

19-21 de Octubre 2022 | Granada

## INTERNATIONAL CONFERENCE ON REGIONAL SCIENCE

*Challenges, policies and governance of the territories in the post-covid era*

Desafíos, políticas y gobernanza de los territorios en la era post-covid

XLVII REUNIÓN DE ESTUDIOS REGIONALES

XIV CONGRESO AACR



## RESUMEN AMPLIADO

**Título:** Algoritmos de *Machine Learning* para identificar los factores más relevantes en la eficiencia energética residencial

**Autores y e-mail de todos ellos:** Mora-Garcia, Raul-Tomas; Céspedes-Lopez, Maria-Francisca; Perez-Sanchez, Vicente-Raul; Perez-Sanchez, Juan-Carlos.

[rtmg@ua.es](mailto:rtmg@ua.es), [paqui.cespedes@ua.es](mailto:paqui.cespedes@ua.es), [raul.perez@ua.es](mailto:raul.perez@ua.es), [jc.perez@ua.es](mailto:jc.perez@ua.es)

**Departamento:** Edificación y Urbanismo

**Universidad:** Universidad de Alicante

**Área Temática:** 6. *Sostenibilidad, medio ambiente y recursos naturales.*

**Palabras Clave:** Eficiencia energética, Machine Learning, Hiperparámetros, Evaluación del modelo.

**Clasificación JEL:** O1 Desarrollo económico. O13 Energía, Medio ambiente

**Resumen:**

### 1. Introducción

Una de las actuaciones prioritarias de la Comisión Europea para reducir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> de los países miembros, consiste en actuar en el sector de la edificación, mediante la regulación de normas para nuevos edificios, pero también mediante políticas de rehabilitación del parque edificado. Con la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios, actualmente modificada y refundida en la Directiva 2010/31/UE (EPBD: *Energy Performance of Buildings Directive*), se pretende reducir las emisiones de dióxido de carbono de los edificios mediante la mejora de la eficacia energética.

En la legislación española, el Texto Refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana (TRLSRU) tiene por objeto promover un “*desarrollo sostenible, competitivo y eficiente del medio urbano, mediante el impulso y el fomento de las actuaciones que conducen a la rehabilitación de los edificios y a la regeneración y renovación de los tejidos urbanos existentes*” (Ministerio de Fomento, 2015).

En Europa (EU28), en los últimos 27 años, el consumo de energía final del sector residencial representó en promedio el 26,2% del total de energía final. Los sectores asociados al transporte y la industria representaron un 30,4% y 28,2% respectivamente, mientras que sector comercial y otros servicios (incluida la agricultura) ascendió al 15,2%.

Las zonas urbanas juegan un papel crucial en la demanda mundial de energía y en las políticas orientadas a mitigar el cambio climático. El uso de energía en los edificios de viviendas es una de las principales fuentes de producción de emisiones de gases de efecto invernadero de las ciudades.

España cuenta con más de 25,8 millones de viviendas, de las que cerca de 9,3 millones tienen más de 50 años de antigüedad. De ellas, el 16,4% presentan un estado de conservación malo o deficiente (INE, Censo de población y vivienda 2011). Esta situación de obsolescencia y baja conservación del parque edificado requiere de una fuerte renovación, tanto estructural como funcional y energética.

La normativa de construcción en España sobre eficiencia energética residencial ha variado en el tiempo. Se pueden diferenciar tres etapas, anterior a 1980, entre el 1980 y el 2007 con la Norma básica de la Edificación sobre condiciones térmicas en los edificios (NBE CT-79), y posterior a 2007 con el Código Técnico de la Edificación.

El periodo comprendido hasta 1980, se caracteriza por una ausencia de normativa sobre condiciones térmicas a cumplir por los edificios. De este periodo se estima que existen 14,6 millones de viviendas, que representan el 56,7% del total de viviendas construidas en España. Por lo general, estas viviendas han sido construidas sin aislamiento térmico en la envolvente exterior (o en caso de existir aislamiento, el espesor es muy reducido), con carpinterías deficientes y con una elevada permeabilidad al aire. Además de esta importante carencia en la envolvente de estos edificios, el esfuerzo inversor en conservación y mantenimiento realizada por los usuarios es reducido. En general,

durante esta etapa, las viviendas se caracterizan por tener grandes consumos de energía, elevados niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> y poca inercia térmica.

El siguiente periodo, que abarca hasta 2007, se caracteriza por la aplicación de la primera norma sobre condiciones térmicas en edificios, la NBE CT-79. Esta norma introdujo mejoras en la envolvente de los edificios, iniciándose de manera progresiva la colocación de aislamientos en los cerramientos de los edificios. En este periodo se estima que se construyeron cerca de 9,4 millones de viviendas, lo que representa un 36,2% del total.

El último periodo comprende los años en los que entró en vigencia la normativa más reciente y obligatoria en la actualidad, el Código Técnico de la Edificación. Esta normativa incorporó una evidente mejora en las exigencias de eficiencia energética de los edificios con respecto a la normativa anterior, pero solo afecta a una pequeña proporción de las viviendas edificadas (1,8 millones, 7,1% del total). Hay que tener presente, que es en el último trimestre de 2007 cuando la economía española es contagiada por la intensa crisis internacional que afecta de manera importante, entre otros, al sector de la construcción.

El panorama mostrado anteriormente evidencia que, de manera mayoritaria, el parque edificado en España está compuesto por viviendas poco eficientes desde un punto de vista energético. Por este motivo es necesario priorizar y concentrar los esfuerzos en rehabilitar energéticamente estos edificios de viviendas, ya que tienen un gran potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. En este sentido, es importante entender cuáles son los factores determinantes del consumo de energía en los hogares, para diseñar políticas eficaces en la reducción del consumo energético (Brounen et al., 2012). Estas políticas, tienen que estar orientadas, por un lado, a la mejora de la eficiencia energética en el sector de la construcción, lo que tendrá un impacto relevante en el consumo total de energía de un país, y contribuirá a que se alcancen los objetivos de emisiones de CO<sub>2</sub> y un desarrollo sostenible (Banfi et al., 2008). Por otro lado, han de estimular a las familias para que quieran vivir en casas más eficientes energéticamente (Estiri, 2014), y a que hagan un uso más racional de las fuentes de energía.

La UE, a través del programa Next Generation, crea el Mecanismo para la Recuperación y la Resiliencia (MRR) que pretende impulsar la rehabilitación de edificios residenciales, viviendas y barrios, dotado con 672.500 millones de euros. Para cumplir

con los objetivos de la UE, el gobierno ha aprobado un Real Decreto por el que se regulan los programas de ayuda en materia de rehabilitación residencial y vivienda social (MITMA, 2021) y un Real Decreto-Ley de medidas urgentes para impulsar la actividad de rehabilitación edificatoria (Jefatura del Estado, 2021). Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿qué actuaciones son las más relevantes para incrementar la eficiencia energética?.

Como hipótesis de investigación, se considera que el parque edificado español actual tiene un gran potencial de ahorro de energía y de reducción de CO<sub>2</sub>, y que con una selección adecuada de intervenciones orientadas a la rehabilitación es posible incrementar la eficiencia energética de los edificios y hacerlos más sostenibles.

Esta investigación tiene por objetivo identificar cuáles son los factores más relevantes para mejorar la eficiencia energética de los edificios residenciales existentes, que permitan determinar las medidas de rehabilitación energética más eficaces para optimizar la inversión en eficiencia energética del parque edificado.

Se estudian varios factores arquitectónicos, de diseño, sistemas constructivos e instalaciones, que pueden ser muy relevantes a la hora de mejorar la eficiencia energética en los edificios residenciales existentes en España.

Para ello se utiliza una gran base de datos construida, que contiene observaciones georreferenciadas de certificados energéticos de viviendas ubicadas en Barcelona. A partir de estos certificados, es posible obtener de cada inmueble, información sobre el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, así como las características técnicas de la envolvente y los sistemas de calefacción/refrigeración. A partir de esa información, y mediante algoritmos de aprendizaje automático, se realizan varios modelos que permiten determinar en qué medida se puede reducir el consumo de energía, mejorando, por ejemplo, la envolvente (opaca o vidriada), los sistemas/instalaciones, los puentes térmicos o el soleamiento, entre otros aspectos.

## **2. Fuentes de información**

Las fuentes de información necesarias para afrontar la investigación provienen del Institut Català de l'Energia (ICAEN) y de la Sede Electrónica del Catastro (SEC). El ICAEN se encarga del registro de todos los certificados energéticos elaborados en la

Comunidad Autónoma de Cataluña. Estos certificados son elaborados por profesionales de la arquitectura como arquitectos, arquitectos técnicos e ingenieros, y se realizan mediante las herramientas reconocidas por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España, para la certificación de eficiencia energética de los edificios (nuevos y existentes).

La base de datos original del ICAEN se distribuye en formato Oracle, estando estructurada en 15 tablas. Contiene información tanto de edificios residenciales como terciarios, con toda la información que es posible extraer de los archivos XML que se generan con los programas oficiales de certificación. De esta fuente de información se han extraído los datos de consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> con su calificación (letra energética); además de las características de los inmuebles como las superficies y transmitancias de la envolvente (cerramientos opacos y vidriados), la zona climática, tipología de vivienda, año y norma de construcción, instalaciones de calefacción y climatización, porcentaje de huecos según orientación, consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> según tipo de servicio (calefacción, refrigeración y Agua Caliente Sanitaria).

A partir de la referencia catastral que figura en cada certificado, se ha procedido a relacionarlos con la información catastral alfanumérica y gráfica, que es de libre acceso desde la Sede Electrónica del Catastro (SEC). Del Catastro se extraen las coordenadas del inmueble, tipología de la vivienda, tipo de uso y el año de construcción.

A partir de estas características, se han definido las variables objeto de estudio, estableciendo su codificación, y procediendo a una revisión de valores faltantes y casos atípicos.

### **3. Metodología**

Se han establecido las siguientes fases de trabajo: Preparación de los datos, Ingeniería de características, Selección del modelo, Optimización de hiperparámetros, Evaluación del modelo, y finalmente la Interpretación del modelo.

Se han utilizado técnicas de aprendizaje automático para identificar las variables más relevantes que afectan al consumo energético de las viviendas, cuantificando su importancia relativa sobre el ahorro energético. Los resultados reportados han de permitir establecer prioridades o preferencias en las intervenciones de los edificios cuya

finalidad sea la mejora energética, así como estimar el ahorro energético de cada medida de forma individual o conjunta.

Se utilizan varios algoritmos de aprendizaje automático para crear un modelo predictivo mediante el lenguaje de programación Python y librerías como Scikit-learn. Se han probado algoritmos de aprendizaje basados en *boosting*, en *bagging*, así como otros más tradicionales.

Para ajustar los hiperparámetros de cada algoritmo de aprendizaje se utiliza un subconjunto de datos para el entrenamiento, empleando la técnica de validación cruzada (*cross validation*), y evaluando las medidas de ajuste y error en el subconjunto de prueba (no visto en el entrenamiento) para evaluar el sobreajuste (*overfitting*).

Para poder explicar e interpretar los resultados obtenidos es necesario utilizar librerías específicas (*Interpretable Machine Learning*), ya que la gran mayoría de estos algoritmos se les consideran “cajas negras” difíciles de explicar. Existen varios enfoques para la explicación de estos modelos: mediante un enfoque global para describir cómo se comporta el modelo en su conjunto, y mediante enfoques locales para explicar cómo el modelo predice una observación del conjunto de datos. Se utilizan herramientas como los gráficos de dependencia parcial (*PDP Partial Dependence Plot*) y valores de Shapley (*SHAP SHapley Additive exPlanations*), entre otros.

## **Financiación**

Proyecto de Investigación I+D+I (2021/2022), con referencia GV/2021/131, financiado por la Generalitat Valenciana —Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital—, desarrollado en el marco del “Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la Comunitat Valenciana 2021 ([Resolución de 20 de noviembre, DOGV núm. 8959 de 24/11/2020](#))

## Referencias

- Banfi, S.; Farsi, M.; Filippini, M. y Jakob, M. (2008). Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. *Energy Economics*, 30(2), pp. 503-516. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2006.06.001>
- Brounen, D.; Kok, N. y Quigley, J.M. (2012). Residential energy use and conservation: Economics and demographics. *European Economic Review*, 56(5), pp. 931-945. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.euroecorev.2012.02.007>
- Estiri, H. (2014). Building and household X-factors and energy consumption at the residential sector: A structural equation analysis of the effects of household and building characteristics on the annual energy consumption of US residential buildings. *Energy Economics*, 43, pp. 178-184. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2014.02.013>
- INE, Instituto Nacional de Estadística. (2013). *Censo de población y vivienda 2011*. Obtenido de [http://www.ine.es/censos2011\\_datos/cen11\\_datos\\_resultados.htm](http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_resultados.htm)
- Jefatura del Estado (2021). *Real Decreto-ley 19/2021, de 5 de octubre, de medidas urgentes para impulsar la actividad de rehabilitación edificatoria en el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia*. Madrid: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rdl/2021/10/05/19>
- Ministerio de Fomento. (2015). *Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana*. Madrid: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/2015/10/31/pdfs/BOE-A-2015-11723.pdf>
- Ministerio de Vivienda. (2006). *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*. Madrid: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/2006/03/28/pdfs/A11816-11831.pdf>
- MITMA, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021). *Real Decreto 853/2021, de 5 de octubre, por el que se regulan los programas de ayuda en materia de rehabilitación residencial y vivienda social del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia*. Madrid: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/10/05/853>
- Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. (2002). *Directiva 2002/91/CE de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios*. Bruselas: Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Obtenido de <https://www.boe.es/doue/2003/001/L00065-00071.pdf>
- Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. (2010). *Directiva 2010/31/UE de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)*. Estrasburgo: Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Obtenido de <https://www.boe.es/doue/2010/153/L00013-00035.pdf>
- Presidencia del Gobierno. (1979). *Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios*. Madrid: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/1979/10/22/pdfs/A24524-24550.pdf>