

MODELIZACIÓN DEL PRECIO DEL AGUA AJUSTADO AL CONSUMO REAL MEDIANTE UNA CURVA SIGMOIDE: UNA PROPUESTA PARA ESPAÑA

J. FORTUNATO HONTORIA

jhontoria6@alumno.uned.es

Universidad Nacional de Educación a Distancia. Escuela de Doctorado

Recibido (08/07/2025)

Revisado (04/11/2025)

Aceptado (05/11/2025)

RESUMEN: La adecuada determinación del precio de facturación del agua es esencial para la sostenibilidad. Los esquemas de facturación suelen basarse en bloques de precio (escalones), para los que se fija una tarifa. En este contexto surge el problema de definir una facturación ajustada en función de la parte correspondiente a la sección variable del precio, que es la dependiente del consumo, porque es ese consumo en el que contribuye a la elasticidad de la demanda. En este trabajo se propone una modelización del precio del agua ajustado al consumo real mediante una curva sigmoide con algoritmo de Levenberg-Marquardt. Esta función se contrasta con datos municipales de tarifas de agua en España, por tratarse de un escenario idóneo con una multitud de tarifas y escalones establecidos en cada municipio. Los resultados muestran que la aplicación de esta función para determinar el precio a facturar en función de consumos reales tiene relevantes implicaciones, ya que permite un mejor ajuste del precio en función del consumo, sin suponer un menoscabo para los ingresos por facturación de agua, ni generar alteraciones significativas para el consumidor. Además, la propuesta de facturación que se realiza permitiría al usuario, por una parte, un mejor conocimiento del consumo vía importe y, por otra parte, posibilitaría que la administración realizara un mejor pronóstico, sobre todo si se incorporara como variable en contadores inteligentes. Asimismo, la propuesta podría suponer un incentivo al ahorro de agua, porque elimina la percepción de tarifa plana implícita en la tarificación por bloques.

Palabras Clave: Curva sigmoide, Precio, Tarifa por Bloques, Algoritmo de Levenberg-Marquardt.

ABSTRACT: Properly determining the price of water billing is essential for sustainability. Billing schemes are usually based on price blocks (tiers), for which a rate is set. In this context, the problem arises of defining adjusted billing based on the variable part of the price, which depends on consumption, because it is this consumption that contributes to the elasticity of demand. This paper proposes a model for water pricing adjusted to actual consumption using a sigmoid curve with a Levenberg-Marquardt algorithm. This function is compared with municipal water tariff data in Spain, as this is an ideal scenario with a multitude of tariffs and tiers established in each municipality. The results show that the application of this function to determine the price to be charged based on actual consumption has significant implications, as it allows for a better adjustment of the price based on consumption, without undermining water billing revenues or generating significant changes for the consumer. Furthermore, the billing proposal would allow users to better understand their consumption in terms of cost and would enable the administration to make more accurate forecasts, especially if it were incorporated as a variable in smart meters. The proposal could also encourage water saving, as it eliminates the perception of a flat rate implicit in block pricing.

Keywords: Sigmoid curve, Price, Block rate, Levenberg-Marquardt algorithm.

1. Introducción

La mayoría de los esquemas de facturación del agua están basados en niveles de precio (escalones), con el propósito de definir una facturación ajustada en función de la parte correspondiente a la sección variable del precio, que es la dependiente del consumo. Esto ha generado un debate sobre la utilidad de la tarificación por bloques para la gestión sostenible del agua (Ma y otros, 2018). Ello sin duda no contribuye a modificar el comportamiento, es decir, la elasticidad de la demanda, ya que, una vez alcanzado un nivel, el precio no genera incentivos por limitar el consumo. Algunos autores apuntan la necesidad de analizar en profundidad el efecto de las rigideces y sostenibilidad de la demanda del agua con el establecimiento de una adecuada tarificación (Ben Zaied y otros, 2022). Es más, cuando hay más de tres escalones, los niveles intermedios son los que los usuarios toman como referencia en sus facturas, lo que puede ser percibido como el precio del agua para todo el volumen a consumir (los consumidores no responden a precios marginales como dice la teoría sino a precios medios). Es por ello, por lo que la comprensión de la demanda del agua determina las posibles reestructuraciones de las tarifas (Nagpal y otros, 2020), cuestionando el modelo en que se ha de ajustar (Klassert y otros, 2018).

Por otro lado, se ha de considerar que el nivel de consumo en períodos pluviales no supone una gran preocupación, ya que no está cambiando el precio por unidad consumida en la mayoría de los casos. Sin embargo, en períodos de escasez se contempla la necesidad de revisar el precio del agua teniendo en cuenta la disponibilidad de este recurso (Pinto, de Carvalho, y Marques, 2021), debatiendo la funcionalidad de la tarificación para evitar malgasto y pérdidas de agua (Deyà-Tortella y otros, 2016, 2017) o para incentivar el ahorro (Razumova y otros 2016; Sahin y otros, 2017). Por lo tanto, y dada la dificultad administrativa de alterar el precio para reducir el consumo, en períodos de sequía se suele recurrir al corte parcial o total del suministro. Esto también es debido a la inelasticidad del consumo del agua respecto del precio. Por otro lado, se han intentado diseñar modelos más dinámicos de facturación del agua basados en bloques de tarifas (Babamiri y otros, 2020).

La heterogeneidad de la tarificación del agua en España se debe a la pluralidad de agentes públicos con potestad para establecer las tarifas (Barberan et al., 2022; Salido, 2024; García-Valiñas, & Arbués, 2021). En este sentido, el establecimiento de las tarifas recae sobre cada municipio, que establece diferentes bloques, independientemente de que la facturación se realice directamente o a través de una empresa comercializadora. Para la contextualización de la aplicación de la propuesta que se realiza en este trabajo, es necesario considerar que en España existen más de 8.000 municipios (INE, 2025). En la gestión municipal del agua en entornos tarifarios muy heterogéneos de escalones, como es el caso de España, no conocemos propuestas de modelización matemática del precio facturable del agua mediante una función continua.

Todas estas circunstancias motivan la dificultad de adaptar el precio del agua con los actuales modelos basados en escalones y, por ello, en este trabajo se propone un modelo basado en una curva continua. La propuesta evita tener que modificar los precios administrativamente creando o cambiando niveles, ya que mayores consumos implican mayor precio directamente, sin necesidad de esperar a que el escalón de precio al que se factura sea dependiente del nivel de consumo. Por otro lado, cada unidad consumida (metro cúbico) en orden de consumo, cuesta lo mismo a todos los usuarios. Es decir, el precio fijado para cualquier unidad consumida es el mismo para todos los consumidores. Sin embargo, el precio de la segunda unidad para todos es superior al primero y así sucesivamente. Este esquema es más preciso porque a medida que aumenta el consumo aumenta el precio unitario en igual medida, no dependiendo del bloque en que se encuentre dicho volumen de consumo, lo que desincentiva el malgasto de agua, con el consecuente efecto sobre la sostenibilidad del caudal a ofrecer. Una consecuencia esperada en el medio y largo plazo es el ajuste del precio a la baja, al mejorar el aseguramiento del abastecimiento del agua.

Este esquema, por sí mismo, no cambia drásticamente la elasticidad del consumo respecto del precio, pero en la medida que existan sistemas automáticos de conteo (los denominados “contadores inteligentes”) conectados a aplicaciones de usuario, se puede incluir la curva de precio en la aplicación y emitir ciertas notificaciones a modo de alicientes (nudges) que permitan a los usuarios modificar su comportamiento, que

en el caso de algunos de los sistemas demandantes de agua, como por ejemplo un riego automatizado, se puede realizar de forma sencilla.

Por otro lado, administrativamente se facilita el cambio efectivo de la tasa, si en los correspondientes acuerdos municipales* se establecen los parámetros de la curva de manera dinámica, haciéndolos depender de los factores atmosféricos reales, como por ejemplo la pluviometría u otros. Además, nuestra propuesta de modelo permitiría observar patrones de comportamiento consumo-precio, que sirven para realizar predicciones que pueden tener importantes implicaciones económico-sociales.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se resume la literatura relevante, con especial énfasis en la que hace referencia a gestión del agua y sus implicaciones para la sostenibilidad, al precio como una herramienta de dicha gestión sostenible y a la utilización de curvas sigmoides para la facturación. La sección 3 se introduce de forma teórica la propuesta que se hace en este trabajo y la sección 4 la metodología para llevar dicha propuesta a la práctica. La propuesta se contrasta mediante una aplicación práctica en la sección 5 y, finalmente, la sección 6 contiene las principales conclusiones del estudio.

1. Revisión de la literatura

1.1. Gestión del agua y sostenibilidad

La gestión sostenible del agua, como recurso escaso e irremplazable es vital por su impacto en la sociedad, afectando al mantenimiento de los recursos naturales, a la salud o al desarrollo. La escasez de agua unida a su creciente consumo captó la atención de las agendas nacionales hace décadas (Inman, & Jeffrey, 2006), constituyéndose, asimismo, un tema de interés en el ámbito académico (de Sousa, & Dias Fouto, 2024). Es por ello, que el agua, como recurso escaso a gestionar, está vinculada a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). De forma directa, el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), está orientado a conseguir la gestión sostenible del agua para todos, intentado garantizar la disponibilidad del agua y el acceso al agua limpia (Naciones Unidas, 2015a).

Indirectamente, la gestión sostenible del agua también afecta a otros ODS. En el ámbito de la salud, el ODS 3 (Salud y bienestar) está vinculado a la calidad del agua, ya que ésta determina las condiciones higiénico-sanitarias y es crucial para la prevención de enfermedades (Naciones Unidas, 2015b). También afecta a un conjunto de ODS relativos al desarrollo económico y de las sociedades, como el ODS 2 (Hambre cero) (Naciones Unidas, 2015c) con el agua como elemento esencial para la producción de alimentos; ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) (Naciones Unidas, 2015d) por el relevante papel que juega el agua en el mantenimiento de las infraestructuras y la habitabilidad de los núcleos de población; y ODS 12 (Producción y consumos responsables) (Naciones Unidas, 2015e) que implica el mantenimiento de los recursos hídricos en todos los sistemas económicos.

Asimismo, la gestión sostenible del agua es inseparable de los ODS relacionados con el medioambiente, tales como el ODS 13 (Acción por el clima) (Naciones Unidas, 2015f), el ODS 14 (Vida submarina) (Naciones Unidas, 2015g) o el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres) (Naciones Unidas, 2015h), por cuanto la gestión del agua afecta a la conservación de los ecosistemas y entornos naturales.

La gestión sostenible de los recursos hídricos debe planificarse y gestionarse con el fin de preservar la integridad hidrológica, económica y ecológica de la sociedad actual y futura (Ali et al., 2019). Sin políticas de gestión sostenible del agua se compromete el desarrollo y el bienestar de futuras generaciones, por lo que es importante su planificación, uso y conservación. Algunos autores indican que los cambios en el clima, el crecimiento de la población y la urbanización han disparado la demanda del agua, por lo que ésta debe ser manejada de forma efectiva (Liu et al., 2019). Además, el excesivo consumo de agua junto a una inadecuada gestión ha potenciado una inadecuación entre oferta y demanda (Aina et al., 2019). Es por ello por lo que enfoques tradicionales para la gestión del agua se corresponden a estándares de gobernanza que

* En España son las corporaciones municipales quienes fijan la tasa, aunque el suministro lo proporcione una empresa.

no responden a las necesidades actuales (How et al, 2020). La sostenibilidad del agua se entiende como la gestión sostenible del agua en términos de no desperdiciar y fomentar el consumo responsable.

1.2. El precio del agua como herramienta para la gestión sostenible

En los países desarrollados existe la percepción de que el agua es abundante, por lo que los ciudadanos no suelen considerar los riesgos de un desabastecimiento hídrico, lo que los lleva a una falta de control de su consumo (Lucas, & Cordey, 2019). A nivel académico se ha encontrado que el precio del agua es una dimensión manejada en la literatura como una categoría social utilizada para motivar el ahorro de agua (de Sous, & Dias Fouto, 2024), pero la inelasticidad de los precios de la demanda de agua causa que el instrumento resulte inefectivo para reducir el consumo. Si la respuesta al precio no es lineal, entonces es necesario superar un umbral de precio para lograr disminuciones sustanciales en la demanda (Katz et al., 2016). Estos hechos se dan por varias razones, primero, porque no existen sustitutos idóneos para los diferentes usos del agua y, segundo, porque la proporción que su consumo supone en el gasto total de los hogares es pequeña respecto a otros consumos y gastos habituales (Echeverría, 2020). A pesar de ello, algunos autores matizan que la demanda doméstica del agua es inelástica frente a subidas de su precio para usos esenciales (como beber o cocinar), pero no para otros usos no esenciales (como lavado de coches o paisajismo) (Reynaud, & Romano, 2018). Estas circunstancias, unidas al hecho de que una subida relevante del precio del agua suele considerarse incorrecto desde un punto de vista político (Rodríguez-Sánchez et al., 2018), suponen una restricción del mercado del agua, incapaz de cubrir costes necesarios para el mantenimiento de infraestructuras. Incluso en sistemas modernos de gestión de redes hidráulicas se ha demostrado que ignorar la baja elasticidad de la demanda al precio del agua lleva a sobreestimar los ingresos por facturación, dificultando la tarificación para su gestión sostenible (Lee et al., 2021).

En países desarrollados se estima que los umbrales mínimos de consumo de agua doméstica son superiores al 60% del consumo medio de los hogares, por lo que todavía existe espacio para una gestión más eficiente que reduzca el consumo (García-Valiñas, & Suárez-Fernández, 2022). Hace ya más de una década que se consideró que nos enfrentamos a tarifas bajas para gestionar un bien escaso como el agua (Randolph, & Troy, 2008), lo que hace que el precio no refleje ni su valor ni su escasez. En países más expuestos al desabastecimiento, las tarifas demasiado bajas y las bajas tasas de recuperación tarifaria ponen en peligro la sostenibilidad financiera de los sistemas de abastecimiento, agudizando el problema (Bano et al., 2022). Existen propuestas para mejorar la eficiencia en la planificación de tarifas futuras que alcancen objetivos de sostenibilidad en el suministro, como realizar aumentos más frecuentes, pero más moderados de las mismas, como forma de encontrar respuesta en la parte menos inelástica de la curva de demanda-precio (Lee et al., 2021).

En el marco de la gestión sostenible del agua, el precio tiene una doble función. Por un lado, se ha utilizado para intentar reducir directamente el consumo, vía gestión de la demanda a pesar de la inelasticidad; por otro lado, de forma indirecta para reducir el consumo, mediante la de concienciación del coste del agua y de su escasez. Este segundo enfoque considera que se puede reducir el consumo de agua si se incrementa la información que se da en las facturas sobre el precio marginal (Binet et al, 2014). Se constata que la literatura académica ha investigado este enfoque del precio como herramienta de reducción del consumo vía concienciación. Por ejemplo, Beal et al. (2013) hallaron que la inclusión de más información en la factura del agua mejoraba la percepción del consumo, favoreciendo una mejor gestión por parte de los usuarios. En el caso de las tarifas por bloques crecientes, se ha encontrado que la percepción errónea de los consumidores sobre el precio marginal de su consumo puede llevarlos a guiarse por el volumen total del gasto en factura (basada en consumos anteriores), no permitiendo al consumidor una adecuada gestión de su consumo real (García-Valiñas et al., 2021).

Más allá de la información en facturas reales, se ha demostrado la utilidad del precio como herramienta de concienciación, incluso cuando se informa en servicios de precio fijo. En este sentido, Lucas & Cordey (2019) realizaron un experimento consistente en informar a dos grupos de usuarios de una instalación pública, dándoles dos precios diferentes del coste por litro de agua consumida, aunque los usuarios de

ambos grupos pagaban el mismo importe de entrada a la instalación. Los autores encontraron que el grupo al que se informó del mayor precio por litro se concienció del coste del agua, trasladándolo a su comportamiento, mediante una reducción del consumo frente al grupo informado con menor precio. Además, clientes con baja conciencia sobre la escasez de agua no suelen adoptar comportamientos de consumo responsables, ni invierten en tecnología para el ahorro, lo que hace que las tarifas de agua sean aún más determinantes para influir en su nivel de consumo (AlHamad et al., 2023). Por ello, llevar a cabo reformas en la facturación que permitan potenciar comportamientos de conservación se encuadran en el marco de la gestión sostenible del agua.

1.3. Facturación del agua mediante curvas sigmoides

Algunos académicos han analizado el papel del precio del agua para gestionar la demanda mediante la estimación de la inelasticidad del precio o mediante el efecto que la escasez de información sobre tarifas causa en los consumos (García-Valiñas, & Suárez-Fernández, 2022). En el contexto actual de sostenibilidad, el diseño de tarifas lleva a considerar la recuperación del coste y su uso inteligente (Macchiaroli, Dolores, & De Mare (2023). Por ejemplo, se han diseñado descriptores de uso sostenible, demostrando que existe una relación entre la estructura tarifaria y los incentivos al ahorro (Pinto, & Marques, 2016).

En el caso de España, la facturación en la mayoría de los municipios se apoya en tarifas organizadas mediante bloques o escalones[†] (véanse Barberan et al., 2022; Salido, 2024; García-Valiñas, & Arbués, 2021, entre otros). Esto hace que incentivar el ahorro sea difícil, ya que el consumidor no tiene incentivo para consumir menos, porque el precio se aplica a todo el bloque y el cambio marginal no se traduce en un ahorro significativo e inmediato. Esta estructura no favorece el ajuste del comportamiento del consumidor en función del precio (no afecta a la elasticidad-precio de la demanda), puesto que modifica la demanda de forma muy débil ante cambios del precio (Echeverría, 2020). Sin embargo, algunas ciudades que aplican tarifas de tipo creciente por volumen han encontrado que los consumidores responden con mayor intensidad ante los cambios tarifarios (Maldonado-Devis, & Almenar-Llongo 2021). Esto parece indicar que existe un recorrido en el sistema de facturación que permitiría mejoras, como las posibilidades que ofrecen algunas funciones (las sigmoides) para la realización de cálculos más precisos.

La gestión de las tarifas del agua se ha convertido en una necesidad cuando se trata de la sostenibilidad del agua (Lowe et al., 2014). A nivel empírico se ha demostrado que las curvas sigmoides permiten representar de forma más realista el comportamiento de procesos naturales, como el crecimiento de especies o la concentración de nutrientes, o las necesidades de agua en el crecimiento vegetal, mostrando puntos de inflexión y fases diferenciadoras, con ajustes optimizados mediante algoritmos como el de Levenberg-Marquardt (López-Astillero et al., 2020). En el caso de aplicarse una función sigmoide para la facturación continua del agua, en lugar de por tramos, la curva presentaría una zona de activación (con un precio inicial bajo), una zona aproximadamente lineal (los cambios en el precio afectan más al consumo), y una zona de saturación (ya no hay respuesta fuerte a los cambios de precio); de forma similar a los procesos descritos. A nivel empírico, las curvas sigmoides se aplican a la representación realista del comportamiento de procesos naturales. Por ejemplo, en su aplicación a la biología de plagas, se ha encontrado que éstas siguen un patrón matemático de curva sigmoide (baja densidad de presas, densidad media y densidad alta) (Baños et al., 2016). En un proceso similar para la facturación continua del agua mediante una curva sigmoide, se daría un precio bajo continuo en la fase de activación, un precio medio continuo en la fase de aproximación lineal, y un precio alto continuo en la zona de saturación.

[†] Por ejemplo, si hay “n” escalones y el primero es por consumo hasta 10 m³, el segundo de 11 a 20 m³, y así sucesivamente por tramos; pagando X€/m³ hasta 10 m³, Y€/m³ de 11 a 20 m³, y así una tarifa diferente por cada tramo. El problema que se presenta es el tamaño de los escalones, que provoca que una vez que un usuario entre en un escalón, supóngase que consume 12m³ pagará Y€/m³ tanto si consume 12 m³ como si consume 20m³; por lo que es problemático incentivar el ahorro.

En procesos naturales relacionados con el agua también se ha evidenciado la adaptación del comportamiento a una curva sigmoide. Por ejemplo, en modelos empíricos de hidratación de alimentos, se ha demostrado que las curvas sigmoides permiten capturar dinámicas no lineales, como la absorción del agua (Peleg, 2023). También en el crecimiento de la aceituna con una programación de riego deficitario controlado, se observó que el crecimiento de la aceituna sigue una curva sigmoide simple, que en casos de estrés hídrico podría ser una curva de crecimiento de doble sigmoide (Pérez-López et al., 2014). Modelos sigmoides también se han desarrollado con éxito para predecir el comportamiento real de cultivo, ajustando mejor la productividad hídrica vinculada (Ran et al., 2023). A nivel de gestión de cuencas hídricas, se ha propuesto un modelo de función sigmoide temporal para ajustar la variabilidad aparente de la demanda de agua a la variabilidad real, dado que se ha encontrado que la variabilidad de la demanda es un factor aleatorio vinculado al intervalo temporal de medición, de modo que, cuanto mayor es el intervalo, la varianza aparente es menor que la real, provocando una pérdida de información (Ruiz Gómez et al., 2024). En el aprendizaje automático también se han usado curvas sigmoides, como en las puertas de redes LSTM (Long-Short Term Memory), que se usan de forma interna para resolver puertas en un problema de caja negra, lo que ha permitido un diseño que detecta anomalías de forma precisa y adaptable (Boudhaouia, & Wira, 2021). A nivel experimental se ha contrastado que los contadores inteligentes de consumo de agua doméstica admiten clasificaciones de datos básicos con un potencial de información que permiten la mejora en la gestión del agua (Meyer et al., 2021). Sin embargo, los contadores inteligentes utilizados para calcular la variabilidad de la demanda del agua están sometidos a una tecnología que aún es limitada para calcular mediciones continuas con alta resolución espacial y temporal de todo el sistema, por lo que la aplicación conjunta con curvas sigmoides permitiría una medición que maximizaría la información disponible para reducir la incertidumbre (Ruiz Gómez et al., 2024). También se utilizan curvas sigmoides para detección de fugas de agua mediante sensores habilitados con IoT (Internet of the Things) y mediante aprendizaje automático se utiliza como función logística una curva sigmoide como uno de los clasificadores de la variable dependiente a medir, donde las fugas se modelan como emisores que alteran patrones como presión y caudal, permitiendo predecir fugas en tiempo real (Nagaraj et al., 2021).

A pesar de las utilidades de la modelización usando curvas sigmoides, su uso no se ha planteado aún de forma directa como una función explícita para modelar el consumo de agua en función de la facturación, lo que permitiría capturar dinámicas reales de respuesta de los consumidores, aprovechando las ventajas de precisión y detección de anomalías; tal y como se ha hecho con otras aplicaciones de estas curvas a la modelización precisa de procesos relacionados con la gestión del agua.

Los hallazgos de la literatura permiten plantear que la respuesta del consumidor doméstico al precio del agua también podría ser descrita eficazmente mediante funciones sigmoides, reflejando umbrales de reacción, sensibilidad creciente y saturación. Frente al sistema de bloques o escalones tarifarios para la determinación del precio y la facturación, modelos de tarificaciones continuas permitirían disminuir el consumo de metros cúbicos al posibilitar una medición más precisa y detectar pronto anomalías asociadas a pérdidas; pero también permitirían una mayor concienciación del consumidor, que suele reaccionar frente a una mayor información del coste real del agua con un ahorro de consumo de agua. La inelasticidad del agua se podría acotar a la parte de consumo de agua para usos esenciales según lo teorizado (véase Reynaud, & Romano, 2018), mientras que la demanda de agua para otros consumos no esenciales debería tener una reacción favorable al estímulo de ahorro mediante el precio de facturación determinado por una función sigmoide, ya que reflejaría mejor las fases de activación, aproximación lineal y saturación.

2. Propuesta de función sigmoide para la facturación

La modelización mediante funciones sigmoides se ha empleado para realizar previsiones precisas y fiables del consumo de gas (Ravnik y otros, 2021), pero no se ha utilizado para realizar una facturación precisa del agua en función del consumo realizado. Asimismo, utilizando la ecuación de tipo sigmoide (que suele representar los sistemas naturales y artificiales), se ha contrastado que el comportamiento de dicha curva es representativo del comportamiento de la disponibilidad de agua en la mayoría de las cuencas

hidrográficas (Ishak y otros, 2024). Dada su precisión y su capacidad de adaptación a múltiples procesos naturales y artificiales, se justifica la elección de esta curva como base de la propuesta para modelar la facturación continua del precio del agua de acuerdo con su consumo real.

Se ha escogido como modelo una función basada en la curva sigmoidal generalizada. Es una curva continua, creciente entre dos asintotas, ampliamente utilizada para dinámicas en múltiples procesos naturales y artificiales, que no responden a modelos lineales. Según la literatura especializada (véanse, por ejemplo, Modrovits et al. 2021 o Satyanag et al., 2013), las funciones sigmoides permiten capturar con precisión respuestas no lineales, al identificar tres fases características de la evolución de los procesos: una fase inicial de activación con crecimiento lento, una zona intermedia de comportamiento acelerado, que la literatura aproxima localmente a un comportamiento cuasi-lineal, y una fase final de saturación donde el crecimiento se estabiliza. Esta propiedad permite contemplar la curva como una aproximación continua y suavizada a los esquemas tarifarios por bloques, manteniendo la progresividad sin los saltos abruptos de los escalones. Una de las ventajas de su continuidad es que permite un ajuste progresivo de los precios, eliminando el efecto escalón característico de la mayoría de los esquemas tarifarios actuales. Aplicaciones de curvas de crecimiento (curvas sigmoides) se han utilizado para la previsión exitosa de los niveles de aguas subterráneas (Modrovits y otros, 2021; Satyanaga y otros, 2013), por lo que valoramos en esta propuesta su utilidad también para el cálculo del precio del agua. Por otro lado, con los programas informáticos existentes en la actualidad, su introducción no supondría un problema administrativo o logístico para el proceso de cálculo de la facturación, que se puede realizar de forma automática. Habitualmente el sistema software de captura de consumos desde los contadores “llamados inteligentes” lo proporciona el propio fabricante. Se trata de herramientas de software hechas a medida, y no de paquetes estándar. Algunos fabricantes reconocidos por su calidad son Siemens, Honeywell, Zenner o Badge meter. Los datos de consumo se transmiten a la central de gestión mediante una red de comunicaciones (tipo Lora, Wimax, GSM, NB-IoT...). El software recibe y contabiliza el consumo de cada contador de modo que al final del periodo se obtiene el total consumido por al contador. Estos datos se exportan a una hoja de cálculo para incorporarlos al programa de facturación de la empresa o del organismo municipal que emite las facturas. Es sencillo comprobar en la misma hoja de cálculo como calcular el precio a facturar. Se adjunta ejemplo de la facturación por escalones de cinco contadores escogidos al azar y su correspondiente trasposición al nuevo modelo de cálculo (Tabla 1).

Tabla 1 – Ejemplo de bloques y facturación por bloques

Consumo	Bloque1	Bloque2	Bloque3	Bloque4	Facturado
7	7	0	0	0	7
43	30	13	0	0	49,5
27	27	0	0	0	27
7	7	0	0	0	7
52	30	22	0	0	63

En el fichero Excel se genera la fórmula llamada BloqueN:

$=LAMBDA(consumo;n;LET(x;consumo-30*(n-1);IF(x>0;IF(x>30;30;x);0)))$

Esta fórmula recibe dos parámetros, el consumo y el número de bloque, y produce en cada celda de las columnas bloque 1 a bloque 4 los valores de consumo que “caen” en cada escalón. Todos los bloques de consumo son de 30m³. La facturación de cada contador se obtiene multiplicando el consumo en cada bloque por su precio. En el caso estudiado los precios eran respectivamente (Tabla 2):

Tabla 2 – Precios de los bloques

precio 1	1
precio 2	1,5
precio 3	1,85
precio 4	2

El mismo cálculo para el modelo continuo de la curva sigmoidal propuesta y adaptada a los precios de Ituero y Lama se indica a continuación. Los parámetros de la curva (A , K , M , y N) de los que se obtiene el cálculo del precio facturado en cada caso, se explican en las siguientes secciones.

Tabla 3 – Comparativa de facturación

Consumo	Facturado		Diif
	Escalones	Sigmoide	
7	7	6,968	-0,032
43	49,5	49,049	-0,451
27	27	27,621	0,621
7	7	6,968	-0,032
52	63	62,821	-0,179

Se puede ver que las diferencias entre la factura calculada por escalones y la calculada mediante la curva sigmoidal son mínimas (Tabla 3). Ese era uno de los objetivos: minimizar las diferencias entre ambos cálculos para facilitar la adopción del modelo.

Dada la continuidad de la curva, se puede partir del precio para saber el consumo o viceversa, cosa que no es posible con los esquemas basados en bloques tarifarios. Este aspecto resulta de especial interés para los procesos de predicción mencionados anteriormente. En este sentido, la función sigmoidal (1) ha sido aplicada para predecir la cantidad de agua que se consumirá sin tener un conocimiento previo de los datos y usuarios (Boudhaouia y Wira, 2021).

$$\Phi(x) = \frac{k}{1+e^{(M-Nx)}} \quad (1)$$

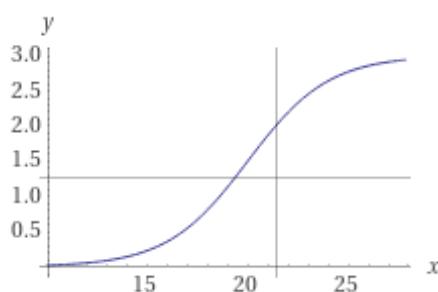
donde

- k representa la asymptota superior, es decir el precio máximo
- M/N es el punto medio de la curva, donde la pendiente es máxima

Se emplea una curva simétrica con el objetivo de que los precios en los niveles bajos reflejen adecuadamente los tramos bonificados o de consumo esencial.

El diagrama de la figura 1 muestra un ejemplo para una curva en la que $k=3$, $m=10$ y $n=0.5$, es decir, el punto de pendiente máxima $m/n = 20$. Los valores del eje de ordenadas representan el precio en euros y los valores del eje de abscisas el consumo.

Figura 1 – Curva sigmoidal



Para calcular la facturación periódica (mensual) de un cliente es preciso calcular el área bajo la curva entre el origen $x=0$ y el consumo total del mes $x=v$. Para ello se ha de calcular la integral de la función. Se aplica el mismo cálculo de áreas en el caso de los escalones, pero consistiendo en sumar áreas rectangulares, siendo un proceso de cálculo más simple.

En el caso de la sigmoide se conoce también su integral (2):

$$g(x) = \frac{k \cdot \ln(e^M + e^{N \cdot x})}{N} \quad (2)$$

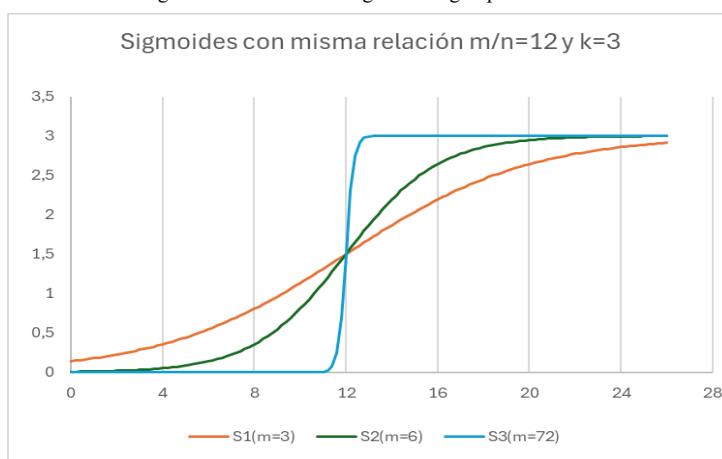
Cabe señalar que la expresión (2) corresponde a la integral definida de la función sigmoide $\Phi(x)$, cuya área bajo la curva entre 0 y el volumen del consumo permite calcular el importe total a facturar.

Esta función se puede calcular de forma automática, a través de cualquier programa o aplicación matemática de las disponibles en numerosas páginas web (ej: Wolfram-Alpha), de forma que, dados los parámetros k , M y N , y el volumen de agua consumido x , se calcularía automáticamente el importe a facturar correspondiente a dicho consumo (3):

$$\text{Importe}(v) = g(v) - g(0) = \frac{k \ln(e^M + e^{N \cdot v})}{N} - \frac{k \ln(e^M + 1)}{N} \quad (3)$$

La Figura 2 presenta varias curvas sigmoides con el mismo valor del parámetro k (nivel asintótico superior), y una misma relación m/n , pero con diferentes valores de m . Dado que m/n determina el valor de x en el que la función alcanza $y = k/2$ (punto medio de la curva), el parámetro m regula la pendiente de la curva en dicha zona, de forma que, a mayor m , mayor es la pendiente en el entorno del punto de inflexión. Así, la Figura 2 permite visualizar cómo la elección del parámetro m afecta al grado de progresividad de la curva tarifaria, lo que es fundamental para su calibración en contextos de políticas de precios de agua.

Figura 2 – Variación de sigmoide según parámetros



En la Figura 2 se observa que valores grandes de m conducen a rangos de crecimiento muy estrechos en el eje de abscisas y variaciones grandes en ese mismo rango. Por el contrario, valores pequeños de m llevan a curvas más planas. Ambos casos extremos no parecen la mejor opción para pasar del esquema de escalones a curva continua en tanto en cuanto desvirtúan la idea inicial de la propuesta. Por el contrario, un valor de $n = 0,5$ parece adecuado.

3. Metodología

3.1. Enfoque general y procedimiento de ajuste tarifario

El trabajo adopta un enfoque cuantitativo basado en la construcción y ajuste de un modelo de tarificación continua de agua mediante una función sigmoide generalizada. Para ello se han implementado las tres etapas concatenadas que se exponen a continuación.

Etapa 1. Reformulación de la estructura tarifaria usual de escalones

Se define una curva continua, simétrica y creciente enfocada a sustituir los esquemas tarifarios por bloques o escalones, aplicados en numerosos municipios españoles. El planteamiento de la curva se orienta al mantenimiento de la progresividad del precio en función del volumen consumido, en lugar de definirla en función de un rango de volumen de consumo para cada escalón tarifario.

Etapa 2. Cálculo de la integral de la función sigmoide

El cálculo de la integral de la función sigmoide definida para la reformulación tarifaria facilita la obtención del importe total de la facturación para cada volumen específico de consumo. Para ello, se parte de una expresión cerrada de la integral de la función, incluyendo una constante de ajuste para simplificar el tratamiento computacional.

Etapa 3. Estimación de parámetros

Para la estimación de los parámetros se utiliza el método de los mínimos cuadrados, aplicándose el algoritmo de Levenberg-Madquardt sobre un conjunto de datos reales de facturación, correspondientes a una muestra de conveniencia. Así, la curva es ajustada sobre los valores posibles de consumo y los importes correspondientes según la tarifa escalonada vigente. Para este proceso, existe una fase previa de depuración de los datos con el fin de eliminar los consumos atípicos y los registros para los que no se dispone de información del consumo. El proceso final es validar el modelo comparando los resultados obtenidos mediante la aplicación de la curva sigmoide definida, con los datos reales de facturación. Esto permite evaluar la diferencia total recaudada y las variaciones individuales respecto de los importes pagados por los usuarios.

3.2. Especificación de la curva y justificación funcional

El siguiente paso es definir un método que permita aproximar la curva a los valores reales de una entidad suministradora, por ejemplo, un ayuntamiento. Cabe destacar que en la mayoría de los ayuntamientos ya se aplica un modelo de precios basado en bloques escalonados. Con idea de poder ajustar el precio y la facturación a la realidad de cada municipio se pueden seguir, a priori, dos caminos:

- Ajustar el nivel de facturación total mensual
- Ajustar la curva de precios

Si se desea que existan diferencias infinitesimales entre la facturación total actual y la que proporciona la nueva propuesta, se puede optar por un ajuste de mínimos cuadrados entre ambas funciones. Se trata de comparar la integral de la función sigmoide con la correspondiente a los tramos escalonados existente. Este método presenta dos limitaciones principales. Por un lado, puede que no exista un método analítico para obtener los parámetros de la función de error a minimizar y debamos recurrir a métodos aproximados. Por otro lado, el cálculo se habrá de hacer sobre un mes concreto y, por tanto, tendrá un sesgo considerable dependiendo de las características del mes escogido. Por ejemplo, si seleccionamos un mes que no es representativo de la media anual, todos los cálculos y resultados obtenidos tendrán el sesgo resultante de la elección. No obstante, si se dispone de un histórico de datos, es posible seleccionar un mes representativo promedio que sirva como base para estos cálculos.

Si se quiere conseguir el ajuste de precios sobre las propias curvas de precios directamente, evitamos esa dependencia del consumo concreto del mes considerado, pero podremos tener una variación considerable dependiendo del valor del consumo medio. En ocasiones, las tablas de precios de los sistemas de escalones disponen de precios para consumos irreales o muy extraños, como por ejemplo ante una gran avería que no se repara pronto. En nuestra revisión de tarifas aplicadas en una muestra relevante de municipios, hemos encontrado inusuales tarifas especiales, utilizadas para este tipo de casos. El uso del método de mínimos cuadrados sigue presentando dificultades en términos de cálculo para esta alternativa.

Ante esta tesitura optamos por un método mixto. Calculamos el ajuste de parámetros sobre la facturación de los usuarios, pero no sobre la facturación real, sino sobre todos los casos de facturación unitarios. Es decir, los puntos x_i e y_i necesarios para calcular la curva corresponden a todos los valores enteros de consumo posible en el rango $X_i \in [1, 120]$ (en m³), de acuerdo con los límites establecidos por el esquema

de bloques tarifarios. Cada valor x_i se asocia a un valor y_i que representa el valor total facturado para alcanzar dicho consumo, es decir, corresponde a todas las posibles unidades de consumo (1m³, 2m³, etc.) alcanzables dentro del esquema de precios y la facturación total por llegar a dichos consumos. De este modo, garantizamos que, con independencia del volumen consumido, si está dentro de los límites normales de los escalones de precio, tendrá un punto de la curva ajustado con su precio facturable.

Para realizar este ajuste necesitaremos todos los precios a facturar por todos los volúmenes de consumo alcanzados, según la tabla de niveles existente y aproximar una curva que no es otra que la integral de la función sigmoidal. Por razones de flexibilidad y simplicidad, el término constante correspondiente a $g(0)$ se denomina A y se incluye como un parámetro adicional a emplear. El coste de cada volumen alcanzado es, por tanto:

$$g(x) = \frac{k \cdot \ln(e^M + e^{N \cdot x})}{N} + A \quad (4)$$

La función definida en la ecuación (4) debe ser ajustada al conjunto de datos experimentales (x_i, y_i) mediante el método de mínimos cuadrados, lo que implica la minimización de la función objetivo expresada en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon(x) = \sum_1^n [y_i - \left(\frac{k \cdot \ln(e^M + e^{N \cdot x})}{N} + A \right)]^2 \quad (5)$$

Obteniendo las derivadas parciales de la función ε e igualándolas a cero, podemos resolver el sistema de ecuaciones resultante:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial k} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial M} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial N} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial A} = 0 \quad (6)$$

La resolución analítica de este sistema no es trivial dada la complejidad de la función de error. Tampoco se puede linealizar por lo que se utiliza un método numérico para su resolución, el denominado algoritmo de Levenberg-Marquardt. Este algoritmo es una técnica iterativa que localiza un mínimo local de una función multivariante que se expresa como la suma de cuadrados de varias funciones no lineales de valor real, siendo una técnica estándar para problemas de mínimos cuadrados no lineales, ampliamente adoptada en múltiples disciplinas para tratar aplicaciones de ajuste de datos (Sapna, y otros, 2012). Este algoritmo, implementado en librerías matemáticas de varios lenguajes de programación realiza una aproximación por gradiente. Se ha aplicado a modelizaciones mediante curvas continuas, como en redes neuronales, debido a su eficiencia (Franco y Steiner, 2017; Rodriguez-Toro y otros, 2011). También se ha utilizado para determinar el flujo de potencia irresoluble mediante su modelización como un problema de optimización restringida en sistemas eléctricos (Barboza y otros, 2010), así como para resolver problemas de distribución de agua en tiempo real (Abushammal y Bawazir, 2017). El algoritmo de Levenberg-Marquardt, se considera uno de los más eficientes en términos de velocidad y tasa de éxito entre los métodos basados en gradientes (Piotrowski y Napiorkowski, 2011). No obstante, para comprobar la bondad de los datos, se realizará una comprobación en cada caso particular en la sección siguiente.

4. Aplicación práctica

Dado que se dispone de datos reales de facturación de un municipio,[‡] se procede a aplicar sobre éste el procedimiento de cálculo descrito con anterioridad.

El número inicial de registros es 869 y el período de pago es trimestral. Dado que también la medida es trimestral y los niveles o bloques de consumo, no se hace ninguna normalización de los mismos (necesaria para pasar a medidas mensuales, aun manteniendo la facturación por trimestre).

Los bloques de consumo van hasta 30 m³ el primero y en incrementos consecutivos de 30 para los siguientes. Los precios no siguen linealidad, sino que empiezan en 1€ para el primer bloque, y posteriormente los bloques son de 1,5€, 1,85€ y 2€. La ecuación (7) representa esta información:

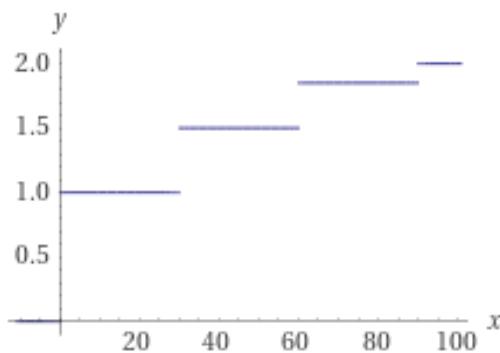
[‡] Los datos recibidos (municipio de Ituero y Lama) constan de una hoja Excel con datos trimestrales de consumo. Los datos están anónimizados, de modo que no hay modo alguno de obtener de ellos datos personales o de los contadores que los produjeron. Nuestro único objetivo al utilizar estos datos es que sirvan de ejemplo ilustrativo en este estudio, sin posibilidad de cesión.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq x < 30 \\ 1.5 & \text{si } 30 \leq x < 60 \\ 1.85 & \text{si } 60 \leq x < 90 \\ 2 & \text{si } 90 \leq x < 120 \end{cases} \quad (7)$$

En cuanto al número de bloques tarifarios considerados en este estudio, se ha optado por un esquema formado por cuatro tramos, cada uno de ellos de 30 m³, dado que es el diseño vigente actualmente en el municipio analizado. Esta configuración además coincide con el esquema habitual aplicado en muchos municipios españoles, según se ha constatado en el trabajo de campo, en el que se ha realizado un análisis exhaustivo de las tarifas aplicadas en una muestra de 1.429 municipios del total poblacional (8.131 municipios existentes en España). Esta estructura modular facilita el ajuste del modelo, su interpretación y su replicabilidad, permitiendo representar un sistema progresivo basado en los escalones existentes, pero manteniendo el sistema de facturación simple.

La representación de la función nos proporciona el siguiente diagrama (Figura 3):

Figura 3 – Esquema de precios de Ituero y Lama



Para proceder al cálculo estadístico de los parámetros de la función de precio, debemos analizar y depurar los registros disponibles. El primer paso es eliminar los costes que no tienen relación con el consumo de agua, como son los costes debidos a los servicios o los impuestos (IVA). Con esto obtenemos los datos de consumo del período y el precio para cada registro (contador), que organizamos como se presenta en la Tabla 4, para el consumo en m³.

Tabla 4 – Registro de consumos y precios

Desv. Estándar	18,324						
Varianza	336,300						
Media	15,134	633	99	21	5	10733,45	
Id	Consumo	Bloque1	Bloque2	Bloque3	Bloque4	Facturado	
1	2	2	0	0	0	2	
2	1	1	0	0	0	1	
3	8	8	0	0	0	8	

En la figura anterior se observan los datos del identificador anonimizado (Id), consumo (Consumo), la facturación en cada bloque (Bloque_j, j = 1, ..., 5), y la facturación total de cada registro (Facturado). Sobre la cabecera se indican algunos datos estadísticos (media, varianza y desviación típica) y la facturación total de Ituero y Lama.

De un primer análisis, se observa que hay varios registros que presentan un consumo superior a la suma de los cuatro bloques, esto es 30 x 5 = 120 m³. Eliminamos estos registros (menos del 1% del total de registros) que, sin embargo, afectan de forma importante a la media que pasaría de 11,019 m³ a algo más de 17 m³,

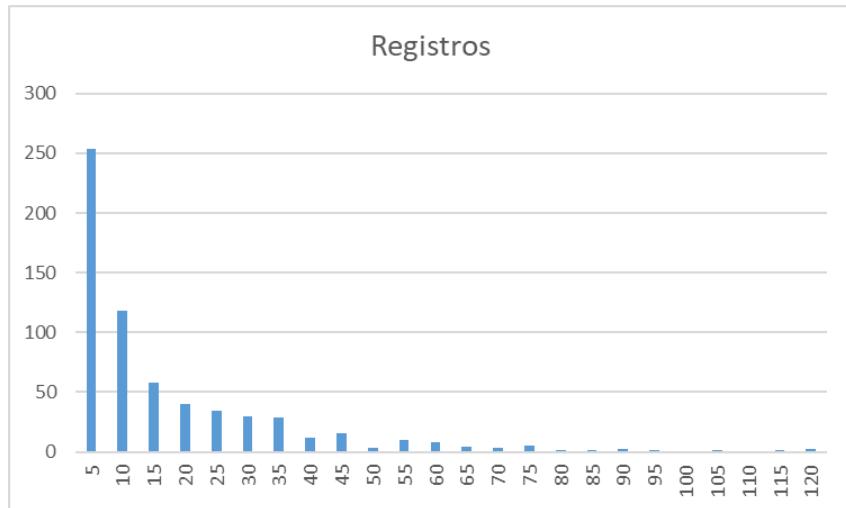
en el caso de incluirlos. Asimismo, eliminamos los registros con consumo 0. No tenemos información sobre ellos, pero posiblemente correspondan a segundas viviendas y, aunque en este caso son numerosos (228), representan una situación que no tiene impacto en el cálculo del precio por consumo. Para la comparativa, el tamaño de la muestra de datos corresponde a 633 registros con una media de consumo de 15,134 m³, distribuidos por bloques de la forma en que se recoge en la Tabla 5.

Tabla 5 – Bloques de precio

Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
633	99	21	5

Como se requiere consumir entre 1 y 29 m³ para pagar el precio del primer escalón, todos los registros disponibles están en el bloque 1 y el número de registros es necesariamente menor conforme se va avanzando entre bloques. Un histograma agrupando registros en tramos de 5 m³, proporciona la Figura 4, que corresponde a una distribución discreta, de tipo Poisson, por ejemplo, pero lejos de la normalidad que se debe distribuir simétricamente respecto de la media.

Figura 4 – Histograma de consumo



El elevado número de registros con bajo consumo indica que, posiblemente, se corresponde con una población con un alto número de segundas viviendas en las que la estancia anual es limitada en el período considerado.

Si fijamos como objetivo que la cantidad total recaudada por el total de contadores de la entidad sea igual a la de la tarifa por niveles vigente y que la diferencia entre lo que pagaría cada vecino (registro) con el esquema nuevo respecto a lo que paga usando la tarifa de niveles sea mínima, debemos calcular los parámetros de la curva. Para ello, construimos los correspondientes valores de factura total por cada uno de los niveles alcanzados. Dado que hay cuatro niveles de 30 m³ cada uno tendremos que realizar una tabla con 120 pares de valores, que corresponde a los valores a ajustar. La Tabla 6 recoge la cabecera con los primeros y últimos valores, representando el subrayado en amarillo el valor en m³ del consumo medio. La columna escalones representa el coste de la factura por el concepto variable del consumo de agua para cada nivel de consumo.

Tabla 6 -. Consumo y facturación por escalones

Consumo	Escalones	Consumo	Escalones
1	1,00		
2	2,00		
3	3,00		
4	4,00		
5	5,00		
6	6,00		
7	7,00		
8	8,00		
9	9,00		
10	10,00	114	178,50
11	11,00	115	180,50
12	12,00	116	182,50
13	13,00	117	184,50
14	14,00	118	186,50
15	15,00	119	188,50
16	16,00	120	190,50

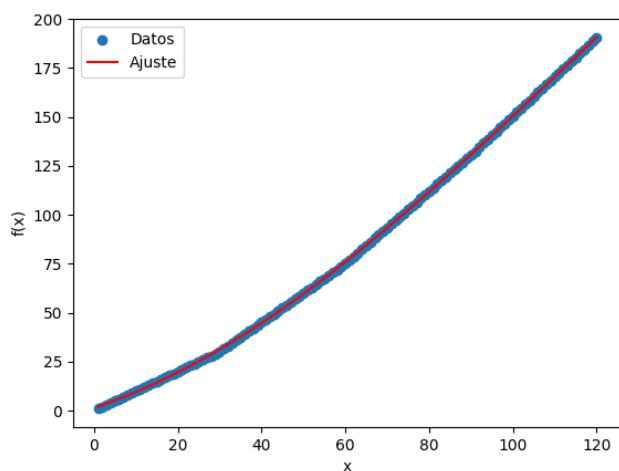
Usando la librería matemática de Python `scipy` que contiene la función `curve_fit` se pueden obtener los parámetros K, M, N y A buscados. En el caso analizado se obtienen los valores que se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 – Parámetros de la función sigmoide

A	K	M	N
-65,494	2,117	0,612	0,0331

La Figura 5 muestra una representación de la curva y los datos originales, de la que se deduce que el proceso llevado a cabo ha producido un buen ajuste.

Figura 5 – Ajuste por el algoritmo de Levenberg-Marquardt



Para comprobar con precisión como cambiaría la facturación de Ituero y Lama en el mes analizado si se hubiera usado la curva continua de precios en lugar de usar escalones hacemos una tabla con los precios

para ambos métodos, las diferencias que pagaría cada usuario y el total sería la diferencia facturada por el ayuntamiento. La Tabla 8 muestra los datos sobre el total de registros utilizados.

Tabla 8 – Descriptivos de la población de registros analizada

Número de registros	633
Volumen mínimo consumido (m ³)	1
Volumen máximo consumido (m ³)	120
Volumen medio consumido (m ³)	15,134
Desviación típica	18,338

Con los datos obtenidos, la Tabla 9 muestra la comparativa entre los datos con el método de precios por escalón y el método mediante el ajuste de la función sigmoide:

Tabla 9 – Comparativa de ambos métodos

	Escalones	Sigmoide	Diff (S-E)	Diff % (E)
Precio medio (€)	16,956	17,215	0,258	1,52%
Precio del volumen medio (€)	15,134	14,527	-0,607	-4,01%
Desviación típica	24,418	24,285	-0,133	-0,54%
Facturación total (€)	10733,450	10896,805	163,355	1,52%

La diferencia en recaudación para el ayuntamiento es de 163,35€ con el nuevo esquema de precios definido por la función sigmoide, siendo la diferencia máxima en la factura en términos absolutos 1,3€ y en términos relativos el 4,91%. En consecuencia, creemos que se cumplen los objetivos tanto en términos recaudatorios como en diferencias en pagos por consumo de agua entre ambos sistemas.§

5. Conclusiones

Una amplia mayoría de los modelos de tarifa de agua en los municipios españoles se basa en esquemas definidos por escalones. Estos no generan incentivos para el cambio del comportamiento de los consumidores que afecten a la elasticidad precio del agua, ni permiten establecer mecanismos automáticos o semiautomáticos predictivos del consumo vía precio. Esto es debido a que, una vez alcanzado un escalón, el incentivo es no moverse del mismo ya que se mantiene el mismo precio a lo largo de todo el bloque.

Un modelo de curva continua, como el propuesto en este artículo, elimina este problema y evita además otros efectos vinculados a los saltos en los esquemas de tarifas de agua escalonados, como el permitir al usuario tomar conciencia del coste marginal de su consumo, o el causar un menor impacto ante modificaciones de las tarifas, o no permitir identificar picos inusuales de facturación que podrían estar indicando pérdidas de agua por roturas del sistema, o mostrar una varianza aparente menor de la real, impidiendo así hacer una toma de riesgos precisa en términos de ingresos por facturación. En este trabajo se ha escogido la curva sigmoide porque está presente en muchos procesos naturales en los que existe un nivel de activación, una zona más o menos lineal y una zona de saturación.

Este modelo responde a la idea de tarificación para el caso del agua, en tanto en cuanto que hay un nivel de consumo mínimo que se estima necesario en cualquier hogar, después una zona media donde el importe total depende sobre todo del volumen de consumo y, finalmente, se limita el precio a un máximo en los consumos altos.

Aunque en el presente estudio no se analiza la viabilidad institucional del modelo, teniendo en cuenta la literatura previa, es razonable adelantar la existencia de reticencias para el cambio al modelo propuesto, tanto por parte de los usuarios como de la administración, debido a que es un enfoque novedoso que supone

§ Si bien se presentan únicamente los datos descriptivos, los datos individuales para la población de registros analizada están disponibles para los lectores interesados.

una ruptura con el esquema tradicional de tarificación por bloques, ampliamente asumido. Se debe tener en cuenta que si las diferencias de importe total cobrado (recaudación de la entidad) por parte de la administración y precio pagado por cada usuario por su consumo son relevantes, se debería optar por aproximar la curva de facturación para cada uno de los valores posibles de consumo. Esta forma de proceder asegura el cumplimiento de ambos objetivos, tal como se ha comprobado en un ejemplo con datos reales de registros.

Igualmente, la transición de un modelo de escalones tarifarios hacia un modelo basado en una curva continua podría implicar ajustes operativos o administrativos no menores, motivo por el cual se sugiere someter el modelo a evaluación de administradores públicos, con el objetivo de identificar posibles dificultades administrativas para su adopción. A pesar de las potenciales dificultades administrativas, este modelo presenta una importante ventaja, puesto que la curva es la misma y solamente se deben aprobar periódicamente los parámetros, sin modificar el modelo. Además, un modelo de curva continuo es más adecuado para sistemas de control de consumo automáticos, ya que fácilmente se puede incorporar en los cálculos basados en precios a medio plazo, sobre todo si a la definición de los parámetros se asocian otros factores como la pluviometría. Esto permitiría incorporar otros conceptos vinculados a la sostenibilidad del suministro del agua.

6. Referencias

Abushammal, M. F. M., & Bawazir, A. K. (2017). Domestic water demand forecasting for Makkah Saudi Arabia. *European Water*, 58, 481-487.

Aina, Y.A., Wafer, A., Ahmed, F., Alshuwaikhat, H.M., 2019. Top-down sustainable urban development? Urban governance transformation in Saudi Arabia. *Cities*. 90, 272–281. Jul 1. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.03.003>

AlHamad, I. M., Al Hemyari, O., Shashati, A., Al Seraihi, H., Albahlooli, H., Ewim, D. R. E., & Al Nuaimi, S. (2023). An integrated approach to water conservation: fuzzy logic assessment of water tariffs in Abu Dhabi Emirate's residential sector. *Bulletin of the National Research Centre*, 47(1), 160. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01130-w>

Ali, R., Kuriqi, A., Abubaker, S., Kisi, O., 2019. Hydrologic alteration at the upper and middle part of the yangtze river, China: towards sustainable water resource management under increasing water exploitation. *Sustainability* 11 (19), 5176. <https://doi.org/10.3390/su11195176>

Babamiri, A. S., Pishvaei, M. S., & Mirzamohammadi, S. (2020). The analysis of financially sustainable management strategies of urban water distribution network under increasing block tariff structure: A system dynamics approach. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102193. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102193>

Bano, R., Khiadani, M., & Nyam, Y. S. (2022). System archetypes underlying formal-informal urban water supply dynamics. *Water Resources Management*, 36(13), 4995-5010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-022-03288-w>

Baños, H. L., Ruiz Gil, T., del Toro Benítez, M., & Miranda Cabrera, I. (2016). Consumo y respuesta funcional de *Nesidiocoris tenuis* Reuter (Hemiptera: Miridae) frente a estadios inmaduros de *Bemisia tabaci* Gennadius (Hemiptera: Aleyrodidae). *Revista de Protección Vegetal*, 31(3), 217-223.

Barberán, R., López-Laborda, J., & Rodrigo, F. (2022). The perception of residential water tariff, consumption, and cost: evidence of its determinants using survey data. *Water Resources Management*, 36(9), 2933-2952. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03134-z>

Barboza, L. V., Francisco, J. B., & Zambaldi, M. C. (2010). Restoring solution of electric network equations: an approach using the augmented lagrangean algorithm. *IEEE Latin America Transactions*, 8(6), 670-677. <https://doi.org/10.1109/TLA.2010.5688094>

Beal, C. D., Stewart, R. A., & Fielding, K. (2013). A novel mixed method smart metering approach to reconciling differences between perceived and actual residential end use water consumption. *Journal of Cleaner Production*, 60, 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.007>

Beal, C.D., Stewart, R.A., Fielding, K., 2013. A novel mixed method smart metering approach to reconciling differences between perceived and actual residential end use water consumption. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.007>.

Ben Zaied, Y., Taleb, L., Ben Lahouel, B., & Managi, S. (2022). Sustainable water demand management and incentive tariff: Evidence from a quantile-on-quantile approach. *Environmental Modeling and Assessment*, 27(6), 967-980.
<https://doi.org/10.1007/s10666-021-09814-1>

Binet, M. E., Carlevaro, F., & Paul, M. (2014). Estimation of residential water demand with imperfect price perception. *Environmental and Resource Economics*, 59, 561-581. <https://doi.org/10.1007/s10640-013-9750-z>

Boudhaouia, A., & Wira, P. (2021). A real-time data analysis platform for short-term water consumption forecasting with machine learning. *Forecasting*, 3(4), 682-694. <https://doi.org/10.3390/forecast3040042>

de Sousa, C. O. M., & Dias Fouto, N. M. M. (2024). Why do people save water? A systematic review of household water consumption behaviour in times of water availability uncertainty. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(8), 1565-1580. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.259>

Deyà-Tortella, B., Garcia, C., Nilsson, W., & Tirado, D. (2016). The effect of the water tariff structures on the water consumption in mallorcan hotels. *Water Resources Research*, 52(8), 6386-6403. <https://doi:10.1002/2016WR018621>

Deyà-Tortella, B., Garcia, C., Nilsson, W., & Tirado, D. (2017). Analysis of water tariff reform on water consumption in different housing typologies in Calviá (Mallorca). *Water*, 9(6), 425. <https://doi:10.3390/w9060425>

Echeverría, J. M. A. (2020). Cross-country evidence for social dimensions of urban water consumption during droughts. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120895>

Franco, D. B., & Steiner, M. T. A. (2017). New strategies for initialization and training of radial basis function neural networks. *IEEE Latin America Transactions*, 15(6), 1182-1188. <http://dx.doi.org/10.1109/TLA.2017.7932707>

García-Valiñas, M. Á., & Suárez-Fernández, S. (2022). Are economic tools useful to manage residential water demand? A review of old issues and emerging topics. *Water*, 14(16), 2536. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00611-8>

García-Valiñas, M. Á., Martínez-Espíñeira, R., & Suárez-Varela Maciá, M. (2021). Price and consumption misperception profiles: The role of information in the residential water sector. *Environmental and Resource Economics*, 80, 821-857.

García-Valiñas, M., & Arbués, F. (2021). Wastewater Tariffs in Spain. In *Oxford Research Encyclopedia of Global Public Health*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190632366.013.282>

How, M.L., Cheah, S.M., Chan, Y.J., Khor, A.C., Say, E.M., 2020. Artificial intelligence-enhanced decision support for informing global sustainable development: a human-centric AI-thinking approach. *Information*. 11 (1), 39. Jan. <https://doi.org/10.3390/info11010039>

Instituto Nacional de Estadística (INE) (2025). Relación de Municipios y sus Códigos por Provincias. Recuperado de https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177031&menu=ultiDatos&idp=1254734710990 (18/05/2025).

Inman, D., & Jeffrey, P. (2006). A review of residential water conservation tool performance and influences on implementation effectiveness. *Urban Water Journal*, 3(3), 127-143. <http://dx.doi.org/10.1080/15730620600961288>

Ishak, A. F., Lee, W. K., & Lim, F. H. (2024). Characterisation of basin water allocation benefit function using a sigmoid-type S-curve logistic equation. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(5), 1048-1059. <http://dx.doi.org/10.2166/aqua.2024.075>

Katz, D., Grinstein, A., Kronrod, A., Nisan, U. (2016). Evaluating the effectiveness of a water conservation campaign: combining experimental and field methods. *J. Environ. Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.049>

Klassert, C., Sigel, K., Klauer, B., & Gawel, E. (2018). Increasing block tariffs in an arid developing country: A discrete/continuous choice model of residential water demand in Jordan. *Water*, 10(3), 248. <https://doi:10.3390/w10030248>

Lee, S., Pomeroy, C., & Burian, S. (2021). Setting future water rates for sustainability of a water distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(2), 04020108. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001313](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001313)

Liu, D., Zhang, G., Li, H., Fu, Q., Li, M., Faiz, M.A., Ali, S., Li, T., Khan, M.I., 2019. Projection pursuit evaluation model of a regional surface water environment based on an ameliorative moth-flame optimization algorithm. *Ecol. Indic.* 107, 105674. Dec 1. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105674>

López-Astilleros, O., Vinay Vadillo, J. C., Villegas-Aparicio, Y., López Guerrero, I., & Lozano-Trejo, S. (2020). Dinámica de crecimiento y curvas de extracción de nutrientes de *Pennisetum* sp.(Maralfalfa). *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11(1), 255-265. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4674>

Lowe, B., Lynch, D., Lowe, J., 2014. The role and application of social marketing in managing water consumption: a case study. *Int. J. Nonprofit Voluntary Sect. Mark.* <https://doi.org/10.1002/nvsm.1484>.

Lucas, N. P., & Cordery, I. (2019). Effects of heightened price awareness on urban water consumption. *Australasian Journal of Water Resources*, 23(2), 129-136. <http://dx.doi.org/10.3390/w15071309>

Ma, X., Wu, D., & Zhang, S. (2018). Multiple goals dilemma of residential water pricing policy reform: Increasing block tariffs or a uniform tariff with rebate? *Sustainability*, 10(10), 3526. <https://doi:10.3390/su10103526>

Macchiaroli, M., Dolores, L., & De Mare, G. (2023). Design the water tariff structure: application and assessment of a model to balance sustainability, cost recovery and wise use. *Water*, 15(7), 1309.

Maldonado-Devis, M., & Almenar-Llongo, V. (2021). A panel data estimation of domestic water demand with IRT tariff structure: the case of the city of Valencia (Spain). *Sustainability*, 13(3), 1414. <http://dx.doi.org/10.3390/su13031414>

Meyer, B. E., Nguyen, K., Beal, C. D., Jacobs, H. E., & Buchberger, S. G. (2021). Classifying household water use events into indoor and outdoor use: improving the benefits of basic smart meter data sets. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(12), 04021079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001471](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001471)

Modrovits, K., Csepregi, A., Kovácsné Székely, I., Hatvani, I. G., & Kovács, J. (2021). Comparison of Various Growth Curve Models in Characterizing and Predicting Water Table Change after Intensive Mine Dewatering Is Discontinued in an East Central European Karstic Area. *Water*, 13(8), 1047. <https://doi.org/10.3390/w13081047>

Naciones Unidas (2015a). ODS 6. Agua limpia y saneamiento. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/> (09/05/2025).

Naciones Unidas (2015b). ODS 3. Salud y bienestar. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/> (09/05/2025).

Naciones Unidas (2015c). ODS 2. Hambre cero. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/> (09/05/2025).

Naciones Unidas (2015d). ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/> (09/05/2025).

Naciones Unidas (2015e). ODS 12. Producción y consumo responsables. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> (09/05/2025).

Naciones Unidas (2015f). ODS 13. Acción por el clima. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> (09/05/2025).

Naciones Unidas (2015g). ODS 14. Vida submarina. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/> (09/05/2025).

Naciones Unidas (2015h). ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/> (09/05/2025).

Nagaraj, A., Kotamreddy, G. R., Choudhary, P., Katiyar, R., & Botre, B. A. (2021). Leak detection in smart water grids using EPANET and machine learning techniques. *IETE Journal of Education*, 62(2), 71-79. <https://doi.org/10.1080/09747338.2021.1984317>

Nagpal, T., Rawlings, H., & Balac, M. (2020). Understanding water demand and usage in Mandalay city, Myanmar as a basis for resetting tariffs. *Journal of Water, Sanitation, and Hygiene for Development*, 10(4), 680-690. <https://doi:10.2166/washdev.2020.076>

Peleg, M. (2023). Empirical models of sigmoid and non-sigmoid hydration and moisture sorption curves. *Food Engineering Reviews*, 15(1), 15-23. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09328-w>

Pérez-López, D., Memmi, H., Gijón, M. C., Rapoport, H. F., & Couceiro, J. F. (2014). Indicadores del crecimiento de la aceituna para la programación de riego deficitario controlado. <http://hdl.handle.net/10261/160544>

Pinto, F. S., & Marques, R. C. (2016). Tariff suitability framework for water supply services: establishing a regulatory tool linking multiple stakeholders' objectives. *Water Resources Management*, 30, 2037-2053. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1268-z>

Pinto, F. S., de Carvalho, B., & Marques, R. C. (2021). Adapting water tariffs to climate change: Linking resource availability, costs, demand, and tariff design flexibility. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125803. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125803>

Piotrowski, A. P., & Napiorkowski, J. J. (2011). Optimizing neural networks for river flow forecasting—Evolutionary Computation methods versus the Levenberg–Marquardt approach. *Journal of hydrology*, 407(1-4), 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.019>

Ran, J., Ran, H., Ma, L., Jennings, S. A., Yu, T., Deng, X., ... & Hu, X. (2023). Quantifying water productivity and nitrogen uptake of maize under water and nitrogen stress in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 285, 108370. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108370>

Randolph, B., Troy, P., 2008. Attitudes to conservation and water consumption. *Environ. Sci. Pol.* 11 (5), 441e455. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.03.003>.

Ravnik, J., Jovanovac, J., Trupej, A., Vištica, N., & Hriberešek, M. (2021). A sigmoid regression and artificial neural network models for day-ahead natural gas usage forecasting. *Cleaner and Responsible Consumption*, 3, 100040. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clrc.2021.100040>

Razumova, M., Rey-Maquieira, J., & Lozano, J. (2016). The role of water tariffs as a determinant of water saving innovations in the hotel sector. *International Journal of Hospitality Management*, 52, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2015.09.011>

Reynaud A and Romano G (2018) Advances in the economic analysis of residential Water use: An introduction. *Water* 10, 1162.

Rodriguez-Sanchez, C., Schuitema, G., Claudy, M., Sancho-Esper, F., 2018. How trust and emotions influence policy acceptance: the case of the Irish water charges. *Br. J. Soc. Psychol.* <https://doi.org/10.1111/bjso.12242>.

Rodriguez-Toro, V. A., Garzón, J. E., & López, J. A. (2011). Control neuronal por modelo inverso de un servosistema usando algoritmos de aprendizaje Levenberg-marquardt y Bayesiano. *arXiv preprint arXiv:1111.4267*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1111.4267>

Ruiz Gómez, E., Díaz García, S., & González Pérez, J. (2024, March). Temporal Scale Sigmoid Curve (TESIC): A tool to characterize short-term demand variability at water supply systems. In 2nd International Join Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA) & Computing and Control in the Water Industry (CCWI). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/WDSA-CCWI2022.2022.14145>

Sahin, O., Bertone, E., & Beal, C. D. (2017). A systems approach for assessing water conservation potential through demand-based water tariffs. *Journal of Cleaner Production*, 148, 773-784. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.051>

Salido, M. J. V. M. (2024). The “Price” of Water in Andalusia: An Approach to the Tariff Systems of the Domestic Water Supply Service. In *Ecological crisis and water supply: the case of Andalusia in the Spanish hydrological context* (pp. 187-209). Brill. http://dx.doi.org/10.1163/9789004679634_011

Sapna, S., Tamilarasi, A., & Kumar, M. P. (2012). Backpropagation learning algorithm based on Levenberg Marquardt Algorithm. *Comp Sci Inform Technol (CS and IT)*, 2, 393-398. <http://dx.doi.org/10.5121/csit.2012.2438>

Satyanaga, A., Rahardjo, H., Leong, E. C., & Wang, J. Y. (2013). Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution. *Computers and Geotechnics*, 48, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.09.008>