

Contribución de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón al abastecimiento de agua de la Comunidad de Madrid: Una aproximación desde los servicios de los ecosistemas

P. Zorrilla-Miras^{1,*}, M. Suárez^{2,3}, A. González-García⁴, C. Sancho Gómez¹, M. Bea¹.

(1) Icatelist, S.L. C/ Borni 20, 28232 Las Rozas, Madrid, España.

(2) Transitando. C/ Duque de Fernán Núñez 2 1º, 28012 Madrid, España.

(3) Cátedra UNESCO sobre Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental, Universidad del País Vasco. Barrio Sarriena, s/n, 48940 Leioa, Bizkaia, España.

(4) Laboratorio de Socio-Ecosistemas, Departamento de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid. Darwin 2, Edificio de Biología, 28049 Madrid, España.

* Autor de correspondencia: P. Zorrilla [pzorrilla-miras@icatalist.eu]

> Recibido el 24 de enero de 2020 - Aceptado el 16 de marzo de 2020

Zorrilla-Miras, P., Suárez, M., González-García, A., Sancho Gómez, C., Bea, M. 2020. Contribución de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón al abastecimiento de agua de la Comunidad de Madrid: Una aproximación desde los servicios de los ecosistemas. *Ecosistemas* 29(1):1938. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1938>

Contribución de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón al abastecimiento de agua de la Comunidad de Madrid: Una aproximación desde los servicios de los ecosistemas. En muchas ocasiones las personas que se benefician de los servicios (o contribuciones) que los ecosistemas aportan a la sociedad no son las que residen en el territorio que provee dichos servicios. Los habitantes de zonas rurales que proveen servicios de los ecosistemas a grandes urbes en ocasiones ven limitadas sus opciones de desarrollo económico, lo que contribuye a la despoblación rural. Un ejemplo de esta situación se da en la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón, situada en el extremo norte de la Comunidad de Madrid. El objetivo de este estudio es evaluar biofísica y económicamente (monetariamente) el servicio de abastecimiento de agua de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón. Para ello hemos utilizado el modelo InVEST y un método basado en mercado (a partir de la tarifa de uso doméstico del agua). Los resultados indican que, aunque la superficie de la Reserva no llega a ocupar ni el 2% de la Comunidad de Madrid, provee el 5% del agua que se consume, con una aportación aproximada de 93 hm³ anuales, que tendría un valor económico de 28 millones de euros. El estudio presenta diferentes limitaciones que son explicadas y que pueden servir para realizar futuros estudios con mayor precisión.

Palabras clave: métodos basados en mercado; servicios de los ecosistemas; abastecimiento de agua; sierra de Madrid; InVEST

Zorrilla-Miras, P., Suárez, M., González-García, A., Sancho Gómez, C., Bea, M. 2020. Water supply from Sierra del Rincón Biosphere Reserve to the Community of Madrid (Spain): An ecosystem services approach. *Ecosistemas* 29(1):1938. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1938>

Water supply from Sierra del Rincón Biosphere Reserve to the Community of Madrid: An ecosystem services approach. Frequently, the people who benefit from the services (or contributions) that ecosystems provide to society are not those who reside in the territory that provides such services. Population of these rural areas that provide ecosystem services to large cities are sometimes limited in their economic development options, which contributes to rural depopulation. An example of this situation is given in the Sierra del Rincón Biosphere Reserve, located at the northern end of the Community of Madrid. The objective of this study is to evaluate biophysically and economically (in monetary terms) the water supply service of the Sierra del Rincón Biosphere Reserve. We have used the InVEST model and a market-based method (from the domestic water use rate). The results indicate that, although the area of the RBSR is only a 2% of the Community of Madrid, it provides 5% of the water consumed, with an approximate contribution of 93 hm³ per year, which would have an economic value of 28 million euros. The methodology followed has limitations that are presented with the aim to perform future studies with greater precision.

Key words: market based methods; ecosystem services; water supply; sierra de Madrid; InVEST

Introducción

Las Reservas de la Biosfera (RRBB) son territorios cuyo objetivo es armonizar la conservación de la diversidad biológica y cultural y el desarrollo económico y social a través de la relación de las personas con la naturaleza. Se establecen sobre zonas ecológicamente representativas o de valor único, en las cuales la integración de la población humana y sus actividades con la conservación son esenciales (UNESCO 1984). En regiones altamente urbanizadas, como es el caso de la Comunidad de Madrid, con una población de más de 6 millones y medio de habitantes, de

los cuales casi la mitad residen en la capital (INE 2019), las RRBB juegan un importante papel en la sostenibilidad a nivel regional. Son territorios de alto valor ecológico, con los que se establece una relación de dependencia por parte de las grandes urbes cercanas, que son incapaces de generar los recursos y servicios que sus habitantes necesitan para su bienestar y que, por tanto, son provistos por ecosistemas situados fuera del área urbanizada (Rees y Wackernagel 1996; Folke et al. 1997). Por ello, la conservación de las RRBB de la Comunidad de Madrid no solo es importante para el bienestar de sus habitantes, sino también para el de la población que habita en las áreas urbanas cercanas.

El concepto de servicios de los ecosistemas (SE), entendidos como los beneficios que suministran los ecosistemas que no sólo hacen la vida de los seres humanos posible, sino que también sean posibles unos niveles suficientes (o aceptables) de calidad de vida, nos permite estudiar la relación entre ser humano y naturaleza (Martín López et al. 2009), intrínseca en la concepción de las RRBB. El concepto de SE, definidos como las contribuciones directas o indirectas de los ecosistemas al bienestar humano, fue popularizado por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment 2005) hace ya más de una década. Desde entonces, los estudios sobre evaluaciones de servicios no han dejado de crecer año tras año tanto a nivel nacional, como las realizadas en España (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España 2011) y Reino Unido (UK National Ecosystem Assessment 2011); regional, como la Evaluación de los Servicios de los Ecosistemas en Bizkaia (Onaindia et al. 2015); y local, como las evaluaciones realizadas en varias ciudades europeas en el contexto del proyecto *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services* (Maes et al. 2016). Las RRBB no han sido una excepción y en 2010 se publicó una compilación de evaluaciones de servicios de los ecosistemas en RRBB españolas (Álvarez Vergel et al. 2010). Solo por citar algunos ejemplos de la multitud de estudios existentes sobre SE.

Las RRBB proveen servicios de los ecosistemas de abastecimiento, de regulación y culturales, no solo a la población que habita en las mismas, sino también a los territorios cercanos, incluidas las pequeñas, medianas y grandes ciudades (Álvarez Vergel et al. 2010). La Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón (RBSR), por su ubicación geográfica en la Sierra Norte de la Comunidad de Madrid, es uno de los territorios de la Comunidad que proveen valiosos SE, en especial, abastecen de agua potable a la capital y a otros municipios. Es por ello, que una buena conservación de sus ecosistemas es fundamental para garantizar la provisión en cantidad y calidad de este recurso tan valioso y necesario, en un territorio que, por su situación geográfica y sus condiciones climatológicas, es muy vulnerable al déficit hídrico durante determinadas épocas del año y a los periodos de sequías. Para su correcta conservación

y gestión, es útil evaluar el servicio de abastecimiento de agua desde la RBSR a la ciudad de Madrid y otros municipios, y de otros servicios de abastecimiento, de regulación y culturales provistos por sus ecosistemas. El objetivo de esta evaluación debe ser posibilitar un equilibrio entre los diferentes SE, sin que la provisión de uno de ellos se produzca en detrimento de otro y, por lo tanto, se comprometa tanto su sostenibilidad como la de los ecosistemas urbanos a los que abastece.

Objetivos del estudio

El objetivo general del estudio es evaluar biofísica y económicamente el servicio de abastecimiento de agua en el territorio de la RBSR. A la vez, un segundo objetivo es realizar una propuesta metodológica. Los objetivos específicos son:

1. Evaluar biofísicamente el servicio de abastecimiento de agua desde la RBSR hacia otros municipios de la Comunidad de Madrid.
2. Realizar una estimación económica del servicio de abastecimiento de agua de la RBSR.
3. Identificar aspectos a considerar para hacer más precisa esta evaluación y ampliarla a otros SE asociados al agua con alto valor socio-ecológico en la RBSR.

Material y métodos

Área de estudio

El territorio de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón lo forman cinco municipios del norte de la Comunidad de Madrid (Fig. 1), que actualmente no superan entre todos ellos la cifra de 700 habitantes censados para un total de 15 231 ha (INE 2019). El 29 de junio de 2005, el Consejo Internacional de Coordinación del Programa MaB de la UNESCO aprobó la declaración de la RBSR (Comunidad de Madrid 2020). La justificación fue su gran riqueza paisajística, la representatividad de sus ecosistemas mediterráneos y su modelo de conservación de la biodiversidad y de aplicación de prácticas de desarrollo sostenible.

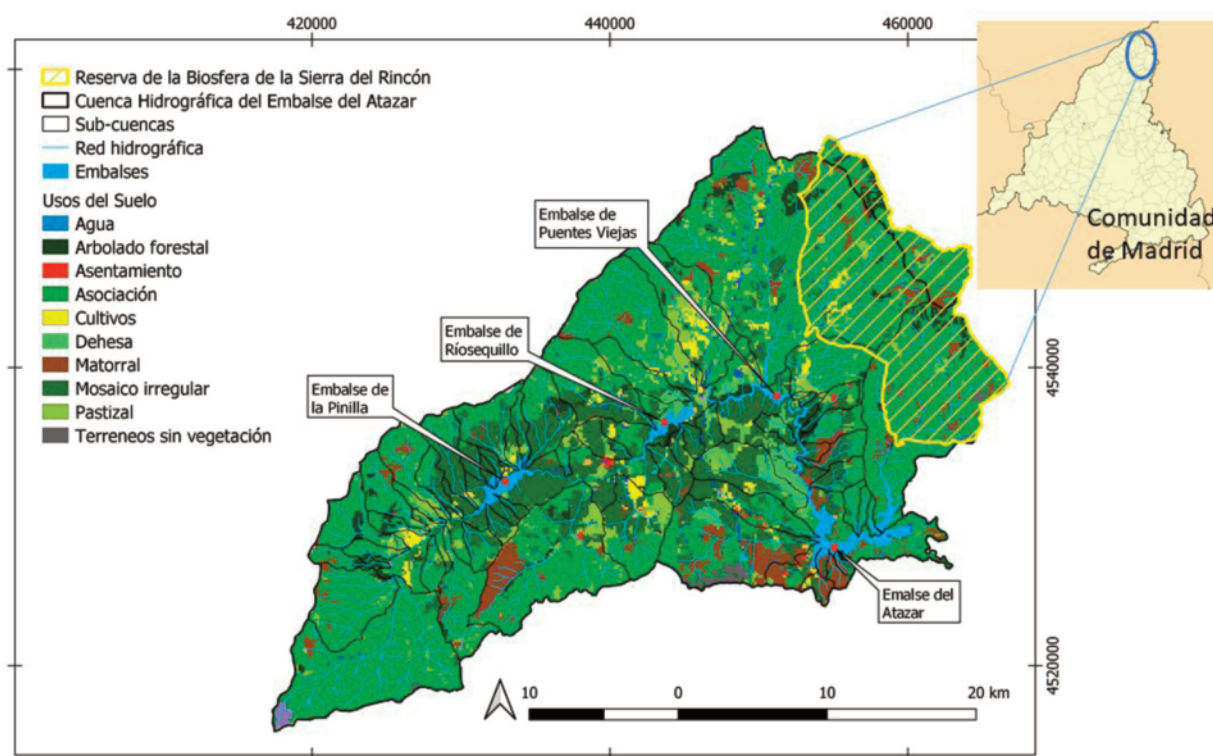


Figura 1. Situación de la RBSR y sub-cuencas hídricas que vierten al embalse de El Atazar. Fuente: Elaboración propia.

Figure 1. Research site: Sierra del Rincón Biosphere Reserve (RBSR) and river basins that discharge to the El Atazar reservoir. Source: Own elaboration.

Se trata de un territorio eminentemente montañoso, situado en el sector nororiental de la Comunidad, con altitudes que oscilan entre los casi 900 y los más de 2000 metros de altitud, lo que condiciona junto a su posición latitudinal, una alta pluviosidad anual (por encima de los 700 mm anuales), regularmente distribuida, exceptuando los meses estivales. Históricamente, ha sido un lugar poco poblado debido a la dureza del clima y la baja aptitud de los suelos para su aprovechamiento agrícola, a pesar de contar con otros recursos abundantes, la masa forestal y una buena cantidad y calidad de recursos hídricos. De hecho, sus paisajes actuales están dominados por una combinación de masas forestales, parcelas de uso ganadero y aislados núcleos rurales, sin poblamiento disperso, en un contexto de media montaña en el que han venido perviviendo usos y actividades muy ligadas al medio natural y compatibles con su alto grado actual de conservación. Los cursos fluviales de la RBSR pertenecen a su totalidad a la cuenca del río Tajo, organizada en dos sub-cuencas: la cuenca del río Lozoya y la del Jarama (de las Heras y Cuevas 2005).

Metodología para la evaluación del servicio de abastecimiento de agua en la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón

Para la evaluación de servicios nos basamos en el modelo en cascada de SE de Potschin-Young et al. (2018) (Fig. 2). Este modelo parte de que la estructura biofísica de los ecosistemas da lugar a una serie de funciones, definidas como la capacidad o el potencial de proveer servicios, independientemente de si estos son útiles o no para el ser humano. Los SE son resultado directo de estas funciones y representan el flujo de dichos servicios según la demanda existente. Los beneficios son los cambios positivos en el bienestar humano producidos por estos servicios. Por último, estos beneficios tienen un valor social, económico, estético, etc., que puede ser evaluado cuantitativa y/o cualitativamente.

En este estudio, para la evaluación del servicio de abastecimiento de agua de la RBSR cuantificamos su capacidad para proveer el servicio, el flujo desde la RBSR a otros municipios de la Comunidad de Madrid y la demanda de este servicio por dichos municipios, tanto biofísica como económicamente. Siguiendo dicho planteamiento, la metodología que hemos utilizado para la evaluación del servicio de abastecimiento de agua desde la RBSR incluye los siguientes cinco pasos:

1. Metodología para la evaluación de la capacidad de provisión de agua de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón

Ante la demanda cada vez mayor de los recursos hídricos, y las previsiones de que en muchos lugares del planeta serán más escasos debido a los efectos del cambio climático, como en la Comunidad de Madrid (Morata 2014), surgen cada vez más herramientas informáticas que permiten modelizar los SE ligados al agua. La que se ha utilizado en este estudio para calcular la capacidad de abastecimiento de agua es el Modelo InVEST (Sharp et al. 2018). Este modelo ofrece tres notables ventajas y potencialidades de uso: 1) está específicamente diseñado para calcular y estudiar SE, como la provisión de agua; 2) es capaz de evaluar los SE en unidades biofísicas (volumen de agua) y económicas (el valor de dicho volumen de agua en euros) y; 3) puede proporcionar información sobre cómo los cambios en los usos del suelo y en los ecosistemas pueden llevar a cambios en la provisión de servicios a diferentes escalas, lo que facilita la construcción de modelos para evaluar las consecuencias de diferentes medidas de gestión del territorio. InVEST consta de varios módulos para cada uno de los SE. En este caso hemos utilizado el módulo que calcula la capacidad de abastecimiento de agua superficial (Water Yield).

En primer lugar, mediante sistemas de información geográfica hemos realizado un estudio de las cuencas y sub-cuencas a las

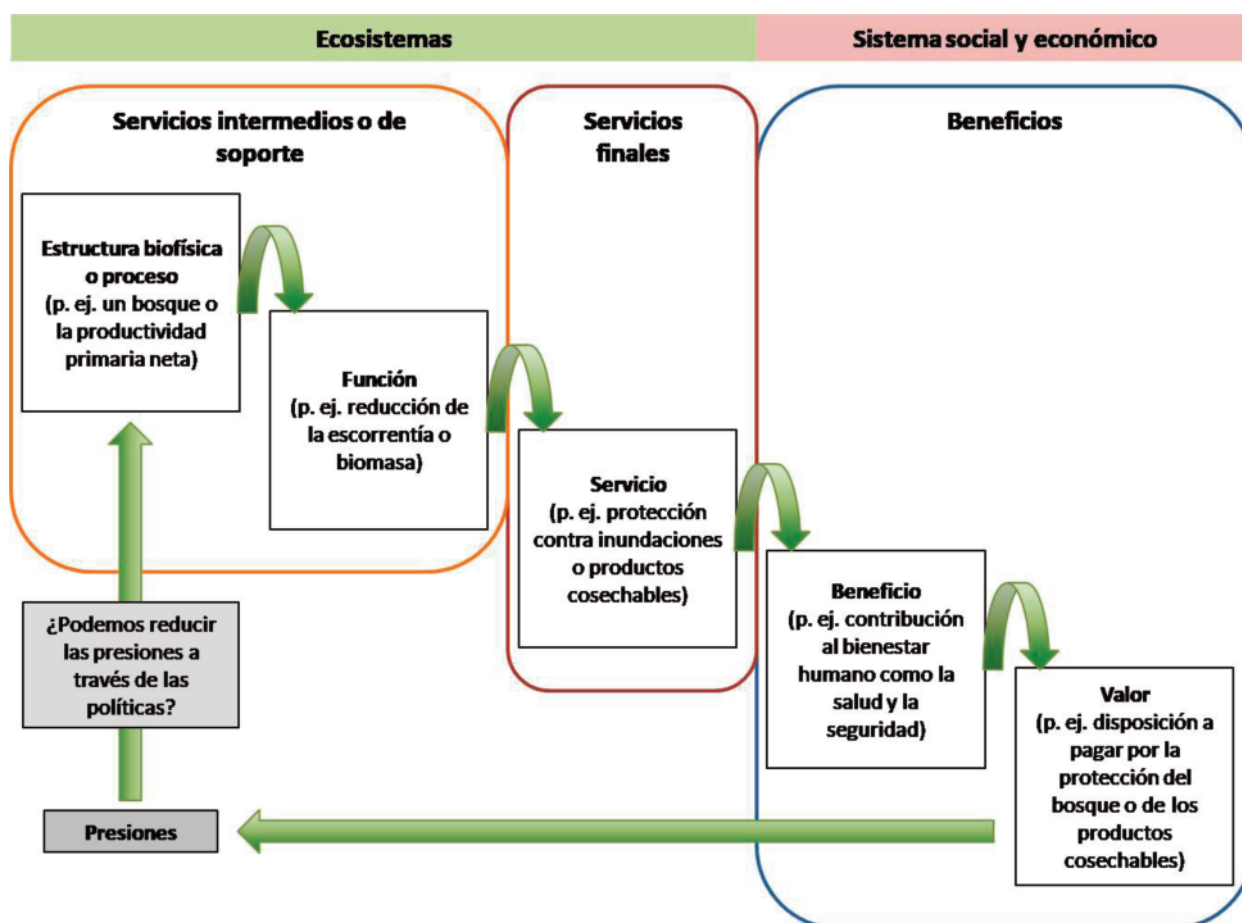


Figura 2. Modelo en cascada de servicios de los ecosistemas. Fuente: Potschin-Young et al. 2018.

Figure 2. Ecosystem services cascade. Source: Potschin-Young et al. 2018.

que drena la RBSR y que constituyen el ámbito de estudio (**Fig. 1**). El 83% de la superficie de la RBSR drena a la cuenca del río Lozoya, aportando agua al embalse de El Atazar. Este embalse es el más importante de la Comunidad de Madrid, llegando a suponer el 45% del total del agua embalsada para abastecimiento de la Comunidad (**Canal de Isabel II 2012**). Por ello, nos hemos centrado en calcular la cantidad de agua que la RBSR aporta a este embalse y su importancia en la provisión de agua potable de alta calidad en el territorio de la Comunidad de Madrid.

El módulo *Water Yield* del modelo *INVEST* que hemos utilizado para esta evaluación estima las contribuciones relativas de agua de diferentes partes de un territorio, y ofrece información sobre cómo los cambios en los patrones de uso del suelo afectan a la aportación o generación anual de agua superficial. Tal como se muestra en la **Figura 3**, para estimar la capacidad de abastecimiento de agua superficial, el módulo *Water Yield* de *INVEST* tiene en cuenta: a) la precipitación (*precipitation*), b) la evapotranspiración potencial (*evaporation* y *transpiration*), c) la recarga de agua a los acuíferos (*ground water recharge*), d) la profundidad de las raíces (*rootdepth*), y e) la proporción de agua del suelo que pueden absorber las raíces (*water availability*).

El agua superficial disponible para abastecimiento, es decir, el agua de escorrentía superficial que llega a los ríos y en su caso a los embalses, se calcula restando a la precipitación total la evapotranspiración de la vegetación (tanto de cultivos como de plantas y árboles), la recarga de acuíferos y el agua que se queda retenida en el suelo, según la siguiente ecuación:

$$\Delta S = P - E - EVT - A$$

Donde ΔS es el agua disponible para abastecimiento de agua, P es precipitación total, E es la escorrentía, EVT es la evapotranspiración, y A es la pérdida debida a acuíferos profundos que no contribuyen al caudal del Río (**Tognetti et al. 2003**).

El **anexo 1** contiene una descripción detallada de cada una de las capas de información geográfica utilizadas en el modelo.

El modelo *INVEST* utiliza todas estas capas de información geográfica para calcular la cantidad de agua que se produce en las sub-cuencas hidrográficas de interés. Como resultado genera un mapa ráster en el que cada celda contiene la información del volumen medio anual de agua generada en la misma. Para calcular la capacidad de provisión de agua para abastecimiento de la RBSR se ha procedido a sumar los volúmenes de agua de cada una de

las celdas de las cuencas que abastecen al embalse de El Atazar y, por otro lado, de las situadas dentro del territorio de la RBSR. Por último, con estos datos, se ha calculado el porcentaje de agua del total que se vierte al embalse de El Atazar que procede de la RBSR.

2. Análisis de sensibilidad y validación de los resultados biofísicos

Hemos realizado un análisis de sensibilidad aplicando el mismo modelo y cambiando los valores de las diferentes variables (capas de información geográfica): profundidad de las raíces, parámetro Z , precipitación, evapotranspiración y usos del suelo (**Redhead et al. 2016**). Para su validación se ha obtenido la aportación anual media de la red de estaciones de aforos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y la escorrentía calculada por el *INVEST* para las mismas subcuencas, así como el volumen máximo del embalse de El Atazar.

3. Metodología para la evaluación del flujo de agua para abastecimiento desde la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón a otros municipios de la Comunidad de Madrid

El flujo de agua desde la RBSR hacia otros municipios de la Comunidad de Madrid se ha calculado a partir de la media de los datos anuales de volumen de agua derivado del embalse de El Atazar a las estaciones de tratamiento para los años 2015-2017 (**Boithias et al. 2014**; **González-García et al. 2020**). A este dato (información proporcionada por el Canal de Isabel II a través de comunicación por correo electrónico) le aplicamos el porcentaje obtenido en el paso anterior para obtener el volumen de agua derivado para consumo (flujo) que procede de la RBSR y calculamos el porcentaje que proviene de la RBSR respecto al total de agua derivada de los embalses de la Comunidad de Madrid que gestiona el Canal de Isabel II.

Como en la red de distribución se producen pérdidas de agua, el volumen final facturado, es decir, la demanda, es siempre menor que el volumen de agua derivado para consumo. Por ello, para conocer el flujo real de agua desde la RBSR a los municipios de la Comunidad de Madrid que gestiona el Canal de Isabel II asumimos que las proporciones de pérdidas son similares en todos los embalses y cuencas y aplicamos el último porcentaje obtenido.

Aunque el embalse de El Atazar abastece prácticamente a la totalidad de Madrid capital y parte de municipios del oeste, este y sur no podemos concretar el volumen que llega a cada municipio. Esto se debe a que el agua del embalse puede derivarse a distintas estaciones de tratamiento que, a su vez, derivan agua ya potabilizada a decenas de depósitos reguladores que abastecen a múltiples municipios, y tanto en un paso como el otro el agua de un embalse se puede mezclar con agua de otras procedencias en función de la situación hidrológica y operativa (información proporcionada por el Canal de Isabel II a través de comunicación por correo electrónico).

4. Metodología para la evaluación de la demanda de agua en la Comunidad de Madrid

La demanda de agua se ha calculado para el total de la Comunidad de Madrid, exceptuando a los municipios de Alameda del Valle, Aldea del Fresno, Rascafría, Somosierra y Villa del Prado, que no pertenecen al Canal de Isabel II, y Alcalá de Henares, donde se gestiona a través de una Unión Temporal de Empresas (**Comunidad de Madrid 2018**). La finalidad es evaluar la importancia que tiene la RBSR en el servicio de abastecimiento de agua para la totalidad del territorio en el que la gestión del agua es llevada a cabo por el Canal de Isabel II. Para ello hemos calculado la media del volumen total de agua facturada para los años 2015-2017 obtenidos del Banco de datos municipal y zonal ALMUDENA (**Comunidad de Madrid 2018**).

5. Metodología para la valoración económica del servicio de abastecimiento de agua

La metodología seguida para valorar monetariamente la provisión del servicio de abastecimiento de agua por la RBSR hacia otros municipios de la Comunidad de Madrid ha sido basada en mercados

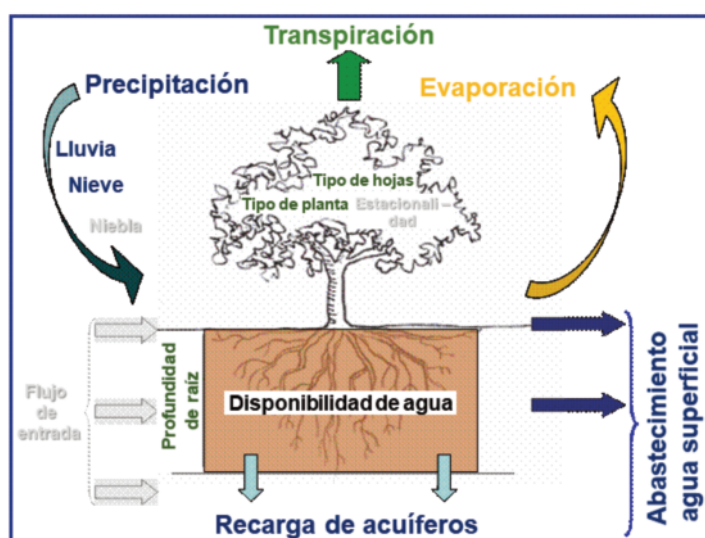


Figura 3. Modelo *Water Yield* de *INVEST*. Fuente: *INVEST User Guide* (**Sharp et al. 2018**).

Figure 3. Description of *INVEST Water Yield* model. Source: *INVEST User Guide* (**Sharp et al. 2018**).

(Market based methods), utilizando las tarifas de agua para asignarle ese valor monetario (García Llorente et al. 2015; Karabulut et al. 2016; Santos-Martín et al. 2016). En concreto, hemos multiplicado el volumen medio anual de agua que provee la RBSR por la tarifa urbana del agua en la Comunidad de Madrid en 2018 (Canal de Isabel II 2018). Puesto que las tarifas del agua están diferenciadas por servicios (aducción, distribución, alcantarillado y depuración) y usos (domésticos y asimilados al doméstico, comerciales, asimilados al comercial e industriales, y otros usos), son progresivas (las tarifas se incrementan por tramos de volumen consumido). Como desconocemos el volumen de agua que se ha facturado según cada tarifa, hemos utilizado la cifra de 1486 €/m³ calculada para una vivienda con un consumo de 25 m³/bimestre, con un diámetro de contador de 15 mm y ubicada en un municipio de la Comunidad de Madrid donde el Canal de Isabel II presta los servicios de abastecimiento y saneamiento sin incluir el IVA (Canal de Isabel II 2018). Esta es la cantidad que el Canal de Isabel II usa como referencia. Hay que tener en cuenta, por tanto, que este importe puede variar entre los distintos municipios en función de los convenios firmados y, por consiguiente, de los servicios prestados en cada uno de ellos.

Resultados

Capacidad de provisión de agua para abastecimiento de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón

En la Figura 4 se muestra el mapa generado por el programa InVEST en el que cada celda indica la cantidad de agua que se genera en ella anualmente. Sumando los valores de las celdas obtenemos que las cuencas y sub-cuencas que abastecen al embalse de El Atazar generan un total de 640 hm³ anuales (Tabla 1), mientras que la RBSR genera 93hm³. Por tanto, la RBSR aporta el 14.53% del volumen de agua que llega al embalse de El Atazar.

Análisis de sensibilidad y validación de los resultados biofísicos

Hemos realizado análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en el modelo (Tabla 2). Los resultados muestran que la precipitación es la variable que mayor incidencia tiene: al multiplicar los valores de la precipitación por cuatro, el resultado de abastecimiento de agua se incrementa en un 400%. Los usos del suelo es la segunda variable con mayor importancia: al aumentar la superficie de dehesa, el abastecimiento de agua se reduce un 13%. La evapotranspiración potencial (EVTP) tiene una pequeña influencia, y la variación en los datos de profundidad de las raíces y el parámetro Z del modelo apenas varían los resultados.

Además hemos realizado una validación de los resultados del modelo con un dato externo: la aportación anual media (años 1965-1985) de la Estación de aforos 3155 (Río Lozoya en Puentes Viejas), que es de 272.55 hm³ (CEDEX 2019). Los resultados del modelo aplicado al territorio que drena a dicha estación de aforo son de 487.37 hm³, es decir, un 78% mayor.

A su vez, el volumen total estimado, 640 hm³, es mayor que la capacidad de almacenamiento del embalse (425.3 hm³) (Canal de Isabel II 2015). Ambas validaciones muestran por lo tanto que el programa está generando una sobreestimación.

Por otra parte, como se ha explicado en la metodología y tal y como muestran los resultados, el modelo biofísico también se ha utilizado para saber qué porcentaje del agua embalsada en El Atazar proviene de la RBSR (y no del resto del territorio que drena al embalse). En ese sentido, la proporción de agua generada en la RBSR sí es consistente con las diferentes validaciones realizadas (Tabla 2), estando siempre entre el 13.8% y el 14.8%, en torno al 14.6% obtenido con los parámetros utilizados. Este valor, por lo tanto, sí se considera suficientemente robusto.

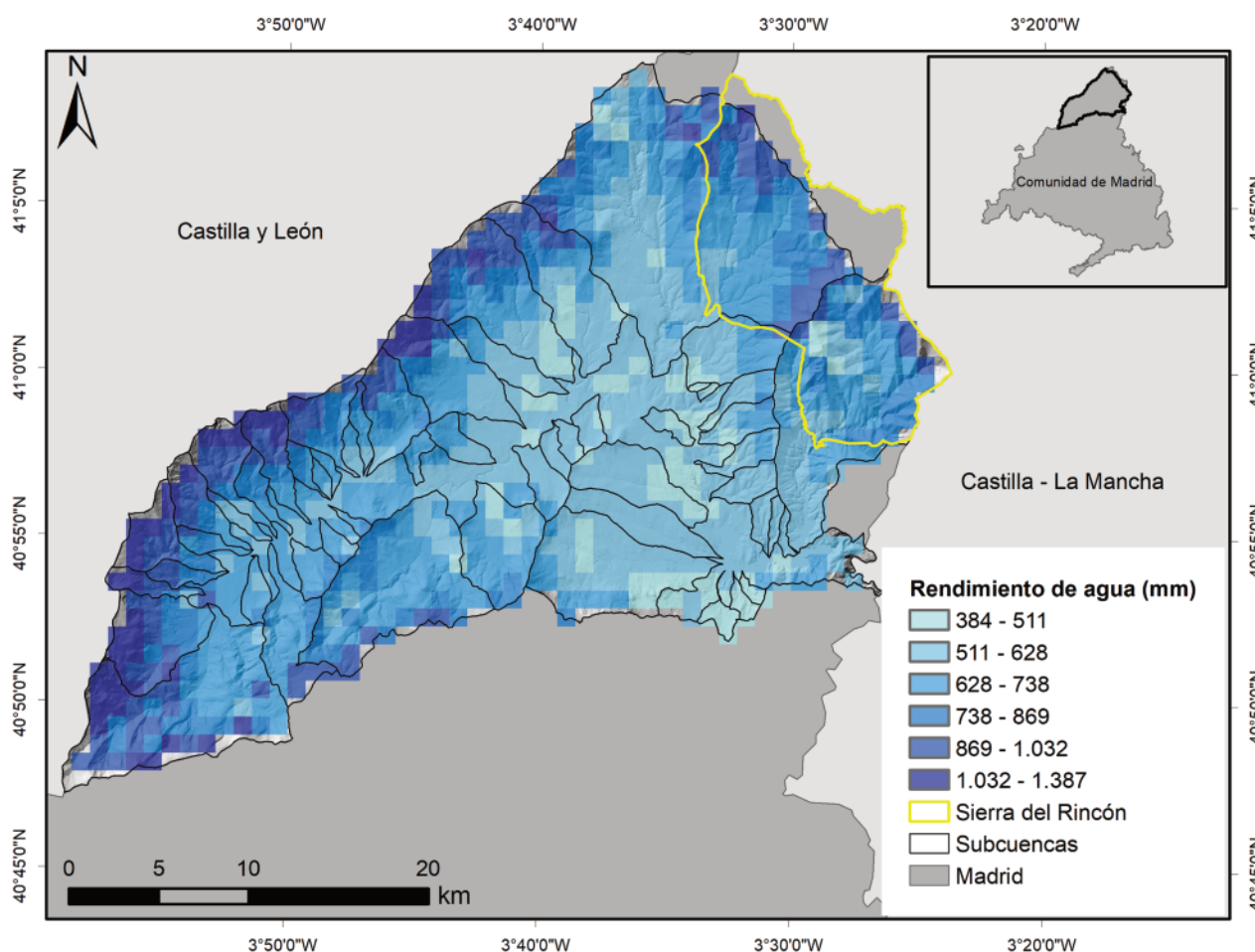


Figura 4. Mapa de la capacidad de provisión de agua de las sub-cuencas hidrográficas que drenan al embalse de El Atazar. Fuente: Elaboración propia.
Figure 4. Map of the water supply of the river basins that drain to the El Atazar reservoir. Source: Own elaboration.

Tabla 1. Volumen de agua generado en las cuencas que drenan al embalse de El Atazar. Fuente: Elaboración propia.**Table 1.** Volume of water generated in the river basins that drain to the El Atazar reservoir. Source: Own elaboration.

Volumen de agua generada en el total de sub-cuencas (hm ³)	Volumen de agua generada en la RBSR (hm ³)	Volumen de agua generada en la RBSR (%)
640.5	93.3	14.6%

Tabla 2. Resultados del análisis de sensibilidad efectuado sobre los parámetros del modelo InVEST. Fuente: Elaboración propia.**Table 2.** Results of the sensitivity analysis performed on the parameters introduced in the InVEST model. Source: Own elaboration.

Versiones	Cambios introducidos	Resultados (m ³ de escorrentía superficial)			% Cambio	% Sierra del Rincón sobre el total
		Sumando píxeles		Por cuenca		
		Cuenca total	Área Sierra del Rincón	Cuenca total		
A	Original	-	MAX': 1387.0,	'MAX': 1265.0,	653.8	1.00%
			'MEAN': 700.77,	'MEAN': 758.69,		
			'MIN': 384.75,	'MIN': 482.0,		
			'STD_DEV': 169.92,	'STD_DEV': 131.04,		
			'SUM': 640504.55	'SUM': 93319.18		
B	Profundidad de raíces	0-50 todos	MAX': 1387.0,	'MAX': 1265.0,	653.8	100%
			'MEAN': 700.82,	'MEAN': 758.69,		
			'MIN': 387.99	'MIN': 482.0,		
			'STD_DEV': 169.85,	'STD_DEV': 131.03,		
			'SUM': 640546.68	'SUM': 93319.86		
C	Parámetro Z	Z=7	MAX': 1387.0,	'MAX': 1265.0,	652.9	99.9%
			'MEAN': 699.85,	'MEAN': 758.62,		
			'MIN': 349.90,	'MIN': 482.0,		
			'STD_DEV': 171.28,	'STD_DEV': 131.09,		
			'SUM': 639663.32	'SUM': 93310.70		
D	Precipitación	x 4	MAX': 5548.0,	'MAX': 5060.0,	2648.6	405%
			'MEAN': 2839.30,	'MEAN': 3043.48,		
			'MIN': 1860.0,	'MIN': 1928.0,		
			'STD_DEV': 650.37,	'STD_DEV': 522.84,		
			'SUM': 2595128.91	'SUM': 374348.59		
E	EVTP	x 4	MAX': 1387.0,	'MAX': 1265.0,	641.7	98%
			'MEAN': 687.70,	'MEAN': 755.16,		
			'MIN': 284.55	'MIN': 474.78,		
			'STD_DEV': 185.67,	'STD_DEV': 134.61,		
			'SUM': 628564.00	'SUM': 92884.40		
F	Usos del suelo	Asociación = Dehesa	MAX': 1210.95,	'MAX': 1055.11,	566.9	87%
			'MEAN': 607.71,	'MEAN': 621.28,		
			'MIN': 375.15	'MIN': 378.32,		
			'STD_DEV': 145.026,	'STD_DEV': 122.04,		
			'SUM': 555445.70	'SUM': 76417.39		

Flujo, demanda y valoración económica del servicio de abastecimiento de agua desde la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón a otros municipios de la Comunidad de Madrid

Los resultados del flujo, demanda y valoración económica del servicio de abastecimiento de agua desde la RBSR están resumidos en el esquema de la **Figura 5**.

Los volúmenes de agua derivados a las plantas de tratamiento de la totalidad de los embalses que gestiona el Canal de Isabel II y del embalse de El Atazar para los años 2015-2017 se muestran en la **Tabla 3**. El flujo anual medio de agua para abastecimiento desde el embalse de El Atazar a diversos municipios de la Comunidad de Madrid es de 158.7 hm³, es decir, un 31.9% del total de agua derivada desde los embalses gestionados por el Canal de Isabel II.

Aplicando el porcentaje resultante de la evaluación de la capacidad de provisión de agua de la RBSR (14.5%), obtenemos que el flujo anual medio de agua para abastecimiento desde la RBSR hacia otros municipios es de 23.0 hm³. Esto supone el 4.6% del total de agua que se deriva de los embalses que gestiona el Canal de Isabel II en la Comunidad de Madrid.

En la **Tabla 4** se muestra el volumen de agua facturado por el Canal de Isabel II en el periodo 2015-2017. Como se puede observar la media de los 3 años es menor que la media del volumen de agua derivado de los embalses. Esto se debe a pérdidas de agua en los procesos de aducción y distribución. Si asumimos que los porcentajes de pérdidas son iguales para todos los embalses y cuencas, podemos determinar que el 4.6% del total de agua facturada procede de la RBSR, es decir, 18.8 hm³. El valor económico del agua que procede de la RBSR es de 27.9 millones de euros.

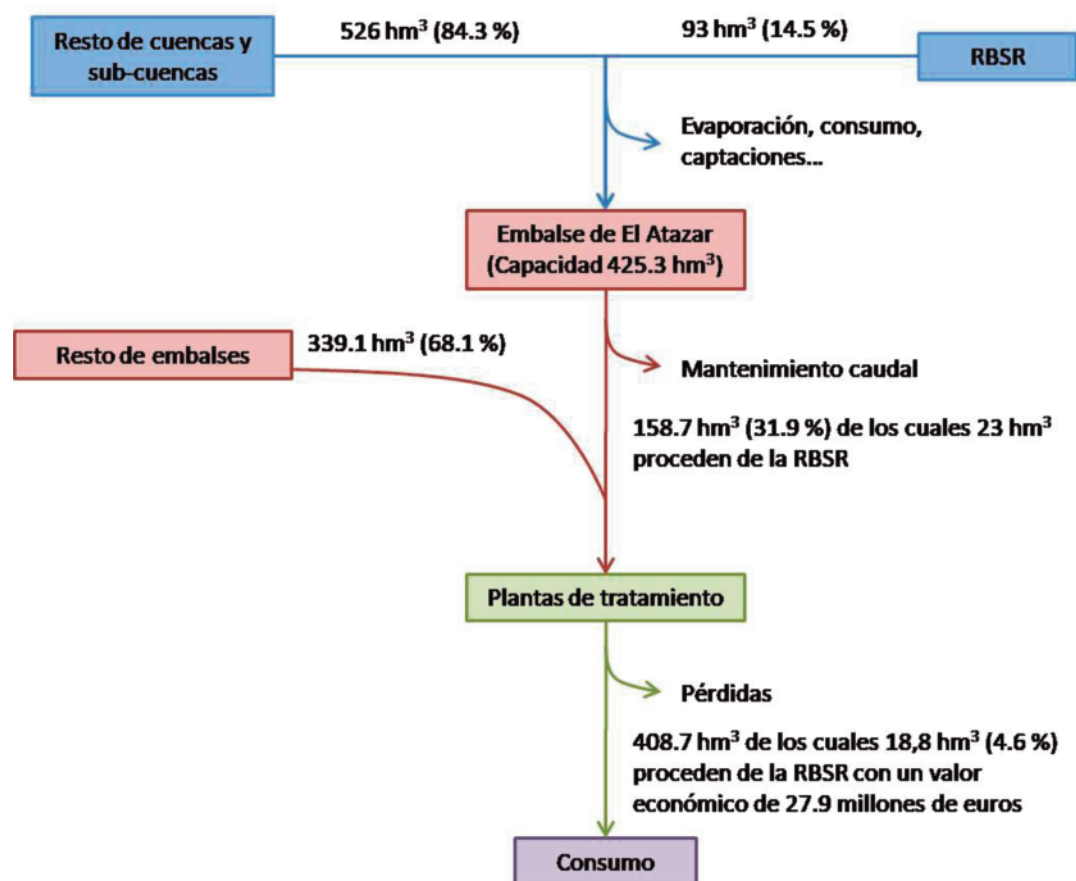


Figura 5. Principales resultados del estudio. Fuente: Elaboración propia.

Figure 5. Main results of the study. Source: Own elaboration.

Tabla 3. Volúmenes de agua derivados anuales para abastecimiento desde los embalses gestionados por el Canal de Isabel II y el embalse de El Atazar. Fuente: Canal de Isabel II.

Table 3. Annual water volume used from reservoirs managed by the Canal de Isabel II and from El Atazar reservoir. Source: Canal de Isabel II.

Año	Volumen de agua derivado total (hm ³)	Volumen de agua derivado del embalse de El Atazar (hm ³)	Volumen de agua derivado del embalse de El Atazar (%)
2015	497.7	148.3	29.8
2016	491.5	164.8	33.5
2017	504.3	163.1	32.3
Media de los 3 años	497.8	158.7	31.9

Tabla 4. Volumen de agua facturado anualmente por el Canal de Isabel II. Fuente: Almudena. Banco de datos municipal de la Comunidad de Madrid.

Table 4. Volume of water annually billed by the Canal de Isabel II. Source: Almudena Municipal data bank of the Community of Madrid.

Año	Volumen de agua facturado (hm ³)
2015	404.0
2016	406.0
2017	416.1
Media de los 3 años	408.7

Discusión

Este estudio ha sido una primera aproximación para evaluar los servicios de los ecosistemas ligados al agua en la RBSR, centrándonos en el servicio de provisión de agua para abastecimiento y su valoración biofísica y económica. El estudio pretende contribuir también al debate sobre la posibilidad de estructurar un sistema de compensación a las zonas de origen del servicio, que pueda contribuir a fortalecer y promocionar actividades que contribuyan a su sostenibilidad ambiental, económica y social, así como para contribuir a asegurar un adecuado y continuo flujo de agua. Este último elemento será cada vez más importante debido a las consecuencias estimadas del cambio climático en España.

Los resultados de esta evaluación pueden ser útiles para la toma de decisiones y el diseño e implementación de medidas de gestión y conservación de los ecosistemas. Mecanismos como el pago por servicios de los ecosistemas o los fondos de agua (Goldman-Benner et al. 2012) que tengan en cuenta la valoración económica del servicio, podrían destinarse a la conservación de los ecosistemas que generan este servicio y a proyectos que promuevan el desarrollo socioeconómico del territorio, necesarios en lugares que han sufrido despoblamiento rural como la RBSR, y garanticen y promuevan la provisión de SE.

Esta evaluación se ha realizado con una serie de condicionantes y limitaciones que podrían solventarse en un futuro. A continuación, explicamos algunas propuestas de mejora, estructuradas según los pasos de la metodología seguida.

Con respecto a la evaluación biofísica de la capacidad de provisión de agua de la RBSR, ésta se podría determinar con mayor precisión utilizando información espacial con mayor resolución, por ejemplo, mejorando la resolución de las variables edáficas, de la precipitación y de los usos del suelo, ya que han demostrado ser las variables más sensibles en lo que respecta a los resultados del modelo (Redhead et al. 2016).

El presente estudio ha utilizado valores anuales, lo que no tiene en cuenta factores importantes como la intensidad de la precipitación, los días de lluvia o las horas de lluvia, etc., y por lo tanto asumimos que hay una sobreestimación. Esto se debe principalmente a la distribución de la precipitación a lo largo de un mismo día e incluso de un mismo mes ya que en días de precipitación escasa no tiene por qué producirse escorrentía. Los resultados indican que, en un contexto climático mediterráneo, el modelo sobreestima la escorrentía, por lo que sería necesario considerar una mayor precipitación efectiva (entendida como la cantidad de la precipitación que se infiltra en el suelo), y realizar su evaluación a partir de datos diarios que tengan en cuenta la humedad previa del suelo antes de producirse las precipitaciones. Siguiendo con esta línea, para mejorar futuros estudios sería necesario hacer el análisis a nivel estacional, para lo que existe un modelo específico de InVEST (Scordo et al. 2018).

De forma similar, algunos factores geológicos no son captados por el modelo. Por ejemplo, InVEST trabaja con cuencas hidrográ-

ficas (aquellas delimitadas por factores altitudinales) pero no con cuencas hidrogeológicas (aquellas basadas en buzamiento, estratos y conductividad hidráulica). Es por esto que otras áreas externas a la RBSR podrían estar aportando o detrayendo agua a los embalses, del mismo modo que puede suceder con acumulaciones parciales de agua subterránea.

A su vez, el modelo no calcula la cantidad de agua que es consumida en las sub-cuencas hídras evaluadas. Por lo tanto, para mejorar el cálculo de la capacidad de provisión de agua de la RBSR, tanto en volumen como en porcentaje en relación al total de las cuencas que abastecen al embalse de El Atazar, se podría determinar qué municipios de las cuencas evaluadas captan y consumen agua antes de que llegue al embalse (por ejemplo, para consumo ganadero, agrícola, urbano, etc.). El modelo tampoco tiene en cuenta la evaporación de los embalses que hay aguas arriba del embalse del Atazar.

En lo que respecta a la valoración monetaria del servicio de abastecimiento de agua, se podría realizar un estudio con mayor detalle para determinar un valor unitario del agua más preciso. Para ello, habría que determinar el porcentaje de agua facturado destinado a cada tipología de uso y el porcentaje facturado en cada tramo de consumo, y calcular según estos porcentajes y las tarifas de agua, el valor unitario, de forma parecida a cómo hicieron Karabulut et al. (2016). Para seguir esta metodología no hemos conseguido los datos necesarios, por lo que recomendamos que pudieran estar disponibles de forma pública.

La valoración monetaria en este estudio se ha realizado en base a las tarifas actuales. La valoración económica puede realizarse con otras metodologías que complementen la realizada en este estudio. Una opción es utilizar el propio modelo InVEST. Otras posibles metodologías son realizar un meta-análisis de valoraciones económicas del servicio o el uso de técnicas de experimentos de elección (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España 2014).

También queríamos llamar la atención sobre el hecho de que este estudio no valora el servicio aportado por el 17% del territorio de la RBSR que pertenece a la cuenca del Jarama, por lo que proponemos incluirlo en futuros estudios, ya que esto aumentará el valor del agua que provee la RBSR.

Para complementar los resultados de esta investigación sugerimos realizar una evaluación cultural del servicio (el valor social de los ecosistemas asociados al agua), que puede ser muy importante tanto para la población local (ligado a tradiciones, creencias, experiencias personales) como para la población de la Comunidad de Madrid, por su potencial uso recreativo (turismo), científico y educativo (Daniel et al. 2012).

Finalmente, es conveniente señalar que este trabajo aporta la evaluación biofísica y monetaria de sólo un servicio de los ecosistemas, pero que la RBSR aporta un conjunto muy amplio de servicios. Consideramos que la gestión de este territorio sólo podrá mejorar si se tienen en consideración el conjunto de los servicios que provee, y teniendo en cuenta en su valoración sus diferentes componentes biofísica, monetaria y cultural (Díaz et al. 2018). A continuación nombramos algunos de los SE que consideramos más importantes en la RBSR, atendiendo a la demanda tanto de la población de la RBSR como de otros territorios: servicios de abastecimiento (además del agua superficial para consumo humano, objeto principal de este estudio) relacionados con las prácticas agrícolas y ganaderas, la recolección de plantas y silvestres, la caza y la pesca; servicios de regulación tales como la regulación de la calidad del agua, el almacenamiento de carbono, el control de la erosión, la regulación del ciclo hidrológico y la escorrentía, la protección contra incendios, la polinización y la dispersión de semillas; servicios culturales tanto a los propios habitantes de la zona como a los visitantes ocasionales (turismo, tradiciones, científicos, etc.). De esta forma se podrían analizar las tensiones existentes entre la provisión de diferentes SE importantes para el bienestar humano, tanto de la población de la RBSR como del resto de habitantes de la Comunidad de Madrid que dependen de ellos. Solo así se podrá garantizar la provisión del conjunto de SE de este entorno tan singular.

Las decisiones sobre cambios de usos afectan notablemente al suministro de SE, por ejemplo, reforestar masivamente puede reducir el suministro total de agua. InVEST permite modelizar diferentes escenarios modificando los usos del suelo. Realizar este estudio en el futuro permitiría conocer los efectos que pueden tener aplicar diferentes medidas de gestión en el territorio sobre la provisión de SE (González-García et al. 2020).

Conclusiones

Aunque la superficie de la RBSR no llega a ocupar ni el 2% de la extensión de la Comunidad de Madrid, con una estimación de 93 hm³ anuales, llega a proveer el 4.6% del agua que se consume en el territorio. Tomando como referencia la tarifa del agua para una vivienda con un consumo de 25 m³/bimestre, y ubicada en un municipio de la Comunidad de Madrid donde el Canal de Isabel II presta los servicios de abastecimiento y saneamiento, el servicio de provisión de agua para abastecimiento por parte de la RBSR adquiere un valor monetario estimado de 27.9 millones de euros según el modelo utilizado y descrito en este artículo.

Será necesario mantener y poner en práctica medidas de gestión sostenible del territorio, que garanticen el funcionamiento normal de los ecosistemas y la conservación de su biodiversidad; factores estrechamente ligados con la adecuada conservación de los recursos hídricos de la RBSR. Por ello, se considera esencial la valoración cultural, biofísica y económica del conjunto de los servicios de los ecosistemas en los procesos de toma de decisiones, diseño e implementación de las medidas de gestión y conservación de los recursos naturales y los ecosistemas. Estas valoraciones pueden dar pie a medidas como el pago por servicios de los ecosistemas o los fondos de agua, que pretenden compensar económicamente a las zonas que proveen los servicios de los ecosistemas, en general, territorios afectados por el despoblamiento rural, la falta de oportunidades y de servicios en comparación con las ciudades, permitiendo así que esas inversiones repercutan en la satisfactoria y sostenible provisión del servicio del que dependen sin menoscabar otros.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por la Comunidad de Madrid. Gracias a Jorge Cerezal por su ayuda en la recogida de datos.

Referencias

- Álvarez Vergel, R., Álvarez García, M.Á., Amezcua, I., Arnáez, J., Agudo, P.A., Bilbao González, R., Boada Juncà, M. et al. 2010. *Servicios Ambientales en Reservas de la Biosfera Españolas*. Ona India, M. (ed.), TRAGSA. Madrid, España.
- Boithias, L., Acuña, V., Vergoñós, L., Ziv, G., Marcé, R., Sabater, S. 2014. Assessment of the water supply: demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *Science of The Total Environment* 470: 567-577.
- Canal de Isabel II 2012. 2012 Informe anual Canal de Isabel II Gestión. Disponible en: https://www.canaldeisabelsegunda.es/documents/20143/84800/30102019_Informe_Anuar_2018.pdf/8e06c922-9838-f19b-3a66-ca10263ba268?t=1572521396963
- Canal de Isabel II 2018. *Cuidamos tu agua. Tarifas 2018*. Disponible en: https://oficinavirtual.canaldeisabelsegunda.es/recytal/public/suministro_tarifas_bonificaciones.htm
- Canal de Isabel II 2015. *El ciclo integral del agua*. Disponible en <http://www.canalciclointegraldelagua.es/>
- CEDEX 2019. Estaciones de aforos. Confederaciones hidrográficas. Disponible en: http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-gr_cuenca_ambito.asp [Consultado 20 de enero de 2020].
- Comunidad de Madrid 2018. Alameda. Banco de Datos Municipal de la Comunidad de Madrid. Disponible en: <https://www.madrid.org/desvan/Inicio.icm?enlace=almudena> [Consultado 20 de enero de 2020].
- Comunidad de Madrid 2020. Sierra del Rincón. Reserva de la Biosfera. Disponible en: <http://www.sierradelrincon.org/> [Consultado 20 de enero de 2020].
- Daniel, T.C., Muhar, A., Arnberger, A., Aznar, O., Boyd, J.W., Chan, K.M.A., Costanza, R. et al. 2012. Contributions of cultural services to the ecosystem services agenda. *Academy of Sciences* 109: 8812-8819.
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R.T., Molnár, Z., Hill, R. et al. 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science* 359: 270-272.
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España 2011. *La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España. Síntesis de resultados*. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid, España.
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España 2014. *Evaluación de los ecosistemas del milenio de España. Ecosistemas y biodiversidad de España para el bienestar humano. Valoración económica de los servicios de los ecosistemas suministrados por los ecosistemas de España (EMEC)*. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, España.
- Folke, C., Jansson, A., Larsson, J., Costanza, R. 1997. Ecosystem appropriation by cities. *Ambio* 26: 167-172.
- García Llorente, M., Quintas-Soriano, C., Zorrilla-Miras, P., Loureiro, M., Montes, C., Benayas, J., Santos-Martín, F. 2015. Socio-economic valuation of ecosystem services in Spain. En: Nuss-Girona, S., Castañer, M. (eds.), *Ecosystem services: concepts, methodologies and instruments for research and applied use*, pp. 51-64. Documenta Universitaria, Girona, España.
- Goldman-Benner, R.L., Benitez, S., Boucher, T., Calvache, A., Daily, G., Kareiva, P., Kroeger, T., Ramos, A. 2012. Water funds and payments for ecosystem services: practice learns from theory and theory can learn from practice. *Oryx* 46: 55-63.
- González-García, A., Palomo, I., González, J.A., López, C.A., Montes, C. 2020. Quantifying spatial supply-demand mismatches in ecosystem services provides insights for land-use planning. *Land Use Policy* 94: 104493.
- INE 2019. *Demografía y población. Padrón. Población por Municipios Instituto Nacional de Estadística*. Madrid, España. Disponible en: https://ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254734710990. [Consultado 20 de enero de 2020].
- Karabulut, A., Egoh, B.N., Lanzanova, D., Grizzetti, B., Bidoglio, G., Pagliero, L., Bouraoui, F. et al. 2016. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin. *Ecosystem Services* 17: 278-292.
- de las Heras, P., Cuevas, J.Á. 2005. *Caracterización paisajística y ecológica de la Sierra del Rincón (Madrid)*. Centro de Investigaciones Ambientales de la Comunidad de Madrid, Madrid, España.
- Maes, J., Zulian, G., Thijssen, M., Castell, C., Baró, F., Ferreira, A.M., Melo, J. et al. 2016. *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. Urban Ecosystems. 4th Report*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Martín López, B., Gómez-Baggethun, E., Montes, C. 2009. Un marco conceptual para la gestión de las interacciones naturaleza-sociedad en un mundo cambiante ({A} conceptual framework to manage interactions between nature and society in a changing world). *Cuaderno Interdisciplinar de Desarrollo Sostenible (CUIDES)* 229-258.
- Millennium Ecosystem Assessment 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Morata, A. 2014. *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre {España} a partir de los resultados del {IPCC}-{AR}4*. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.
- Ona India, M., Madariaga, I., Palacios, I., Arana, X. 2015. *Naturaleza y bienestar en Bizkaia. La Evaluación de los Servicios de los Ecosistemas: investigación aplicada a la gestión*. Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Leioa, España.
- Potschin-Young, M., Haines-Young, R., Görg, C., Heink, U., Jax, K., Schleyer, C. 2018. Understanding the role of conceptual frameworks: Reading the ecosystem service cascade. *Ecosystem Services* 29: 428-440.
- Redhead, J.W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., Oliver, T.H., Bullock, J.M. 2016. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of The Total Environment* 569: 1418-1426.
- Rees, W., Wackernagel, M. 1996. Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable - and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review* 16: 223-248.

- Santos-Martín, F., García Llorente, M., Quintas-Soriano, C., Zorrilla-Miras, P., Martín-López, B., Loureiro, M., Montes, C., Benayas, J. 2016. *Spanish National Ecosystem Assessment: Socio-economic valuation of ecosystem services in Spain. Synthesis of the key findings*. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.
- Scordo, F., Lavender, T., Seitz, C., Perillo, V., Rusak, J., Piccolo, M., Perillo, G. 2018. Modeling water yield: Assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the InVEST seasonal water yield model. *Water* 10: 1496.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E. et al. 2018. *InVEST 3.5.0.post356+n4e98368ac2f6 User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, Stanford, CA, Estados Unidos; University of Minnesota, Minneapolis, MN, Estados Unidos; The Nature Conservancy, Arlington, VA, Estados Unidos, and World Wildlife Fund, Gland, Suiza.
- Tognetti, S.S., Mendoza, G., Southgate, D., Aylward, B., García, L. 2003. Evaluación de la efectividad de pagos para servicios ambientales en las cuencas hidrológicas. En: *Tercer Congreso Latinoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales*, pp. 11. Arequipa, Perú. http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/foro/psa/pdf/tognetti.pdf
- UK National Ecosystem Assessment 2011. *The UK National Ecosystem Assessment: Synthesis of the Key Findings*. UNEP-WCMC, Cambridge. Technical Report. UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido. <http://uknea.unep-wcmc.org/Resources/tabid/82/Default.aspx>
- UNESCO 1984. Action plan for biosphere reserves. *Nature and Resources* 20: 1-12.

Anexo 1. Descripción detallada de cada una de las capas de información geográfica utilizadas en el modelo.

Appendix 1. Detailed description of each of the geographic information layers used in the model.

Precipitación

La precipitación se ha obtenido a partir de datos públicos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente ([MAPAMA 2016](#)), para el periodo 2000-2009. Se ha calculado la precipitación media anual. Este mapa fue proporcionado por el Laboratorio de Socioecosistemas del Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), elaborado en el marco del proyecto Ecogradientes ([González-García et al. 2020](#)). En él se muestra que las zonas más claras corresponden a áreas con mayor precipitación mientras que las más oscuras atienden a zonas con ratios de precipitación más bajos.

Evapotranspiración

La **evaporación** se refiere al agua transferida a la atmósfera a partir de la superficie de agua, hielo y nieve. La **transpiración** es la pérdida de agua que se produce en los seres vivos al respirar y al realizar diferentes funciones biológicas. Cuando se quiere determinar la pérdida de agua de una superficie cubierta de vegetación resulta prácticamente imposible separar la transpiración de la evaporación propiamente dicha, pues ambos procesos están interrelacionados. Por ello, se utiliza el concepto de **evapotranspiración** que expresa el conjunto de pérdidas de agua desde la superficie del suelo y desde la vegetación hacia la atmósfera en forma de vapor.

La evapotranspiración se ha obtenido a partir de los datos del [MAPAMA \(2016\)](#), para el periodo de años entre 2000 y 2009, calculados para el proyecto Ecogradientes ([González-García et al. 2020](#)). En él se muestra que las zonas más claras corresponden a áreas con mayor evapotranspiración mientras que las más oscuras atienden a zonas con rangos de evapotranspiración más bajos.

Profundidad de raíces

La utilización de agua por las plantas depende de un conjunto de factores edáficos, biológicos y climáticos. Concretamente, el aporte de agua a las plantas y la posibilidad de satisfacer su requerimiento está influido por: la capacidad de almacenamiento de agua del suelo; la capacidad de las raíces de extraerla; la capacidad del tejido vegetal de transmitirla a la parte aérea; y la capacidad de las raíces de explorar nuevos volúmenes de suelo. Por otro lado, la tasa de absorción de agua por las raíces depende de la tasa de transpiración; la longitud radical y la tasa de absorción de agua por unidad de longitud radical; y de la diferencia de potencial agua en el continuo suelo-planta-atmósfera.

A medida que las capas más superficiales del suelo se van agotando, la extracción de agua se produce en capas cada vez más profundas. Este patrón es acentuado por el hecho de que los estratos más superficiales del suelo están explorados por las primeras raíces, con frecuencia muy abundantes respecto a los estratos más profundos. Cuando la absorción es pequeña en superficie, por ser un suelo más seco, las raíces absorben más cantidad de agua a mayor profundidad, donde los niveles de humedad son superiores. Si bien bajo condiciones de buena humedad, la mayor parte del agua es extraída de las partes más superficiales, muchos estudios indican que a medida que el agua se va agotando, una pequeña cantidad de raíces en zonas húmedas más profundas puede proveer cantidades de agua no proporcionales a su número ([Gil 2007](#)).

Por estas razones, otro de los factores que InVEST tiene en cuenta para el cálculo de la provisión de agua final es la profundidad de las raíces. Este parámetro se utiliza para ajustar mejor las pérdidas por evapotranspiración: más del 95 % del agua extraída por la vegetación es transferida a la atmósfera por este fenómeno y el sistema de raíces es uno de los factores más importantes para determinar la cantidad de agua que llega a la planta y la que se pierde posteriormente a través de la evapotranspiración.

Los datos sobre profundidad de raíces han sido obtenidos de la Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v 1.2 ([Harmonized World Soil Database](#)) de la FAO. La información de esta base de datos ha sido generada a escala mundial por lo que tiene menor resolución que la información de precipitación y evapotranspiración. Según la tabla de datos vinculada a la zona de actuación se observa según la escala de grises que es una zona con datos homogéneos en este sentido (el color claro corresponde al rango de profundidad de 0-80 mm), salvo pequeñas zonas que se muestran más oscuras donde la profundidad de raíces es mayor (> 80 mm).

Fracción de agua disponible para las plantas

Los suelos contienen diferente cantidad de agua dependiendo de su textura y estructura. Después de un evento de lluvia, el suelo llega a su punto de saturación de agua y comienza un rápido movimiento descendente de una parte del agua a través del suelo debido a la fuerza de gravedad (drenaje). Durante el proceso de drenaje, la humedad del suelo disminuye de forma continua. Después de un tiempo, el drenaje se reduce hasta el punto de ser prácticamente insignificante. La cantidad de humedad en el suelo en este momento está en su punto máximo y es lo que se denomina capacidad de campo (CC).

El límite inferior de humedad en el suelo se denomina punto de marchitamiento permanente (PMP), definido como la cantidad de humedad en el suelo a partir de la cual las plantas ya no tienen capacidad para absorber agua del suelo con el consecuente marchitamiento y muerte de las mismas. La cantidad total de agua disponible para la planta (ADP) es la diferencia entre la CC y el PMP, y expresada como porcentaje en volumen (volumen de agua/volumen de muestra de suelo) se llama fracción de agua disponible para las plantas.

El programa InVEST tiene en cuenta tanto la profundidad de raíces como la ADP: la ADP se multiplica por la profundidad de la zona de las raíces y se obtiene la capacidad de retención de agua disponible (CRAD), parámetro que se tiene en cuenta para el cálculo de la evapotranspiración real.

Los datos de la fracción de agua disponible para las plantas han sido obtenidos del Mapa Digital del Suelo del Mundo ([Digital Soil Map of the World](#)) de la FAO –UNESCO.

Usos del suelo

Los usos del suelo para este estudio también son de gran importancia ya que un suelo dedicado a cultivo o a bosques, o en última instancia a suelo urbano, no tienen la misma capacidad de funcionamiento en cuanto a retención de agua y profundidad de las raíces. El cálculo de profundidad de raíces y de fracción de agua disponible se realiza de forma distinta si el uso del suelo es bosque, matorral, pastos, cultivos o áreas construidas.

Para este estudio se ha utilizado el mapa de usos del suelo de la Comunidad de Madrid de 2012.

Cuencas

Por último, para el correcto funcionamiento del modelo se necesita la capa de cuencas hidrológicas de la Comunidad de Madrid, que se ha presentado en la **Figura 3** del artículo.

Valores biofísicos

lucode	LULC_desc	LULC_veg	root_depth	Kc
11	Asociación	0	0	0
12	Mosaico regular	1	0	0
13	Mosaco irregular	1	0	0
100	Cobertura artificial	0	0	0
200	Cultivos	1	60	1
300	Pastizal	1	38	1
310	Arbolado forestal	1	109	1
320	Matorral	1	66	1
330	Terrenos sin vegetación	0	0	0
500	Coberturas de agua	0	0	0
701	Dehesa	1	100	1
702	Olivar-viñedo	1	90	1
703	Asentamiento agrícola residencial	0	0	0
704	Huerta	1	60	1
810	Urbano mixto	0	0	0
820	Industrial	0	0	0
830	Primario	0	0	0
840	Terciario	0	0	0
850	Equipamiento	0	0	0
870	Infraestructuras	0	0	0

Parámetro Z

El parámetro Z utilizado ha sido 1.

Referencias

- Gil, R.C. 2007. El ambiente del suelo y el crecimiento de las raíces. *Publicación Miscelánea 107* (Información Técnica de Trigo y otros Cultivos de Invierno, Campaña 2007): 12–16.
- González-García, A., Palomo, I., González, J.A., López, C.A., Montes, C. 2020. Quantifying spatial supply-demand mismatches in ecosystem services provides insights for land-use planning. *Land Use Policy* 94: 104493.
- MAPAMA 2016. Sistema Integrado de Información del agua. Recursos Hídricos. Variables climáticas [Conjunto de datos]. Recuperado de: <https://servicio.mapama.gob.es/sia/visualizacion/lda/recursos/climatologia.jsp> [Consultado 20 de enero de 2020].