
	$15 \text{ m} - 60 \text{ m}$	Moderado	2			
	$\geq 60 \text{ m}$	Poco Aceptable	1			

Tabla 9: Agrupación de los valores de píxel resultantes asociados a cada categoría considerada incorporando la evaluación de las EDAR.

Valor		Categoría	Valor		Categoría	Valor		Categoría
11	15	Poco Aceptable	16	20	Moderadamente Aceptable	22	26	Aceptable
12	-		17	21		23	27	
13	-		18	-		24	-	
14	-		19	-		25	-	

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Identificación de zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en Cataluña

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos tras aplicar las restricciones técnico-ambientales para implementar la recarga de acuíferos en Cataluña mediante *MAR-SAT*. Cataluña presenta una superficie total de 32.116 km², de los cuales, según los resultados obtenidos, 6.997 km² serían óptimos para realizar recarga de acuíferos mediante *MAR-SAT*. Las zonas óptimas de mayor extensión de forma continua se presentan principalmente en la parte suroeste y norte (de oeste a este) de Cataluña.

De las restricciones aplicadas, la que permitió acotar en mayor proporción al territorio fue la de “naturaleza del acuífero según medio litológico”, dejando fuera del análisis todas las zonas que se consideraban como poco permeables, las cuales consistían principalmente en depósitos detríticos y margo-calcáreos, materiales graníticos y materiales metamórficos. Estas zonas se ubicaban principalmente al centro de Cataluña.

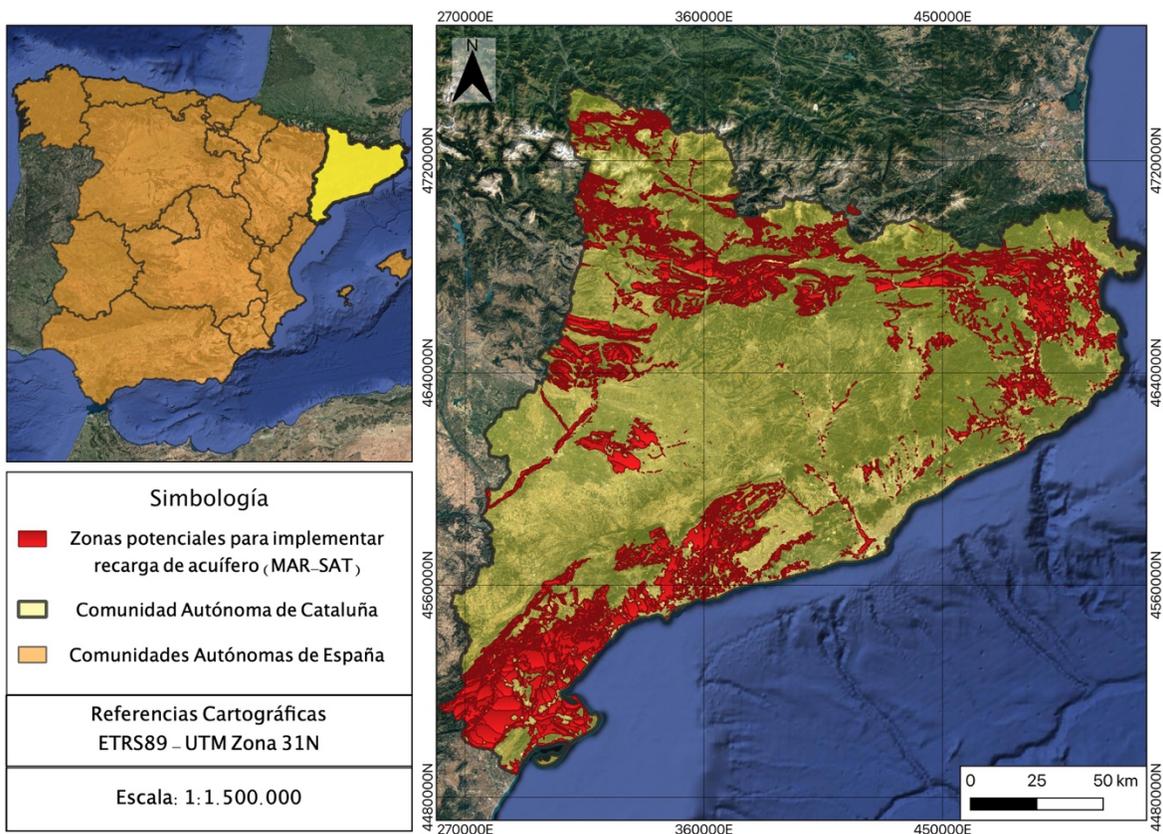


Figura 6: Zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en Cataluña.

5.2. Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT*

El análisis MULTI-CRITERIO se realizó en las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* obtenidas del apartado anterior una vez aplicadas las restricciones técnico-ambientales. El territorio se agrupó en cuatro categorías en función de los resultados obtenidos luego de sumar los siete mapas temáticos considerados (operación booleana) que ya se encontraban reclasificados. La suma de los mapas temáticos se realizó para cada escenario evaluado, resultando valores de píxel que van desde los 9 hasta los 21 en cada escenario. Es importante mencionar, que, el segundo escenario, que considera el cálculo de permeabilidad a partir de la transmisividad y profundidad de la zona saturada, implica un aumento del territorio disponible para el análisis, pero no significa un aumento en los valores finales de píxel.

De la superficie total de Cataluña, que corresponde aproximadamente a 32.116 km², en el primer escenario evaluado relacionado con la permeabilidad obtenida directamente de las Fichas de Masas de Agua, resultaron 25.127 km² con la categoría No Situable, 0,59 km² con la categoría Poco Aceptable, 803,21 km² con la categoría Moderadamente Aceptable y 797,52 km² con la categoría de Aceptable, existiendo un total de superficie analizada de 26.728,61 km². Por otro lado, el segundo escenario evaluado incluyó mayor superficie de análisis respecto al primero, ya que incorpora el cálculo de la permeabilidad a partir de la transmisividad y profundidad de la zona saturada. En éste, se obtuvo 25.200 km² de superficie categorizada como No Situable, 0,77 km² de superficie categorizada como Poco Aceptable, 2.798,21 km² de superficie categorizada como Moderadamente Aceptable y 1.795,14 km² de superficie con la categoría de Aceptable. Analizando un total de 29.794,65 km². La diferencia generada entre la superficie de Cataluña y el total del territorio analizado corresponden a zonas que no presentan datos de permeabilidad o de profundidad del acuífero, por lo que no se incluyeron en el análisis siendo necesario otros estudios previos que permitan obtener estos parámetros. De esta manera, y a partir de los datos disponibles para la realización del presente estudio, para el primer escenario se pudo analizar el 88,2% del territorio de Cataluña, mientras que, al incorporar la permeabilidad calculada a partir de la transmisividad y profundidad de la zona saturada, se pudo analizar el 92,8% de la superficie total.

Los resultados fueron analizados en un principio por provincias y posteriormente por comarcas, de manera de poder comprender de mejor forma el territorio de Cataluña. La provincia de Tarragona es la que posee la mayor superficie categorizada como "Aceptable" para implementar *MAR-SAT*, siendo de 345,8 km² para el primer escenario, de la

permeabilidad obtenida a partir de las Fichas de Masas de Agua y de 1004,5 km² considerando el segundo escenario, que incorpora el cálculo de permeabilidad. Cabe destacar, que, a su vez, fue la provincia que aumentó en mayor proporción el territorio disponible para implementar recarga de acuíferos al considerar el cálculo de permeabilidad, agregando 656,6 km² como territorio disponible principalmente por la parte sur de la provincia, por Tortosa y L'Ampolla. Por otro lado, la provincia de Barcelona es la que menor territorio disponible para realizar recarga de acuíferos presenta, siendo de 130,1 km² y 182,4 km² para el escenario 1 y 2 evaluado, respectivamente. Lo anterior, se debe principalmente al grado de urbanización que posee la provincia y que, según los datos en formato *shapefile* obtenidos del ICGC (capa de unidades geológicas de Cataluña), al interior, presenta condiciones hidrogeológicas de poca permeabilidad limitando considerablemente el territorio. En el primer escenario, de la permeabilidad obtenida directamente de las Fichas, Lleida es la segunda provincia con mayor territorio disponible para realizar recarga, siendo Girona la tercera. Esta situación cambia al considerar el cálculo de permeabilidad, agregando a la provincia de Girona 285,8 km² disponibles para realizar recarga, siendo en este escenario, la segunda provincia con mayor territorio disponible para recarga. La situación que ocurrió en Girona fue que de las Fichas de las Masas de Agua no se podía obtener directamente datos de permeabilidad, pero sí tenían datos de profundidad de la zona saturada y de transmisividad, por lo que era posible su cálculo. De esta forma, se agregó al territorio analizado la zona de Figueres (según el cálculo de permeabilidad), la cuál posee una gran cantidad de zonas óptimas (zonas categorizadas como Aceptable) para realizar la recarga debido a sus condiciones hidrogeológicas, encontrándose acuíferos porosos en medios aluviales y co-aluviales con porosidad intergranular.

En la provincia de Tarragona, para el primer escenario evaluado (permeabilidad obtenida directamente de las Fichas), la comarca del Baix Camp es la que presenta la mayor porción de territorio disponible para realizar la recarga de acuíferos, con 143,6 km², seguida de la comarca de Tarragonès con 105,43 km². Al considerar el segundo escenario evaluado, incorporando el cálculo de permeabilidad, la cantidad de zonas categorizadas como Aceptables para recarga de acuíferos aumentaron considerablemente, siendo la comarca del Montsià la que presenta la mayor superficie de zonas de recarga, con 275,7 km². En este escenario, también las comarcas del Baix Ebre, Baix Camp, Tarragonès y Alt Camp presentan una gran cantidad de superficies disponibles para recarga, resultando de 218,7 km²; 157,9 km², 113,5 km² y 112,9 km², respectivamente. Es importante mencionar, que, gran parte del Montsià presenta una predominancia de acuíferos porosos en medio detríticos granulares con porosidad intergranular y de acuíferos porosos en medios aluviales y co-

aluviales con porosidad intergranular, siendo una zona permeable que facilita la recarga de acuíferos por percolación. Dentro de la provincia de Tarragona, algunos sitios de la comarca del Baix Ebre no presentaba datos de permeabilidad, por lo que no fue posible obtener resultados en estas zonas, siendo necesario realizar estudios de permeabilidad de la zona para comprender la factibilidad de implementar recarga artificial de acuíferos, pudiendo incluso aumentar la superficie disponible de recarga para esta zona. En la Figura 7 y Figura 8 se pueden apreciar las diferentes zonas categorizadas en No Situables, Poco Aceptables, Moderadamente Aceptable o Aceptables junto con las EDAR con una capacidad superior a 100.000 habitantes para la provincia de Tarragona.

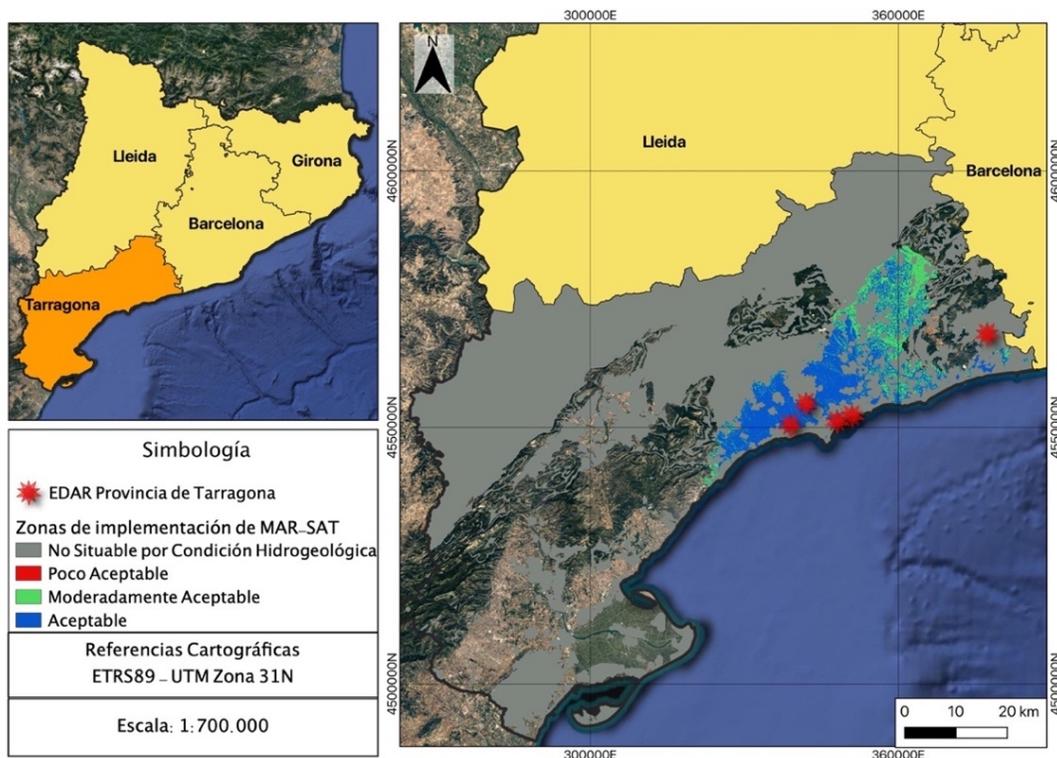


Figura 7: Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en la provincia de Tarragona para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.

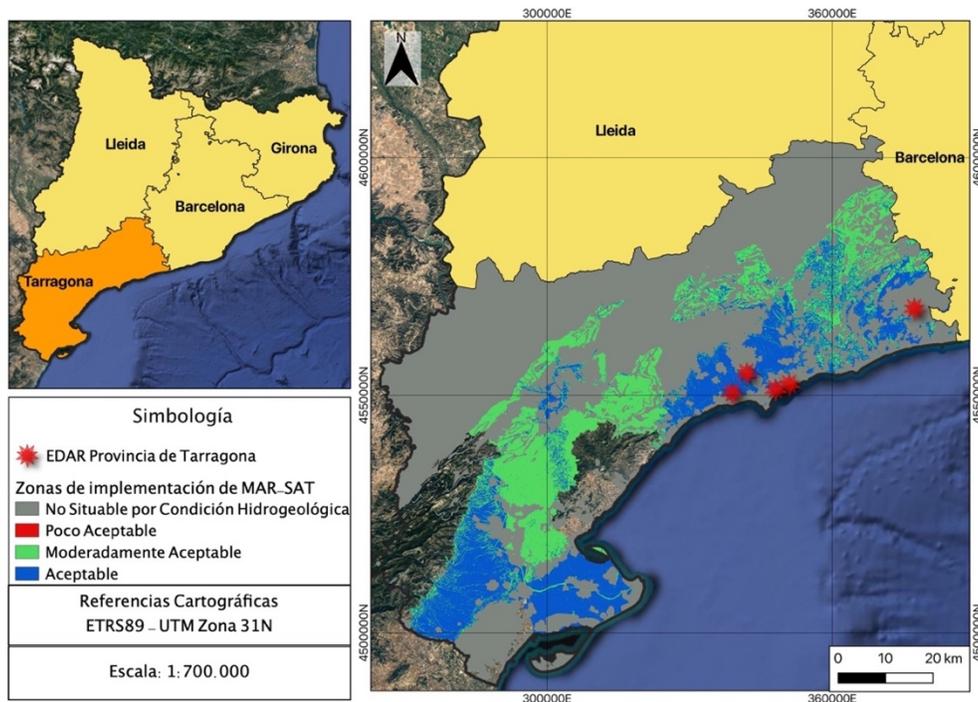


Figura 8: Categorización de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT en la provincia de Tarragona para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.

En la provincia de Barcelona la comarca del Alt Penedès es la que presenta la mayor proporción de territorio categorizada como Aceptable para realizar recarga de acuífero, siendo de 34,2 km² y de 49,8 km² para el primer y segundo escenario evaluado, respectivamente. La comarca de Berguedà presenta una gran cantidad de zonas categorizadas como Moderadamente Aceptables. Tanto la comarca de Berguedà como Alt Penedès presentan predominantemente acuíferos consolidados carbonatados con porosidad por fisuración y/o karstificación. Las comarcas de Osona y Vallès Occidental también presentan zonas Aceptables para recarga de acuíferos interesantes de analizar, resultando una disponibilidad de superficie de 23,13 km² y 20,61 km², respectivamente para cada escenario evaluado. Además, para el segundo escenario, considerando el cálculo de permeabilidad se añade también la comarca del Baix Llobregat con 23,50 km². Es importante mencionar, que, las EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes disponibles para la recarga de acuíferos en la provincia de Barcelona se concentran principalmente en la parte sur y de la costa, debido a la elevada concentración poblacional que presentan estas zonas, principalmente en la comarca del Barcelonès, la cuál a su vez posee una baja cantidad de superficie Aceptable de recarga, resultando ser inferior a 1 km². En la Figura 9 y 10 se presenta la categorización del territorio para cada escenario evaluado.

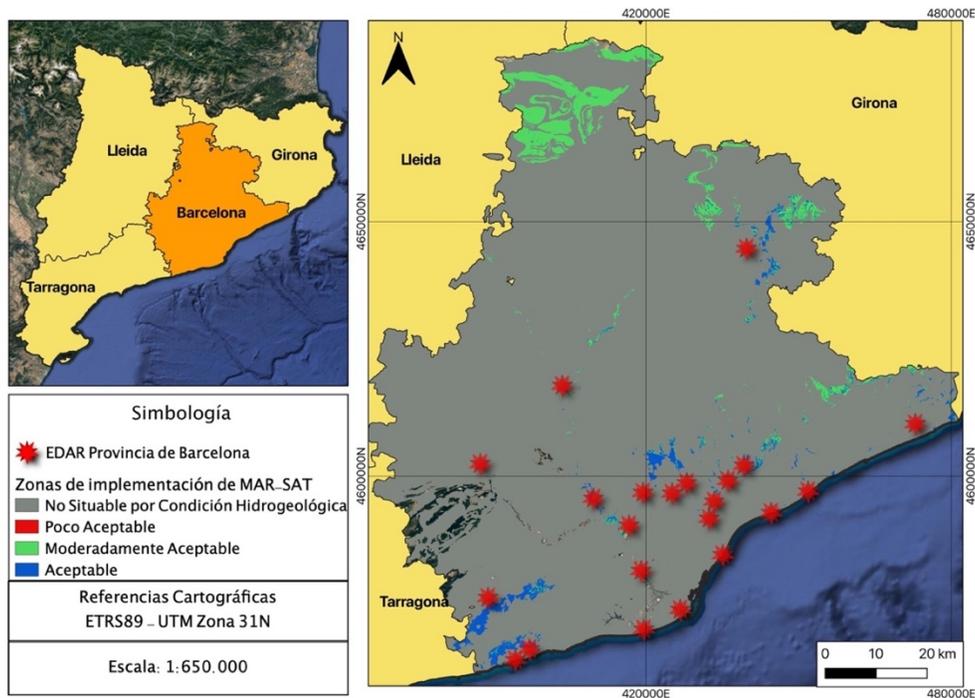


Figura 9: Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en la provincia de Barcelona para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.

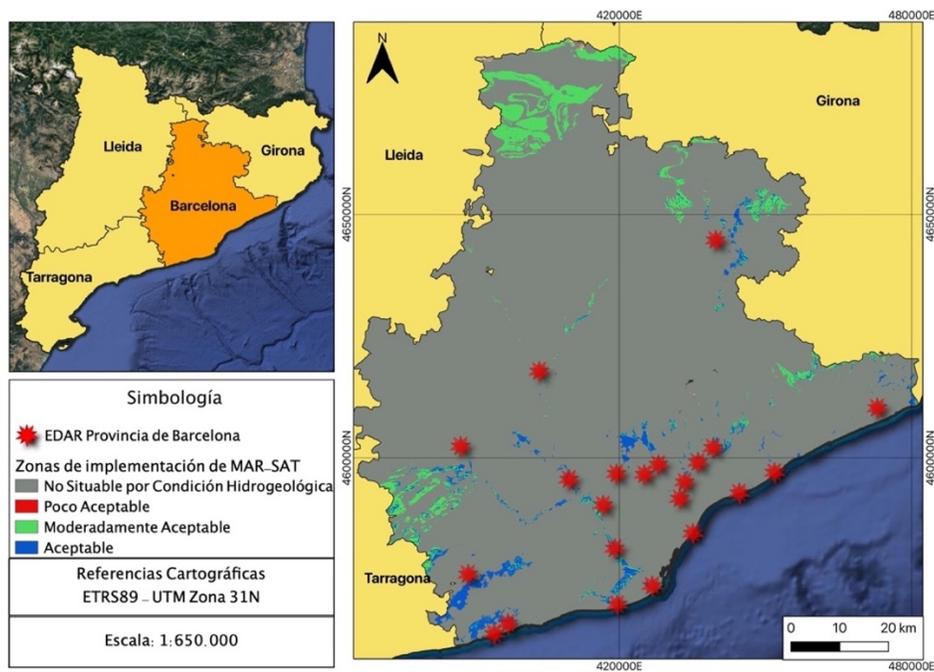


Figura 10: Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en la provincia de Barcelona para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.

En la provincia de Girona, la comarca del Gironès para el primer escenario es la que presenta el mayor territorio categorizado como Aceptable para recarga de acuíferos, resultando 51,3 km² disponibles, seguido por la comarca del Baix Empordà con 43,1 km². En el segundo escenario, que considera el cálculo de la permeabilidad, la comarca del Alt Empordà es la que posee el mayor territorio, con 202,6 km² disponibles. Las comarcas del Gironès y Pla de l'Estany también presentan interesantes zonas de recarga, obteniendo una superficie de 69 km² y 65,3 km², respectivamente. Las zonas disponibles (de ambos escenarios evaluados) presentan predominancia de acuíferos porosos en medios detríticos granulares con porosidad intergranular; acuíferos consolidados carbonatados con porosidad por fisuración y/o karstificación y acuíferos porosos en medios aluviales y/o co-aluviales con porosidad intergranular, generando que ciertas zonas de la costa sean idóneas para implementar sistemas de recarga mediante *MAR-SAT*. Es importante mencionar, que, según lo presentado en el Visor Web de la ACA⁵, justamente gran parte las zonas costeras de las comarcas del Alt Empordà, Baix Empordà y Gironès corresponden a zonas vulnerables por nitratos y son zonas de acuíferos protegidos por contaminación de nitratos, por lo que realizar la recarga podría traer beneficios en términos de dilución de contaminantes, pero a su vez, se debería tener especial cuidado tanto con la calidad del agua a infiltrar como las condiciones del terreno. En la Figura 11 y Figura 12 se pueden apreciar las diferentes zonas categorizadas junto con las EDAR con una capacidad superior a 100.000 habitantes para la provincia de Girona.

⁵ Visor Web de la ACA: https://sig.gencat.cat/visors/VISOR_ACA.html

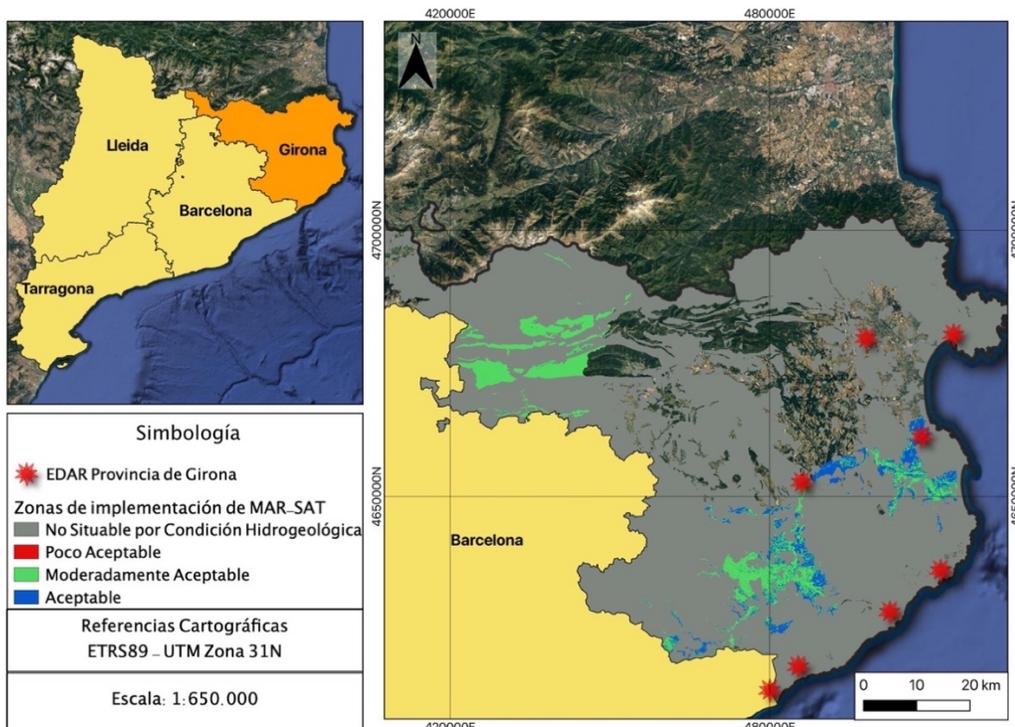


Figura 11: Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en la provincia de Girona para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.

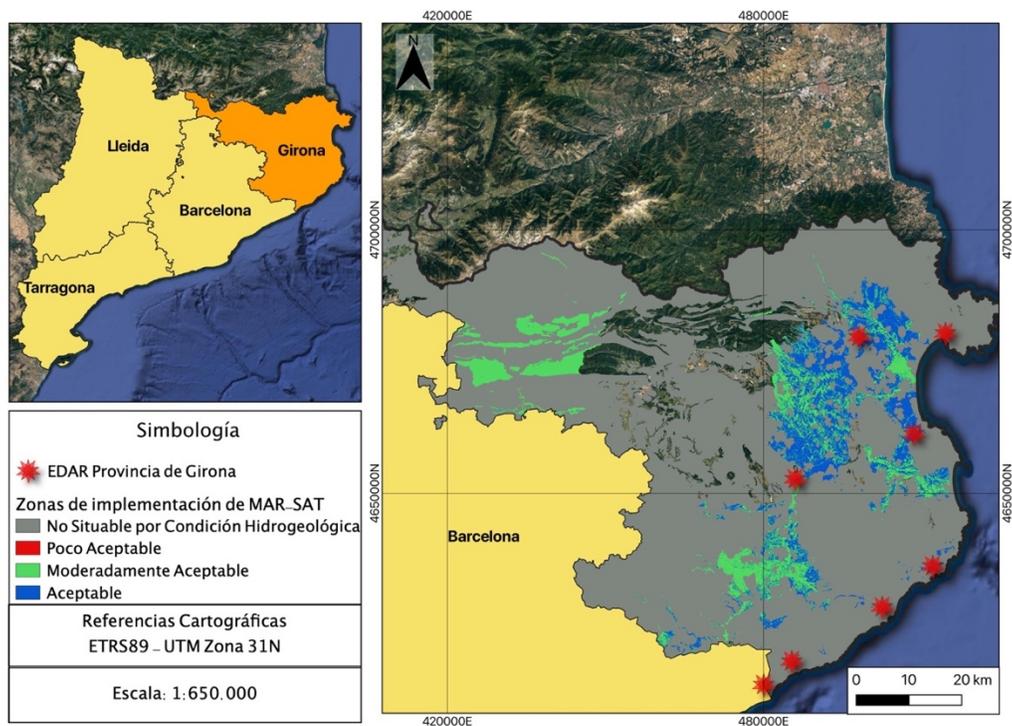


Figura 12: Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en la provincia de Girona para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.

En la provincia de Lleida las comarcas de Pla d’Urgell y de Urgell son las que poseen la mayor superficie de zonas categorizadas como Aceptables para realizar la recarga de acuíferos en los dos escenarios evaluados. Tanto en el primer escenario evaluado como en el segundo, la comarca de Pla d’Urgell y de Urgell obtuvieron la misma superficie categorizada como Aceptable para la recarga de acuíferos, siendo de 100 km² y de 72,23 km², respectivamente. En las Figuras 13 y 14 se puede apreciar que, al considerar el segundo escenario, del cálculo de permeabilidad, se logra añadir la zona centro-norte de la provincia, de las comarcas de Alt Urgell, Noguera y Pallars Jussà, las cuales se categorizaron como zonas Moderadamente Aceptables debido a sus condiciones de permeabilidad. Se calcularon valores de permeabilidad inferiores a 1,22 m/d, y, en ciertos casos, inferiores a 0,12 m/d, es por esto, que, estas zonas para el criterio de permeabilidad analizado no serían zonas Aceptables, pero sí zonas Moderadamente Aceptables, las cuales podrían requerir un estudio más detallado. Es importante mencionar, que, en estas zonas categorizadas como Moderadamente Aceptables no se encontraban en las proximidades EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes, por lo que la opción de recarga según las condiciones del presente estudio se dificulta aún más. Lo anterior, se puede observar en las Figuras 13 y 14, respectivamente.

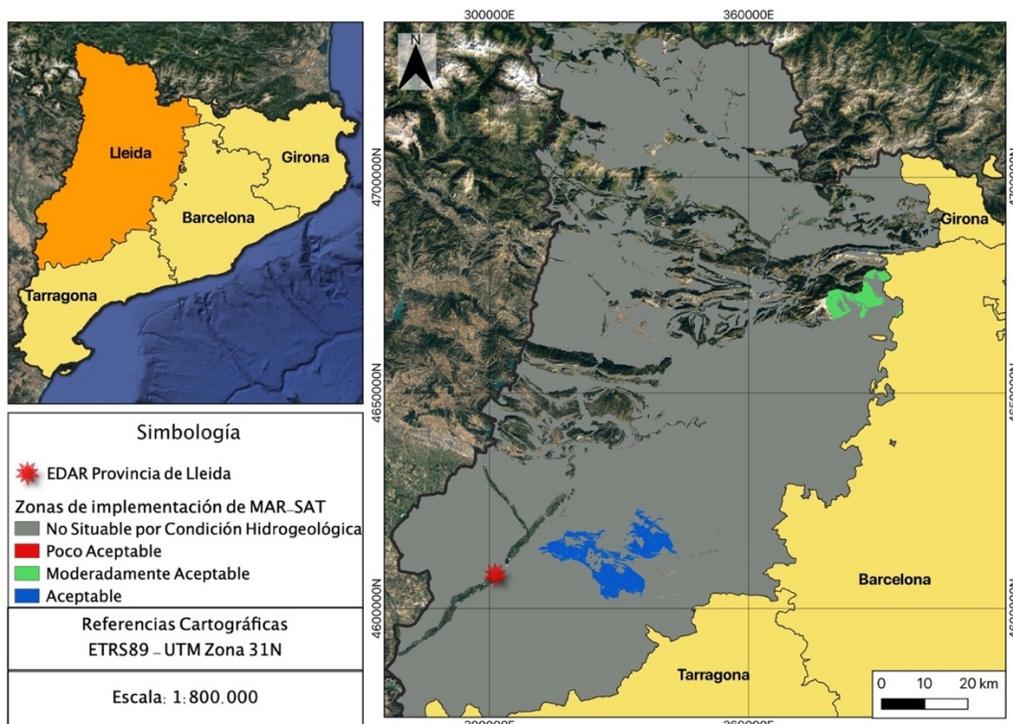


Figura 13: Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en la provincia de Lleida para el escenario 1, de permeabilidad obtenida a partir de las Fichas.

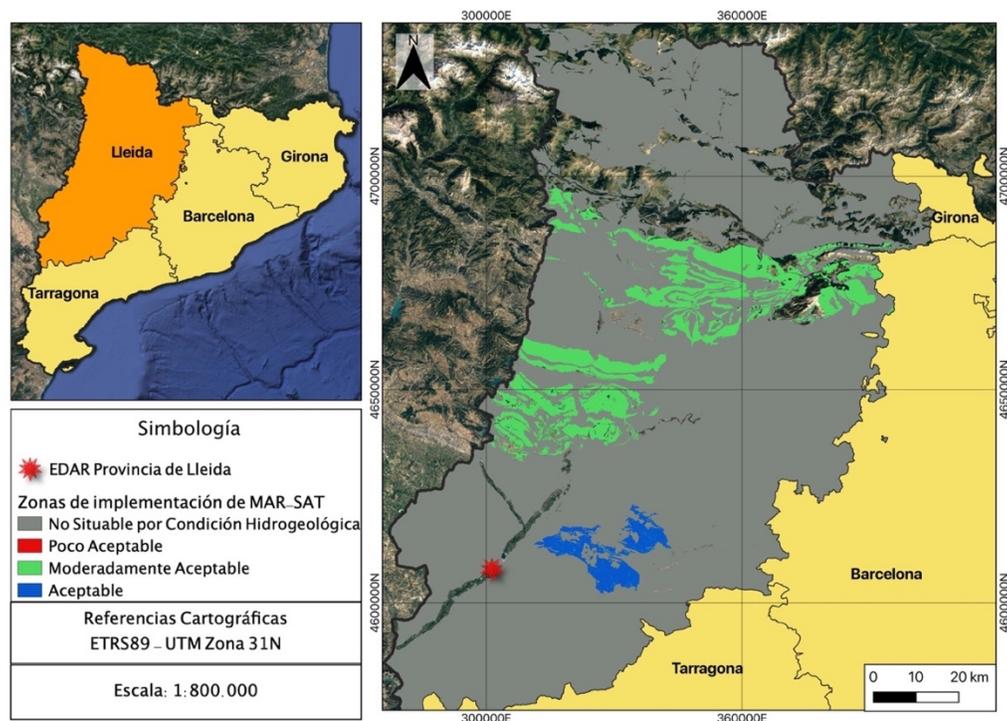


Figura 14: Categorización de las zonas potenciales de implementación de *MAR-SAT* en la provincia de Lleida para el segundo escenario, incorporando el cálculo de permeabilidad.

5.3. Categorización de las EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes

Se analizaron y categorizaron 36 EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes en Cataluña con las categorías de Aceptable, Moderadamente Aceptable, Poco Aceptable y No Aceptable por Calidad de Agua. De las EDAR analizadas, 10 resultaron con la categoría Aceptable, 15 como Moderadamente Aceptable, 11 como Poco Aceptable y ninguna resultó como No Aceptable por Calidad del Agua, ya que ninguna EDAR superó las concentraciones normadas en 3 o 4 de los contaminantes analizados. En la Tabla 10 se presenta la concentración de Nitrógeno Total, Fósforo, COT y Cloruros en cada EDAR analizada, coloreada según si supera o no los valores estipulados por normativa considerada, y también la categoría adoptada según el análisis realizado.

Tabla 10: Concentraciones de Nitrógeno, Fósforo, COT y Cloruros en las aguas reingeradas de cada EDAR analizada según promedio de emisión del 2018-2019 en base a datos obtenidos del PRTR y la categoría adoptada.

Nombre EDAR	Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo (mg/L)	COT (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Categorización
Blanes	18,56	1,00	3,79	80,87	Moderado
Vilanova i la Geltrú	37,72	2,72	4,93	198,74	Moderado
Castell-Platja d'Aro	7,54	0,64	3,62	45,75	Aceptable

Nombre EDAR	Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo (mg/L)	COT (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Categorización
Sabadell Riu Sec	7,24	0,81	6,17	117,96	Aceptable
Cambrils	19,41	1,14	2,19	206,93	Moderado
Tarragona	23,61	1,96	35,10	207,52	No Aceptable
Igualada	15,28	1,06	5,43	652,93	No Aceptable
Vilafranca del Penedès	25,55	2,07	16,34	246,62	No Aceptable
Reus	33,66	1,90	11,00	178,14	Moderado
Terrassa	6,63	0,60	11,40	196,10	Aceptable
Abrera	9,40	0,19	5,89	210,66	Aceptable
Roses	5,43	0,23	2,40	761,32	Moderado
Vic	5,73	0,68	17,42	261,87	No Aceptable
Besòs	34,72	2,37	14,73	437,06	No Aceptable
Alt Maresme Nord	22,58	7,04	12,10	315,85	No Aceptable
Teià-Maresme Sud	15,42	1,28	8,29	175,31	Moderado
Mataró	26,90	1,51	9,97	89,74	Moderado
Vila-seca/Salou	17,04	0,16	5,94	395,49	No Aceptable
Sitges-St Pere de Ribes	30,00	1,90	4,24	154,99	Moderado
Sabadell Riu Ripoll	3,86	0,48	5,93	126,99	Aceptable
Lleida	7,57	0,57	40,23	72,54	Moderado
Girona	5,73	0,15	8,79	115,13	Aceptable
Lloret de Mar	12,14	0,64	3,32	56,49	Moderado
Sant Feliu de Llobregat	24,04	3,24	12,60	331,28	No Aceptable
Figueres	4,01	0,21	5,44	72,57	Aceptable
Riera de la Bisbal	5,15	0,43	5,12	643,31	Moderado
Granollers	8,45	2,20	7,37	158,73	Aceptable
Montornès del Vallès	12,64	0,26	15,01	348,87	No Aceptable
Palamòs	17,74	1,05	5,05	172,78	Moderado
Montcada	34,10	1,44	10,93	145,78	Moderado
Manresa	4,12	0,30	1,60	87,23	Aceptable
l'Escala	3,26	0,11	1,41	228,41	Aceptable
el Prat de Llobregat	16,42	1,62	10,41	242,03	Moderado
la Llagosta	29,75	0,34	15,51	140,82	Moderado
Rubí	33,89	1,04	11,86	284,54	No Aceptable
Gavà-Viladecans	21,52	1,96	8,84	332,76	No Aceptable

Actualmente, el RD 1620/2007 establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas, estableciendo una concentración límite de Nitrógeno Total de 10 mg/L, la cuál de querer realizar recarga de acuífero por percolación del terreno no debe superarse. En este contexto, 22 EDAR de las 36 evaluadas superaron estas concentraciones por lo que requerirían realizar un tratamiento adicional al agua regenerada para poder realizar recarga artificial de acuíferos. En el 2020 el Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) de España evaluó el RD 1620/2007 y lo comparó con normativa internacional respectiva a recarga gestionada de acuíferos, concluyendo que la normativa actual no considera una gran cantidad de contaminantes, pero es bastante estricta con los que ya regula. En este contexto, proponen tal como lo plantea y recomienda la OMS, normar el COT recomendando un valor límite 16 mg/L. De las EDAR evaluadas, 4 superaron este límite, y de éstas, 2 superan tanto las concentraciones de Nitrógeno Total como de COT, siendo las EDAR de Tarragona y de Vilafranca del Penedès. De esta forma, estas 2 EDAR superan las concentraciones evaluadas específicas para recarga artificial de acuíferos.

De la Figura 15 se puede apreciar también que las EDAR que resultaron con una categorización de Poco Aceptable se encontraban en la provincia de Barcelona y la provincia de Tarragona, ubicándose principalmente en zonas costeras y cercanas a grandes núcleos poblacionales. De las 11 EDAR que obtuvieron la categoría de No Aceptable, 8 superaron la concentración de Nitrógeno Total y de Cloruros, mientras que 2 superaron la concentración de Nitrógeno Total y COT. Sólo la EDAR de Vic no superó las concentraciones normadas de Nitrógeno Total, pero sí las de Cloruros y de COT. Lo anterior, implica que, para poder realizar recarga de acuíferos con alguna de estas EDAR es necesario realizar un tratamiento adicional al agua regenerada, ya que la mayoría de éstas no cumple la normativa vigente asociada a esta actividad.

Las EDAR que resultaron con la categoría de Moderadamente Aceptable para realizar recarga de acuíferos se ubicaron principalmente en la zona costera de Cataluña. De las 15 EDAR con esta categoría, 12 superaron la concentración de Nitrógeno Total, mientras que las EDAR de Roses y de la Riera de la Bisbal superaron las concentraciones de Cloruros, por último, la EDAR de Lleida superó las concentraciones de COT. Las elevadas concentraciones de Cloruros pueden incrementar el problema que significa la salinización en los suelos, aún más en acuíferos costeros como el caso de Roses. Cabe destacar, que, ambas EDAR superaron ampliamente el límite considerado de agua para consumo humano, normado en 250 mg/L alcanzando valores de 760 mg/L y 640 mg/L para la EDAR de Roses y la Riera de la Bisbal, respectivamente. Por otro lado, la concentración de COT de la EDAR de Lleida

resulta ser de más del doble de lo que recomienda la OMS de 16 mg/L, alcanzando concentraciones de 40 mg/L.

Respecto a las EDAR categorizadas como Poco Aceptable o Moderadamente Aceptable resulta particularmente interesante, debido a la disponibilidad de zonas según la condición hidrogeológica, analizar las que se ubican en la costa de la provincia de Tarragona y en la costa al sur de la provincia de Barcelona. En estas zonas se encuentran áreas categorizadas como Aceptables para la recarga de acuíferos, justamente donde se ubican estas EDAR. Es importante mencionar, que, todas necesitarían un tratamiento adicional al agua regenerada ya que superan las concentraciones de Nitrógeno Total reguladas por la normativa vigente. Este tratamiento podría basarse en la adición de carbono orgánico, fácilmente oxidable, para estimular los procesos de desnitrificación y fomentar la reducción del nitrógeno a nitrógeno gas.

Por último, en lo que respecta a las EDAR con la categoría Aceptable, es decir, que no superan ninguna concentración de sustancias evaluadas, se ubicaron todas entre las provincias de Barcelona y de Girona. De estas EDAR, debido a la disponibilidad de zonas para la recarga de acuíferos dada la condición hidrogeológica, resulta interesante analizar las que se ubican en la parte norte de la provincia de Girona ya que se presentan las condiciones óptimas para la recarga. Cabe destacar, que, esta zona corresponde a un área de acuíferos protegidos por contaminación de nitratos, por lo que se debe tener un especial cuidado con el agua que se pretende infiltrar y con las condiciones del suelo en dónde se implementará la recarga de acuífero por el sistema *MAR-SAT*.

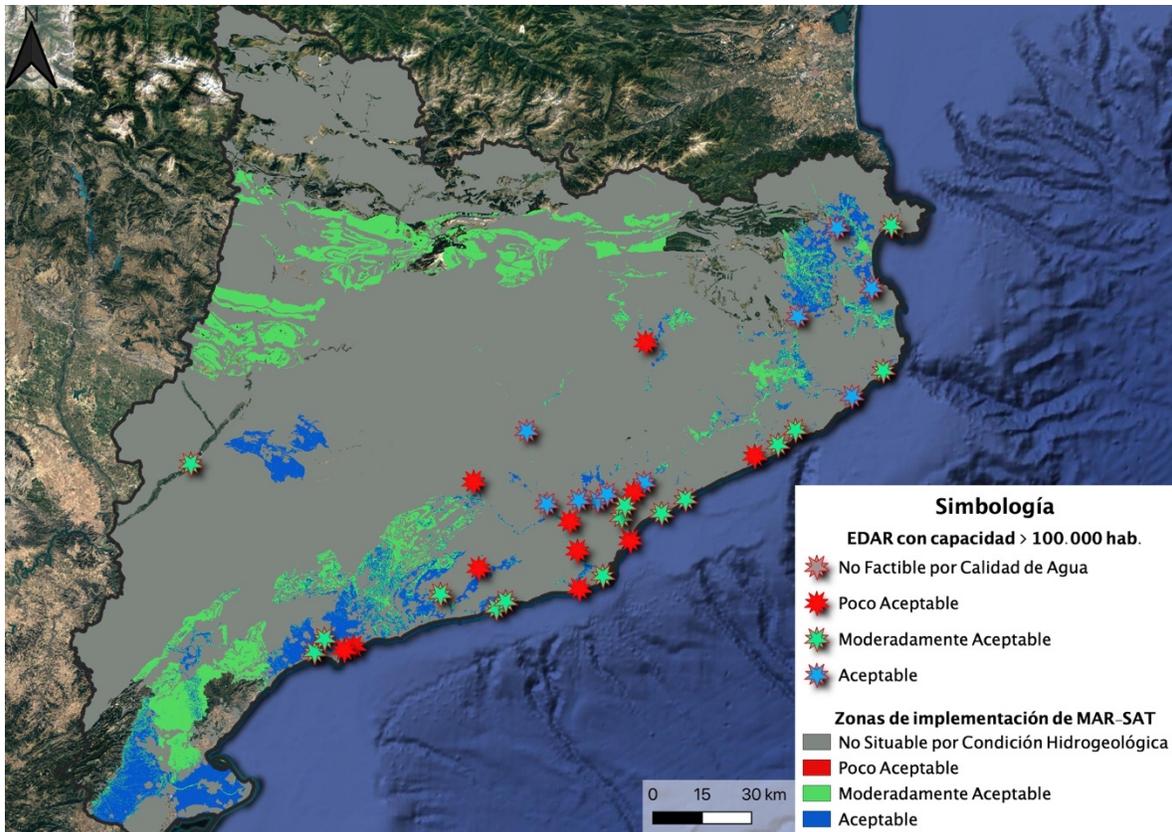


Figura 15: EDAR con capacidad superior a 100.000 hab. categorizadas según la calidad del agua regenerada junto con la categorización de las zonas de implementación de *MAR-SAT*.

5.4. Selección de sitios disponibles para realizar *MAR-SAT* con agua regenerada de EDAR con capacidad superior a 100.000 habitantes

En la selección de sitios disponibles para realizar la recarga de acuíferos mediante el sistema *MAR-SAT* se incorporaron dos criterios que son específicos para las EDAR, los cuales tienen relación con la distancia y la elevación del sitio analizado con respecto a la EDAR, siendo ambos criterios económicos que tienen relación con la factibilidad de transportar el agua hasta la zona de recarga de acuífero.

En la Figura 16 se puede apreciar las EDAR factibles de aplicar *MAR-SAT* con un radio de 8 km y la categorización de las zonas de implementación. Las EDAR del norte de la provincia de Girona, correspondiente a Figueres, L'Escala y Girona presentan la mayor disponibilidad de territorios para realizar la recarga de acuíferos (zonas Aceptables), obteniendo 88 km², 41,33 km² y 48,67 km² respectivamente. La otra EDAR ubicada en la provincia de Girona corresponde a la de Castell Platja d'Aro, la cual posee en 2 km² de zonas Aceptables para recarga de acuíferos al interior de la provincia. La recarga por sistema *MAR-SAT* en la provincia de Girona podría ayudar a reducir la presión actual que existe sobre los acuíferos de la zona, además, de poder reducir la contaminación de las aguas subterráneas al generar una dilución de los contaminantes.

De las EDAR ubicadas en la provincia de Barcelona, la de Manresa no presenta gran disponibilidad de sitios para realizar recarga de acuíferos, obteniendo una superficie inferior a 1 km² tanto para las zonas Aceptables como para las zonas Moderadamente Aceptables. El resto de EDAR de la provincia de Barcelona con una calidad de agua Aceptable para realizar recarga de acuíferos se ubican bastante cerca entre sí. La EDAR de Sabadell-Riu Ripoll es la que presenta mayor disponibilidad de áreas en esta provincia, obteniendo una superficie de 11 km² para zonas Aceptables. Contigua a la EDAR anterior, se encuentra la EDAR de Sabadell-Riu Sec la cual presenta 10 km² de zonas Aceptables para recarga de acuíferos. Por último, de este grupo de EDAR que presentan ubicación próxima entre sí, las EDAR de Terrassa, Granollers y Abrera presentan una menor proporción de áreas Aceptables en comparación con las otras dos, obteniendo 7,8 km²; 6 km² y 5,8 km², respectivamente. En la Tabla 11 se presenta la superficie por EDAR evaluada y la categoría por zona potencial para implementación de *MAR-SAT*.

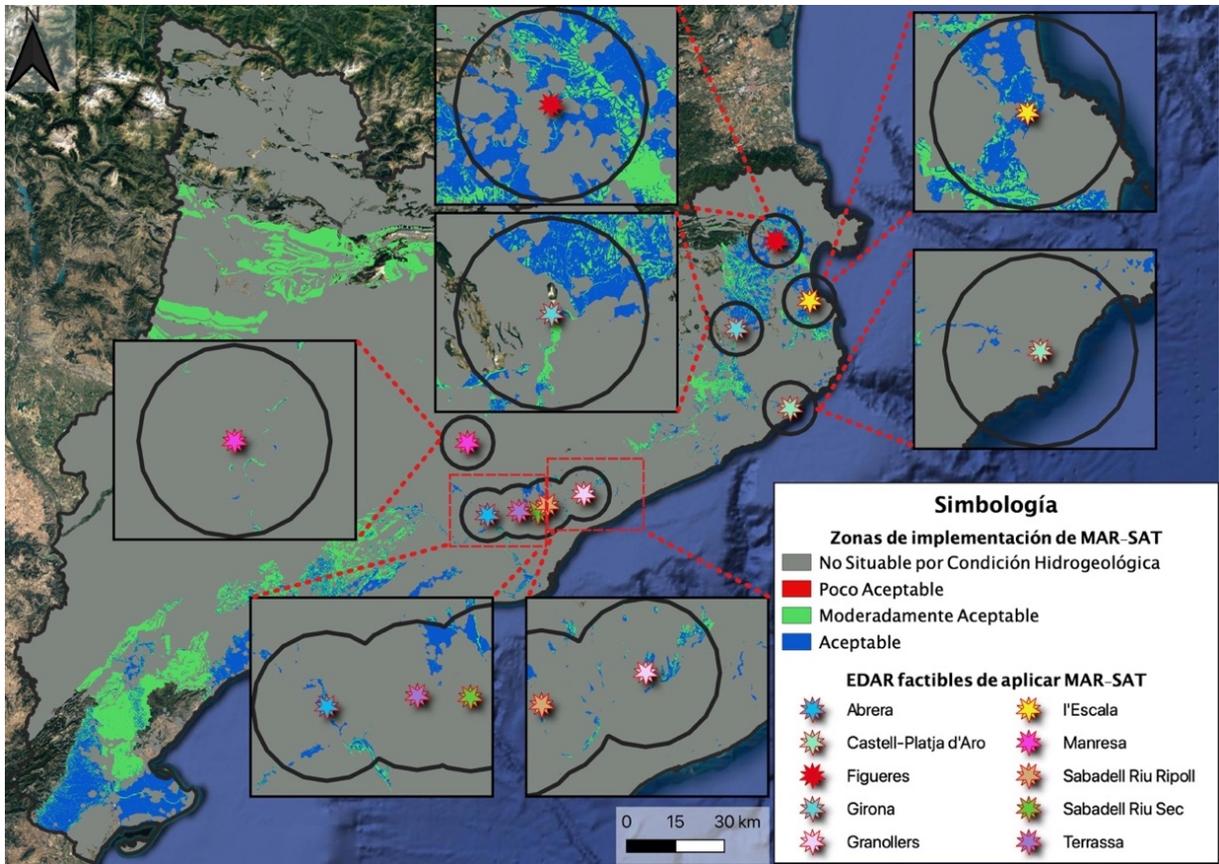


Figura 16: EDAR factibles de aplicar MAR-SAT con un radio de 8km y la categorización de las zonas de implementación.

Tabla 11: Superficie por EDAR evaluada y categoría de las zonas potenciales de implementación de MAR-SAT.

Nombre de la EDAR	No Situable condición hidrogeológica (km ²)	Poco Aceptable (km ²)	Moderadamente Aceptable (km ²)	Aceptable (km ²)
Abrera	188,78	0	3,11	5,88
Castell-Platja d'Aro	175,84	0	0,03	1,99
Figueres	96,02	0	7,54	88,00
Girona	131,27	0	12,88	41,33
Granollers	185,96	0	5,78	6,01
l'Escala	142,04	0	3,74	48,67
Manresa	196,21	0	0,86	0,71

Nombre de la EDAR	No Situable condición hidrogeológica (km²)	Poco Aceptable (km²)	Moderadamente Aceptable (km²)	Aceptable (km²)
Sabadell Riu Ripoll	181,60	0	5,01	11,15
Sabadell Riu Sec	184,95	0	2,70	10,13
Terrassa	187,81	0	2,15	7,81

6. CONCLUSIONES

En este proyecto se logró identificar, mediante sistemas de información geográfica (QGIS), zonas donde es posible realizar recarga de acuíferos mediante *MAR-SAT* en Cataluña. Las zonas óptimas obtenidas se concentraron en la zona costera y en sus límites con Andorra, Francia y las Comunidades Autónomas de Aragón y Valencia. La zona centro de Cataluña no presenta las condiciones óptimas para realizar la recarga de acuíferos mediante *MAR-SAT*, principalmente por sus características hidrogeológicas.

Para la identificación de zonas óptimas para realizar la recarga de acuíferos mediante *MAR-SAT* se desarrolló una metodología que consideró restricciones comunes y generales utilizadas en otras partes del mundo. Se procesaron restricciones técnicas y ambientales, de las cuales la restricción técnica de la naturaleza del acuífero según el medio litológico fue la principal condicionante del territorio, dejando sólo las zonas que son permeables permitiendo la percolación a través del suelo del agua regenerada. Las restricciones del tipo de acuífero y presencia de masas de agua permiten la coherencia con el objetivo de la infiltración de agua, garantizando que el agua regenerada se mezclará con el agua subterránea. Las restricciones ambientales referidas a distancias de centros urbanos, lagos, embalses y zonas húmedas permitieron refinar aún más el territorio, cumpliendo con un rango de seguridad respecto a estos sitios de interés, restringiendo así el contacto directo con los seres humanos, fauna o flora.

El segundo escenario considera la incorporación de más territorio al análisis, ya que incorporar el cálculo de permeabilidad en zonas donde no existía a partir de datos de transmisividad y profundidad de la zona saturada. De esta manera, fue posible ampliar el territorio de análisis, incorporando partes de la costa Brava (costa de Figueres y Roses), zonas al sur de Tarragona (Delta de Ebro) y la zona centro-norte de la provincia de Lleida (comarcas de Alt Urgell, Noguera y Pallars Jussà). De esta manera, se pudo pasar de analizar el 88,2% del territorio de Cataluña (primer escenario evaluado) al 92,8%.

La provincia de Tarragona es la que posee la mayor cantidad de superficie categorizada como con zonas Aceptables para recarga de acuíferos, dado que cumple con la mayoría de los criterios analizados, obteniendo 345,8 km² para el primer escenario y de 1004,5 km² considerando el segundo escenario evaluado. La provincia de Girona, en la parte norte también presenta una cantidad considerable de zonas categorizadas como Aceptables para realizar recarga de acuíferos interesantes de analizar.

A nivel de comarca, en el primer escenario evaluado, considerando la permeabilidad obtenida directamente de las Fichas de Masas de Agua, las comarcas de Baix Camp y Tarragonès, de la provincia de Tarragona, junto con la comarca del Pla d'Urgell, de la

provincia de Lleida son las que presentan la mayor cantidad superficies óptimas de recarga (categorizadas como Aceptables), obteniendo superficies superiores a los 100 km². El segundo escenario que considera la incorporación de más territorio al análisis permitió obtener nuevas comarcas con superficies importantes categorizadas como Aceptables para la recarga de acuíferos. Las principales comarcas para este escenario corresponden a la del Montsià y del Baix Ebre, de la provincia de Tarragona, junto con la comarca del Alt Empordà de la provincia de Girona, obteniendo superficies óptimas de recarga superiores a los 200 km². Cabe destacar, que, para este estudio particular dadas las condiciones del territorio, no se adoptó la categoría de Poco Aceptable, pero replicando la metodología en otro territorio es posible que sí se de esta condición.

De las 36 EDAR analizadas, 15 superaron la concentración normada en sus aguas regeneradas de una de las cuatro sustancias evaluadas y 11 superaron la concentración de dos de las sustancias evaluada, adoptando la categoría de Moderadamente Aceptable y Poco Aceptable, respectivamente. Las EDAR con categoría de Moderadamente Aceptable se centraron por la costa de la Comunidad Autónoma de Cataluña. Las EDAR con categoría Aceptable, debido a que no superaron las concentraciones de emisión de ninguna de las sustancias evaluadas, se situaron en las provincias de Barcelona y Girona.

Al combinar las zonas categorizadas para realizar la recarga de acuíferos junto con las EDAR que resultaron con la categoría Aceptable, se pudo observar los sitios disponibles de implementación de *MAR-SAT*. Los mejores sitios debido a la disponibilidad de territorio categorizado como Aceptable, se dio para las EDAR de Figueres, L'Escala y Girona, ubicadas todas en la provincia de Girona. Las EDAR de la provincia de Barcelona también presentan disponibilidad de sitios para realizar recarga, aunque menos que la provincia de Girona, principalmente para las EDAR de Sabadell Riu Ripoll y Sabadell Riu Sec.

Finalmente, debido a los resultados obtenidos, es recomienda realizar estudios de campo más detallados de las zonas disponibles para las EDAR de la provincia de Girona, particularmente relacionados con la permeabilidad del territorio y la profundidad de los acuíferos en esta zona, debido a las condiciones óptimas de recarga que se presentan. Por otro lado, resulta también interesante la disponibilidad de sitios de recarga que se presentan en la provincia de Tarragona, para los cuales las EDAR necesitarían incorporar un tratamiento adicional al agua regenerada de manera de cumplir la normativa vigente asociada a este tipo de uso.

REFERENCIAS

Abel, C.D.T., Sharma, S.K., Malolo, Y.N., Maeng, S.K., Kennedy, M.D., Amy, G.L., 2012. Attenuation of bulk organic matter, nutrients (N and P), and pathogen indicators during soil passage: Effect of temperature and redox conditions in simulated soil aquifer treatment (SAT). *Water, Air, Soil Pollut.* 223, 5205–5220.

Agencia Catalana del Agua (ACA). (2016). Avaluació de la problemàtica originada per l'excés de nitrats d'origen agrari en les masses d'aigua subterrània a Catalunya. *Departament de Control i Qualitat de l'Aigua*, marzo de 2016. Disponible en: http://aca.gencat.cat/web/.content/20_Aigua/04_estat_del_medi_hidric/04_zones_vulnerables_nitrats/01_Avaluacio_problematika_nitrats_DCQA_03_2016.pdf

Al Kubati, K. M. A. (2013). Development of Framework for Site Selection, Design, Operation and Maintenance for Soil Aquifer Treatment (SAT) Systems. *MSc Thesis MWI 2013-17*, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

Anane, M., Kallali, H. & Jellali, S. (2008). Ranking suitable sites for Soil Aquifer Treatment in Jerba Island (Tunisia) using remote sensing, GIS and AHP-multicriteria decision analysis. *Laboratory of Wastewater Treatment and Recycling*. Vol 4. Nº 1-2.

Asano, T. & Cotruvo, J. (2004). Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Water Research*, 38(8), 1941- 1951.

Australian Guidelines. (2009). Australian Guidelines for water Recycling: Managing Health and Environmental Risk (Phase 2). *National Water Quality Strategy*. ISBN 1 921173 47 5.

Bdour A., Hamdi M. and Tarawneh Z. (2009). Perspectives on sustainable wastewater treatment technologies and reuse options in the urban areas of the Mediterranean region. *Desalination* 237 (2009) 162–174.

Cárdenas L. & Sánchez I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*. Vol. 15 nº1. Versión ISSN 0124-7107.

Chango, G. (2017). Diseño y construcción de sistemas microfluídicos para la monitorización de parámetros de calidad de aguas mediante métodos potenciométricos. *Trabajo Fin de Máster*. Universitat de les Illes Balears.

Comisión Europea, 2010. Escasez de agua y sequía en la Unión Europea. Medio Ambiente: Agua. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/water_scarcity/es.pdf [Consulta: 5 de marzo de 2021].

Coll, B. (2019). Cataluña sigue en prealerta por sequía a pesar de las últimas lluvias. *El País*. 27 de octubre del 2019.

Corcoran, E. (2010). Sick Water: The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development: a Rapid Response Assessment. UNEP/Earthprint.

Crook, J., Mosher, P. and Casteline, J. (2005). Status and Role of Water Reuse. *Global Water Research Coalition*, London, UK.

Dillon, P., Pavelic, P., Toze, S., Rinck-Pfeiffer, S., Martin, R., Knapton, A. and Pidsley, D. (2006). *Role of aquifer storage in water reuse*. *Desalination*, 188(1- 3), 123-134.

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne., R.D.G., Jain, R.C., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., Van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B.R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Schamrukh, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Bonilla, J., Palma, A., Ansems, N., Posavec, K., Ha, K., Martin, R., Sapiano, M. (2018). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>

Drewes, J. & Khan, S. (2010). Water reuse for drinking water augmentation. In: Edzwald, J. (Ed.), *Water Quality and Treatment Handbook*, Sixth ed. McGraw-Hill.

España. Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. *Boletín Oficial del Estado*, 15 de diciembre de 2007, núm. 299.

Fox, P., Houston, S., Westerhoff, P., Drewes, J., Nellor, M., Yanko, B., Baird, R., Rincon, M., Arnold, R. and Lansey, K. (2001). An Investigation of Soil Aquifer Treatment for Sustainable Water Reuse. Research Project Summary of the National Center for Sustainable Water Supply (NCSWS), Tempe, Arizona, USA.

Huertas, E., Salgot, M., Hollender, J., Weber, S., Dott, W., Khan, S., Schäfer, A., Messalem, R., Bis, B. and Aharoni, A. (2008). Key objectives for water reuse concepts. *Desalination*, 218(1-3), 120-131.

Imig, A. & Sitek S. (2020). Transnational decision support toolbox for designating potential MAR locations in central Europe. *Research Gate*. <https://www.researchgate.net/publication/346114901>

Janosova, B., Miklankova, J., Hlavinek, P. and Wintgens, T. (2006). Drivers for wastewater reuse: regional analysis in the Czech Republic. *Desalination*, 187(1- 3), 103-114.

Kanarek, A. and Michail, M. (1996). Groundwater recharge with municipal effluent: Dan region reclamation project, Israel. *Water Science and Technology*, 34(11), 227-233.

Kallali, H., Anane, M., Jellali, S., Tarhouni, J. (2006). GIS-based multi-criteria analysis for potential wastewater aquifer recharge sites. *Desalination*. 215 (2007) 111-119.

La Vanguardia (2020). <https://www.lavanguardia.com/vida/20200108/472786402659/la-generalitat-aprueba-el-plan-de-sequia-para-episodios-de-escasez-de-agua.html>

Levine, A. D. & Asano, T. (2004). Peer reviewed: recovering sustainable water from wastewater. *Environmental Science and Technology*, 38(11), 201-208.

Lawrence, P., Adham, S. and Barrott, L. (2003). Ensuring water re-use projects succeed— institutional and technical issues for treated wastewater re-use. *Desalination*, 152(1), 291-298.

Martin, J. & Koerner, R. (1984). The influence of vadose zone conditions in groundwater pollution: Part II: Fluid movement. *Journal of Hazardous Materials*, 9(2), 181-207.

Metcalf, E., Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R. and Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*, Mc-Graw Hill. NewYork, USA.

National Research Council (NRC) of the national academics. Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater. *National Academy of Sciences*. 2012. ISBN: 978-0-309-25749-7.

Nema, P., Ojha, C., Kumar, A. and Khanna, P. (2001). Techno-economic evaluation of soil-aquifer treatment using primary effluent at Ahmedabad, India. *Water Research*, 35(9), 2179-2190.

Pedrero, F., Albuquerque, A., Marecos do Monte, H., Cavaleiro, V., Alarcón, J. (2011). Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. *Resources, Conservation and Recycling*. 56 (2011) 105-116.

Po, M., Kaercher, J. and Nancarrow, B. (2003). Literature Review of Factors Influencing Public Perceptions of Water Reuse. *Commonwealth Scientific and Institutional Organization (CSIRO)*, Australia.

Quanrud, D., Hafer, J., Karpiscak, M., Zhang, J., Lansey, K. and Arnold, R. (2003). Fate of organics during soil-aquifer treatment: sustainability of removals in the field. *Water Research*, 37(14), 3401-3411.

Rodríguez, P., Canelles, A., Sanchez X., Folch, A., Kurtzman, D., Rossetto, R., Fernández, E., Lobo-Ferreira, J., Sapiano, M., San-Sebastián, J., Schüth, C. (2018). A risk assessment methodology to evaluate the risk failure of managed aquifer recharge in the Mediterranean Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 22, 3213-3227. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3213-2018>

Salgot, M. (2008). Water reclamation, recycling and reuse: implementation issues. *Desalination*, 218(1-3), 190-197.

Schmidt, C.K., Lange, F.T., Brauch, H.-J., 2007. Characteristics and evaluation of natural attenuation processes for organic micropollutant removal during riverbank filtration. *Water Sci. Technol. Water Supply* 7, 1–7.

Seguí, L., Rodríguez, M., Urrea M., Guerrero H. (2019). Water Stress: Gestión del agua, huella hídrica y economía circular. Barcelona. *EAE Business School*.

Sharma S., Harun C. and Amy G. (2008). Framework for assessment of performance of soil aquifer treatment systems. *Water Science & Technology—WST*, 57.6.

Sharma, S. K., Hussien, M. and Amy, G. L. (2011). Soil aquifer treatment using advanced primary effluent. *Water Science and Technology*, 64(3), 640-646.

Thon, C. (2014). Soil Aquifer Treatment. Tesis Doctoral. Universidad de Tecnología de Delft. Holanda.

Toze, S. (1997). Microbial Pathogens in Wastewater. *CSIRO Land and Water Technical Report*, 1, 97.

Tsangaratos, P., Kallioras, A., Pizpikis, TH., Vasileiou, E., Iliá, L., Pliakas, F. (2017). Multi-criteria Decision Support System (DSS) for optimal locations of Soil Aquifer Treatment (SAT) facilities. *Science of the Total Environment*. 603-604 (2017). 472-486.

USEPA. (2006). Process design manual: Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents. EPA/625/R-06/016, US *Environmental Protection Agency*, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, USA.

USEPA. (2012). Guidelines for Water Reuse. US Environmental Protection Agency. *Office of Research and Development*, Cincinnati, Ohio, USA.

Velásquez, Diego J. (2016). "Soil Aquifer Treatment for wastewater reclamation in a high water demand society". Electronic Thesis and Dissertation Repository. 4080. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4080>.

Villarroya, F. (2009). Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos. Centro Nacional de Tecnología de Regadíos. Madrid. 2 de junio del 2009. Disponible en: <http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>

Wild, D., Buffle, M.-O. and Hafner-Cai, J. (2007). Water: a market of the future. SAM, SERI. http://www.sam-group.com/2010_water_study_e_tcm794-263789.pdf. Accessed on July 16, 2011.

Zhang, Z., Lei, Z., Zhang, Z., Sugiura, N., Xu, X. and Yin, D. (2007). Organics removal of combined wastewater through shallow soil infiltration treatment: A field and laboratory study. *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 657-665.