

Utilización de reglas de asociación para determinar soluciones tecnológico-constructivas para el mejoramiento de la eficiencia energética en edificios de salud

Use of association rules to determine technological-constructive solutions for the improvement of energy efficiency in healthcare buildings

Utilização de regras de associação para determinar soluções tecnológicas-constructivas para a melhoria da eficiência energética em edifícios de cuidados de saúde

DOI: <https://doi.org/10.18861/ania.2023.13.2.3484>

Arq. Emilia Urtenече

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Universidad Nacional de La Plata Argentina
emiliaurtenече@iipac.laplata-conicet.gov.ar
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2435-8424>

Dra. Irene Martini

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Universidad Nacional de La Plata Argentina
irenemartini@iipac.laplata-conicet.gov.ar
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9427-8497>

Dr. Dante Andrés Barbero

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Universidad Nacional de La Plata Argentina

Recibido: 26/06/2023

Aceptado: 30/08/2023

Cómo citar:

Urtenече, E., Barbero, D. A., & Martini, I. (2023). Utilización de reglas de asociación para determinar soluciones tecnológico-constructivas para el mejoramiento de la eficiencia energética en edificios de salud. *Anales de Investigación en Arquitectura*, 13(2). <https://doi.org/10.18861/ania.2023.13.2.3484>

Resumen

En el año 2022, en la Argentina, el consumo energético del parque edilicio construido de los Sectores Residencial y Comercial-Público superó el 34 % y una parte significativa de este consumo se debe a los requerimientos para climatización. A su vez, las demandas de climatización se ven afectadas por la eficiencia energética de la envolvente edilicia, ya que a través de esta se produce el intercambio de calor entre el interior del edificio y su entorno. Este trabajo presenta la aplicación de un método de minería de datos, las reglas de asociación, para descubrir las soluciones tecnológico-constructivas más representativas presentes en la envolvente edilicia, en este caso, correspondientes a edificios destinados a la salud (Sector Comercial-Público). Para ello, es necesario identificar las distintas soluciones tecnológico-constructivas presentes en la envolvente (muros, carpinterías y techos) en los distintos edificios. Con tales datos como entrada, el algoritmo produce como resultados conjuntos de combinaciones de elementos de la envolvente que aparecen asociadas frecuentemente. A partir de estos resultados, se espera mejorar la eficiencia energética de las envolventes más representativas a partir de sugerir medidas específicas para cada terna encontrada facilitando, así, su implementación a escala masiva.

Palabras clave: Planificación urbana, sector salud, envolvente edilicia, reciclado edilicio, ahorro de energía, eficiencia energética, minería de datos, estrategias tecnológico-constructivas.

Abstract

In the year 2022, in Argentina, the energy consumption of the building stock of the Residential and Commercial-Public Sectors exceeded 34 % and a significant part of this consumption is due to air conditioning requirements. In turn, the air conditioning demands are affected by the energy efficiency of the building envelope, since it is through it that the heat exchange between the interior of the building and its surroundings takes place. This work presents the application of a data mining method, the association rules, to discover the most representative technological-constructive solutions present in the building envelope, in this case, corresponding to buildings intended for health (Commercial-Public Sector). To do so, it is necessary to identify the different technological-constructive solutions present in the building envelope (walls, windows and ceilings) in the different buildings. With such data as input, the algorithm produces as results sets of combinations of envelope elements that appear frequently associated. From these results, it is expected to improve the energy efficiency of the most representative building envelopes by suggesting specific measures for each set found, thus facilitating their implementation on a massive scale.

Keywords: urban planning, health sector, building envelope, building recycling, energy saving, energy efficiency, data mining, building technology strategies.

Resumo

No ano 2022, na Argentina, o consumo de energia do parque imobiliário residencial e comercial-público será superior a 34 % e uma parte significativa deste consumo será devido a requisitos de ar condicionado. Por sua vez, as exigências de ar condicionado são afetadas pela eficiência energética da envolvente do edifício, uma vez que é através da envolvente do edifício que se realiza a troca de calor entre o interior do edifício e a sua envolvente. Este documento apresenta a aplicação de um método de mineração de dados, as regras de associação, para descobrir as soluções tecnológicas construtivas mais representativas presentes no invólucro do edifício, neste caso, correspondentes aos edifícios de saúde (Sector Comercial-Público). Para tal, é necessário identificar as diferentes soluções tecnológico-construtivas presentes na envolvente do edifício (paredes, carpintarias e tectos) nos diferentes edifícios. Com dados como a entrada, o algoritmo produz como resultados conjuntos de combinações de elementos do envelope que são frequentemente associados. Com base nestes resultados, espera-se melhorar a eficiência energética dos envelopes mais representativos, sugerindo medidas específicas para cada conjunto encontrado, facilitando assim a sua implementação à escala de massa.

Palavras-chave: Planeamento urbano, Sector da saúde, Envolvente de edifícios, Reciclagem de edifícios, Economia de energia, Eficiência energética, Extração de dados, Estratégias de tecnologia de construção.

Introducción

La edificación construida representa más de un tercio del consumo de energía final a nivel mundial y casi el 40% del total de las emisiones de CO₂. A nivel nacional, desde el punto de vista del consumo final de energía, en el año 2022 se observó que más del 34% correspondía al parque edilicio construido de los Sectores Residencial y Comercial-Público. En este contexto, los edificios hospitalarios, pertenecientes al Sector Comercial-Público, suelen figurar entre los menos eficientes desde el punto de vista energético, ya que presentan singularidades, como la ocupación continua, el equipamiento energo-intensivo y las rigurosas normas de habitabilidad, al mismo tiempo que brindan un servicio social (Discoli et al., 2021). Algunos autores señalan a los hospitales como los máximos consumidores de energía por unidad de superficie en el sector de los edificios (Bawaneh et al. 2019; Celis et al. 2019). Los establecimientos destinados a la salud requieren suministro energético de forma permanente durante las veinticuatro horas de todos los días del año, por lo que la energía representa un importante costo de funcionamiento. Los hospitales poseen elevadas demandas de energía para climatización, las cuales están directamente vinculadas a la Eficiencia Energética (EE) de la envolvente edilicia, ya que los materiales que la componen son los encargados de realizar el intercambio de calor entre el espacio interior y el entorno (Urteneche et al. 2022). Por consiguiente, es necesario formular estrategias de mejoramiento del nivel de aislamiento térmico en la envolvente edilicia, mejorar la eficiencia en equipos y luminarias, y aplicar sistemas para la transformación de energía solar en térmica y en eléctrica (Fondoso Ossola et al. 2022). En función de lo expuesto, este trabajo plantea desarrollar y aplicar una metodología que permita intervenir sobre la envolvente edilicia, a los efectos de mejorar su EE. Para ello, resulta conveniente identificar las soluciones tecnológico-construtivas más frecuentes y/o representativas de la envolvente vertical y horizontal, a los efectos de poder elaborar propuestas de reciclado edilicio aplicables a escala masiva.

Para lograr identificar las soluciones tecnológico-constructivas más frecuentes y/o representativas una posibilidad sería la utilización de un método de agrupamiento (clustering). Sin embargo, dichos métodos, generalmente utilizan la distancia euclídea n-dimensional para evaluar la distancia (similitud) entre pares de elementos y, al hacerlo, toman en consideración todas las coordenadas (atributos) simultáneamente para calcular sus diferencias y elevarlas al cuadrado, sumarlas y, calcular la raíz cuadrada. A diferencia de los métodos de agrupamiento, este trabajo plantea identificar las soluciones tecnológico-constructivas más frecuentes y/o representativas para cada una de las partes de la envolvente edilicia (ej.: muros) de manera que, cada vez que se incorpora una solución tecnológico-constructiva de algún componente de la envolvente, su porcentaje de representatividad se calcula en relación a las soluciones tecnológico-constructivas encontradas previamente. Este proceso, de naturaleza secuencial, se puede implementar mediante reglas de asociación, las cuales tuvieron su origen en el trabajo de Agrawal y colaboradores (1993) y constituyen un método, para encontrar conocimiento (en forma de reglas), a priori desconocido, desde grandes volúmenes de datos. Se considera un método descriptivo porque encuentra relaciones (en términos de frecuencia) entre atributos o campos en una base de datos.

Si bien las reglas de asociación han sido aplicadas en diferentes disciplinas tales como la medicina (Sáenz López et al. 2017), el comercio (Pérez Gómez, 2020, Báez Acuña et al. 2018), y bibliotecología (Malberti Riberos et al. 2015), entre otras, no se conocen aún aplicaciones en la arquitectura y el urbanismo; de modo que el presente trabajo reviste un carácter inédito en este aspecto. La importancia de contar con un método de tales características radica en que los resultados que se obtienen permiten sugerir medidas específicas para cada solución tecnológica constructiva que presenta un alto grado de frecuencia y/o representatividad. Por tal motivo, este método es útil cuando son numerosos los casos particulares (ej.: edificios

de un barrio o sector urbano). En tales situaciones, dada la frecuencia y/o representatividad de las soluciones tecnológicas constructivas encontradas, la labor de aplicar medidas a escala masiva se simplifica sobremanera.

Metodología

La metodología para identificar las soluciones tecnológico-constructivas de la envolvente que aparecen frecuentemente se pueden sintetizar en las siguientes etapas: i. Adquisición de datos; ii. Preprocesamiento; iii. Ejecución del algoritmo; iv. Obtención de resultados y v. Filtrados. Para el desarrollo de este trabajo se utilizará como área de estudio, la Micro-Región Gran La Plata (MRGLP), que pertenece a la Región Sanitaria XI de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. La misma comprende los partidos de La Plata, Berisso y Ensenada y se caracteriza por contar con una infraestructura de diversa complejidad, contenida en un área geográficamente acotada.

Primera etapa: Adquisición de datos

En esta primera etapa se requiere de la construcción de una planilla u hoja de cálculo (figuras 1 y 2) que especifique, para cada edificio, las soluciones tecnológico-constructivas presentes en cada tipo de envolvente (carpinterías, muros y techos). Para ello, se estudió la planimetría brindada por el Ministerio de Salud de la provincia y se realizaron relevamientos *in-situ* de los establecimientos.

Segunda etapa: Preprocesamiento

Tomando como dato a la planilla del paso anterior, se procede a “codificar” cada edificio en forma de vector para poder ser procesado mediante un software adecuado.

Sea E_i un edificio cualquiera, entonces:

$E_i = (a_1, \dots, a_n, p_1, \dots, p_k, t_1, \dots, t_r)$ es un vector donde a_1, \dots, a_n son números que representan la/s alternativa/s posible/s en las carpinterías; p_1, \dots, p_k son números que representan la/s alternativa/s posible/s en muros y t_1, \dots, t_r las correspondientes a los techos, respectivamente. Las variables a_i , p_i y t_i son de tipo binario en donde un valor igual a uno significa que el elemento está presente en la envolvente y cero si no lo está. Esto es requerido para poder utilizar software que permitan obtener las reglas de asociación como Weka¹ o RapidMiner² ya que permiten importar archivos desde hojas de cálculo (ej.: en formato csv) donde los atributos se escriben en columnas. En este trabajo se utilizó el programa Weka, desarrollado en la Universidad de Waikato, por tratarse de un software libre distribuido bajo licencia GNU-GPL. En la figura 3 se puede observar cómo se ha importado un archivo csv y reconocido correctamente usando el software Weka. Se entiende por transacción a una fila cualquiera de la figura 3, donde se indica la presencia o ausencia de cada materialidad en la envolvente del edificio.

| Edificios | Envolvente vertical | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|-------|-------------|-------------|----------------|-------------------------|------------------|-------|----------|---------|------------------|-------|----------|
| | Muros | | | | | | Carpinterías | | | | | | |
| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
| | LC 30 | LC 42 | LC 30 visto | LC 42 visto | LH no portante | Tabique hormigón armado | Madera | Chapa | Aluminio | Proflit | Madera | Chapa | Aluminio |
| | | | | | | | (Sin protección) | | | | (Con protección) | | |
| HIGA "San Roque" | | | | | X | | | X | | | | X | |
| HIAC "Dr. Alejandro Korn" | X | X | | X | X | | X | X | X | X | X | X | |
| HIGA "Dr. Prof. Rodolfo Rossi" | | | | | X | | | X | X | | | | X |
| HZGA "Dr. Ricardo Gutiérrez" | X | | | | X | | | | X | | | X | |
| HIGA "Gral. San Martín" | | X | X | | X | X | X | X | X | | X | X | X |
| HZGA "Dr. Larrain" | X | | X | | | | | | | | | | X |
| HZE "Dr. Noel Sbarra" | X | | | | X | | | X | X | | | X | X |
| HZGA "Cestino" | X | | X | | | | | | | | X | | |
| HIAEP "Sor María Ludovica" | X | X | | | X | | | X | X | | X | X | |
| HIEAC "San Juan de Dios" | X | X | X | | X | | X | X | X | | X | | |

Figura 1. Soluciones tecnológico-constructivas presentes (en muros y carpinterías) en la envolvente edilicia de cada hospital.

Figura 2. Soluciones tecnológico-constructivas presentes (techos) en la envolvente edilicia de cada hospital.

| Edificios | Envolvente horizontal | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------------|--|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| | Techos | | | | | | | | |
| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 |
| | Chapa sin cielorraso | Chapa con cielorraso | Chapa con cielorraso + aislación | Chapa + losa con cielorraso suspendido | Teja curva con cielorraso | Losa HA con cielorraso aplicado | Losa HA con cielorraso suspendido | Losa HA con cielorraso suspendido con aislación térmica | Losa con viguetas y ladrillo cerámico con cielorraso suspendido |
| HIGA "San Roque" | X | X | | | | | X | | |
| HIAC "Dr. Alejandro Korn" | X | X | | X | X | | | | |
| HIGA "Dr. Prof. Rodolfo Rossi" | | | | | | X | | | |
| HZGA "Dr. Ricardo Gutiérrez" | | X | | | X | | X | X | |
| HIGA "Gral. San Martín" | X | X | X | X | | X | X | X | |
| HZGA "Dr. Larrain" | | | | | | | X | | |
| HZE "Dr. Noel Sbarra" | | | X | | | | X | | |
| HZGA "Cestino" | | | | | | | X | | |
| HIAEP "Sor María Ludovica" | | X | X | | | | X | | |
| HIEAC "San Juan de Dios" | X | X | | X | X | X | X | | X |

| No. | 1: M1 | 2: M2 | 3: M3 | 4: M4 | 5: M5 | 6: M6 | 7: C1 | 8: C2 | 9: C3 | 10: C4 | 11: C5 | 12: C6 | 13: C7 | 14: T1 | 15: T2 | 16: T3 | 17: T4 | 18: T5 | 19: T6 | 20: T7 | 21: T8 | 22: T9 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |

Figura 3. Datos importados y visualizados usando el software Weka.

Tercera etapa: Ejecución del algoritmo.

Previo a ejecutar el algoritmo Apriori para calcular las reglas de asociación es necesario especificar 2 parámetros: el nivel de soporte mínimo y la confianza a alcanzar.

El soporte de un ítem es el número de veces que aparece respecto del total de transacciones. Así, por ejemplo, el ítem C1 tiene un soporte igual a 0,3 pues aparece en 3 transacciones (las que describen a los hospitales 2, 5 y 10) de un total de 10. Se denomina *subconjunto* al conjunto de uno o más ítems (en este trabajo un ítem corresponderá a una solución tecnológico-constructiva de alguna parte de la envolvente).

El parámetro confianza, por otra parte, se utiliza para decidir la validez de una regla. Es decir, una regla será considerada válida si alcanza un nivel de confianza especificado y su cálculo sigue la siguiente fórmula:

$$\text{Confianza (M1=>C1)} = \text{soporte (M1 unión C1)} / \text{soporte (M1)}$$

Así, suponiendo que el ítem M1 ha cumplido el requisito de soporte mínimo, el siguiente paso consiste en averiguar qué ocurre al agregar C1, es decir, calcular cuántas veces aparece este último respecto de las veces que aparece M1 (ya no es sobre el total de transacciones). Una vez obtenidos los conjuntos que cumplen la condición de soporte mínimo, el algoritmo intentará encontrar reglas que agreguen otras soluciones tecnológico-constructivas a las ya existentes en un conjunto frecuente dado. Para ello, el algoritmo Apriori debe realizar las 2 tareas siguientes (Amat Rodrigo 2018):

- Identificar todos los subconjuntos que ocurren con una frecuencia por encima de un determinado límite (subconjuntos frecuentes).
- Convertir esos subconjuntos frecuentes en reglas de asociación.

La primera tarea consiste en obtener conjuntos frecuentes (C_i) de longitud $i=1, 2, \dots, n$ que representarán, respectivamente, conjuntos de elementos unitarios, pares, ternas etc. cuyos elementos (individualmente, de a pares, ternas, etc.) alcancen o superen el soporte mínimo. Así, por ejemplo, el soporte de una terna (a,b,c) es el número de veces que aparece la terna completa respecto del total de transacciones.

El algoritmo comienza identificando los *items* individuales que aparecen en el total de transacciones con una frecuencia por encima de un mínimo establecido por el usuario (parámetro conocido con el nombre de soporte mínimo). Luego, sigue una estrategia *bottom-up* en la que a los candidatos se les añade un nuevo *item*. Este nuevo *conjunto* se elimina si contiene un subconjunto infrecuente o si no alcanza el soporte mínimo. El proceso se repite hasta que el algoritmo no encuentre ampliaciones exitosas a partir de los conjuntos frecuentes previos o cuando se alcanza un tamaño de regla máximo. El tamaño máximo teórico posible, entendido como el número de ítems que

puede contener una regla, viene dado por el número de ítems diferentes (sean frecuentes o no) del caso de estudio que se esté analizando.

Para la segunda tarea se deben seguir los siguientes pasos (Amat Rodrigo 2018 op. cit):

- Por cada conjunto frecuente C_i , se deben obtener todos los posibles subconjuntos (s) de C_i . Cabe recordar aquí que en un conjunto de N elementos existen 2^N subconjuntos.
- Para cada subconjunto s (no vacío) de C_i , crear la regla " $s \Rightarrow (C_i - s)$ ".
- Descartar todas las reglas que no superen el umbral mínimo de confianza establecido.

Puede encontrarse el detalle del algoritmo Apriori, que ha sido el utilizado en este trabajo, en el artículo que le dio origen (Agrawal et al. 1993 op cit.) y en los de Witten et al. (2017) y Ye (2014).

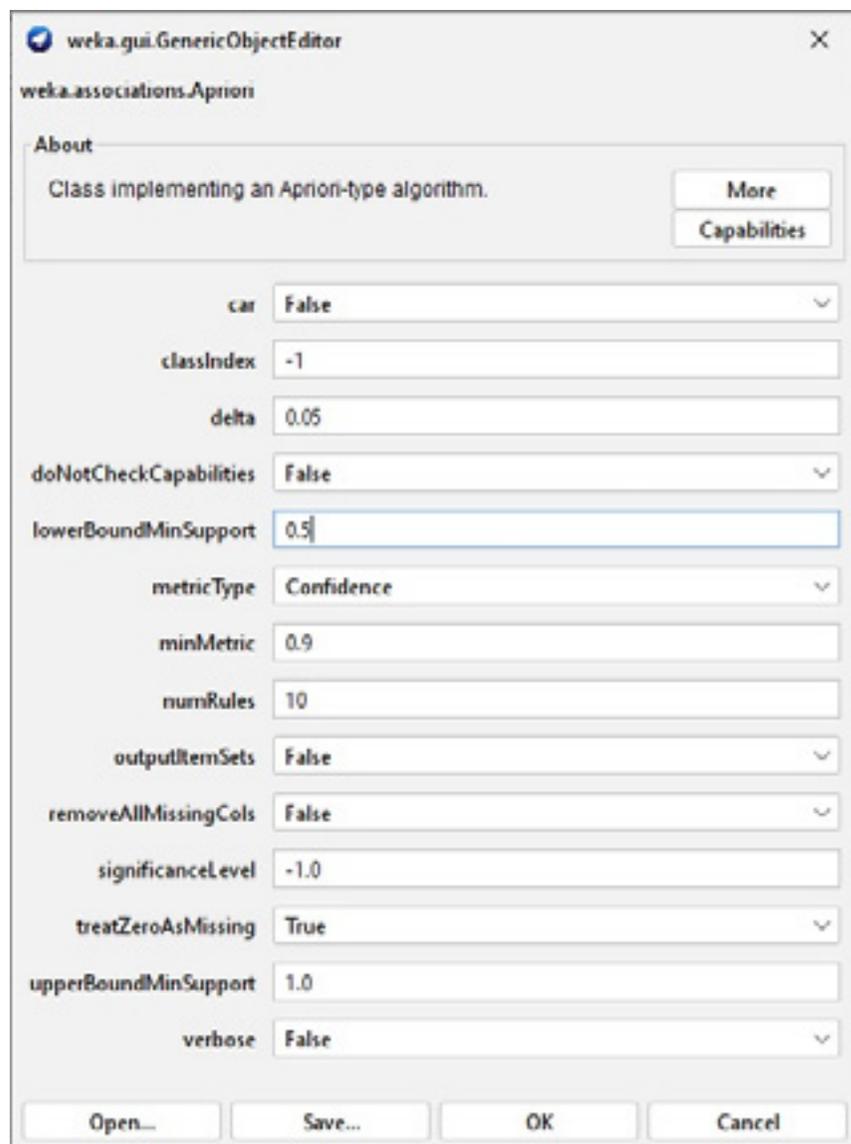


Figura 4. Especificación de los parámetros para poder ejecutar el algoritmo Apriori usando el software Weka

Actualmente, existen softwares que permiten calcular las reglas de asociación que cumplan con los parámetros de soporte y confianza que se les especifique. El algoritmo Apriori es uno, de entre otros (ej.: FP-Growth, Eclat), que se utiliza para calcular reglas de asociación. Antes de proceder a aplicarlo para calcular las reglas es necesario especificar algunos parámetros (figura 4).

En la figura 4 se puede observar la pantalla que permite especificar los parámetros en el software Weka. Los parámetros por configurar son de dos tipos:

- i. Para importar el archivo con el que se va a trabajar: por ej., hay un parámetro que le indica al software que cuando haya un cero debe interpretarlo como que en esa posición no hay ningún valor.
- ii. Para definir parámetros para el algoritmo: en este caso, sólo se requiere especificar el valor de soporte mínimo, la métrica de confianza -para añadir nuevos ítems- y su valor mínimo. El resto de los parámetros quedan con sus valores por defecto.

Una vez especificados los parámetros requeridos, el siguiente paso consiste en aplicar el método de reglas de asociación.

Cuarta etapa: Obtención de resultados

Los resultados que se obtienen del algoritmo son expresados en forma de reglas tales como:

C2 ==> M5

En la regla anterior se dice que C2 es el antecedente de la regla y M5 el consecuente. Un resultado así estaría afirmando que los elementos del par (C2, M5) aparecen (juntos) frecuentemente. Las reglas obtenidas (resultados) al aplicar el método de reglas de asociación al conjunto de establecimientos del sector salud se presentan y analizan en la sección siguiente.

Quinta etapa: Filtrados

Esta etapa es necesaria dada la naturaleza del problema, a saber, de encontrar ternas de envolventes donde estén presentes exactamente un elemento de carpinterías, otro de muros y el restante de techos. Cualquier otra combinación no es válida. Así, aquellas reglas encontradas cuyo número de ítems sea distinto de tres deben eliminarse y también las ternas que no contengan un ítem por cada tipo de envolvente. Finalmente, si hubiera 2 o más ternas que contienen los mismos elementos, pero en distinto orden debe mantenerse sólo una de las ternas y el resto eliminarse.

Resultados y discusión

Al ejecutar el algoritmo Apriori con valores de soporte y confianza de 0,5 y 0,8 respectivamente dio lugar a 53 reglas que, luego de filtrar las que no correspondían, resultaron quedando un total de 19. Dado que este es un número elevado de combinaciones, se volvió a correr el algoritmo, esta vez, manteniendo el valor de soporte mínimo, pero aumentando a 0,9 el umbral mínimo de confianza con la intención de encontrar un número de reglas menor.

Así, al aplicar el método de reglas de asociación al caso de estudio analizado, con parámetros de soporte mínimo de 0,5 y confianza superior o igual a 0,9, se obtuvieron los conjuntos de reglas recopilados en la Figura 5.

Los resultados anteriores deben filtrarse de modo de eliminar aquellas con número de elementos distinto de tres (ej.: las 4 primeras reglas sólo tienen 2 elementos) y aquellas que tienen 3 elementos pero que no especifican un elemento por cada parte de la envolvente (ej.: la regla 6 señala dos tipos de muro y uno de carpintería, pero

| Reglas | Antecedentes | Consecuentes |
|----------|--------------|--------------|
| Regla 1 | C2 | M5 |
| Regla 2 | C3 | M5 |
| Regla 3 | C6 | M5 |
| Regla 4 | T2 | M5 |
| Regla 5 | C2, C3 | M5 |
| Regla 6 | M1, C3 | M5 |
| Regla 7 | M1, M5 | C3 |
| Regla 8 | C2, C6 | M5 |
| Regla 9 | C2, T2 | M5 |
| Regla 10 | C2, T7 | M5 |
| Regla 11 | C3, C6 | M5 |
| Regla 12 | C3, T2 | M5 |
| Regla 13 | C3, T7 | M5 |
| Regla 14 | C6, T2 | M5 |
| Regla 15 | C7, T7 | M5 |
| Regla 16 | T2, T7 | M5 |

Figura 5. Conjuntos de reglas de asociación obtenidos al ejecutar el algoritmo Apriori usando el software Weka.

| Reglas | Antecedentes | Consecuentes |
|----------|--------------|--------------|
| Regla 9 | C2, T2 | M5 |
| Regla 10 | C2, T7 | M5 |
| Regla 12 | C3, T2 | M5 |
| Regla 13 | C3, T7 | M5 |
| Regla 14 | C6, T2 | M5 |
| Regla 15 | C7, T7 | M5 |

Figura 6. Conjuntos de reglas de asociación resultantes.

ningún tipo de techo). Asimismo, si hubiese varias reglas que tengan los mismos elementos, pero en distinto orden, deberían eliminarse dejando sólo una de ellas. Retomando el ejemplo que se viene desarrollando, quedarían sólo 6 reglas, sintetizadas en la Figura 6.

Las reglas anteriores representan, respectivamente, las siguientes ternas: (M5,C2,T2), (M5,C2,T7), (M5,C3,T2), (M5,C3,T7), (M5,C6,T2) y (M5,C6,T7).

Claramente, el tipo de muro más usado es el número 5 (M5: LH no portante). En cuanto a las carpinterías, C2, C3 y C6 aparecen, cada una, en un tercio de las veces que aparece M5. Cada vez que se utilizan las carpinterías anteriores, la mitad de las veces van acompañadas del tipo de techo T1 y la otra mitad junto a T7 (figura 7).

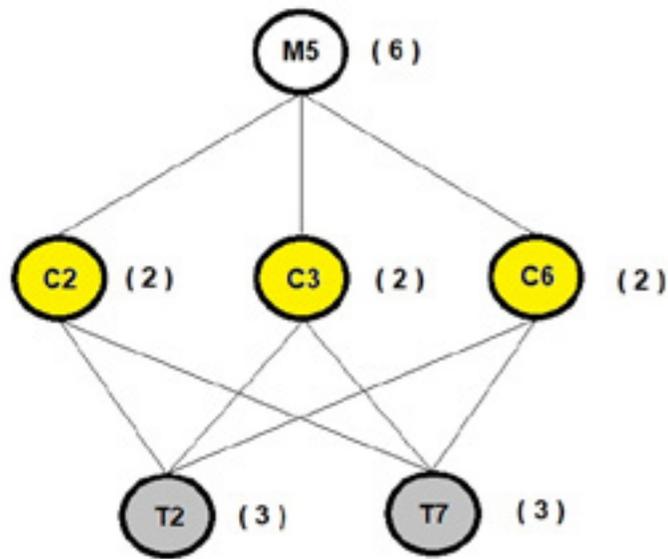


Figura 7. Cantidad de veces que aparece cada parte de la envolvente dentro de las 6 reglas finales encontradas.

Propuestas tecnológico-constructivas para el mejoramiento de la envolvente

A partir de los resultados obtenidos es posible sugerir medidas para el mejoramiento de la EE de la envolvente edilicia, mediante estrategias de reciclado para las soluciones tecnológico-constructivas más representativas para su aplicación en forma masiva.

En el caso de la envolvente vertical opaca, M5 es un muro de ladrillo cerámico hueco no portante (18x18x33 cm) revocado en ambas caras. El mismo posee un coeficiente de transmitancia térmica $K=1,61 \text{ W/m}^2\text{C}$ (no verifica el nivel B de la Norma IRAM 11605 para condición de invierno $-0,93 \text{ W/m}^2\text{C}$ - exigido por la Ley N° 13.059), que puede reducirse incorporando aislación térmica desde el exterior (propuesta de reciclado 1), con el sistema EIFS (Exterior Insulation Finish System). Este sistema está compuesto por planchas de poliestireno expandido (EPS), las cuales

se adhieren al muro existente por medio de adhesivo (o fijaciones mecánicas) para luego aplicar sobre estas una capa de base coat (mezcla de polímeros acrílicos y cemento portland). Para darle resistencia mecánica, se refuerza con una malla de fibra de vidrio que cubre toda la superficie de las planchas de EPS. El acabado final se realiza con revestimiento plástico o con pintura exterior. La incorporación del sistema EIFS al muro existente con planchas de EPS de 20 Kg/m^3 y 20 mm de espesor permite alcanzar un $K=0,83 \text{ W/m}^2\text{C}$. También es posible la incorporación del aislamiento térmico desde el interior (propuesta de reciclado 2), mediante la colocación de 50 mm de lana de vidrio con foil de aluminio en su cara interna, protegida mecánicamente con placas de roca de yeso de $12,5 \text{ mm}$ sobre estructura metálica ($K=0,48 \text{ W/m}^2\text{C}$). En ambos casos, las propuestas tecnológico-constructivas de mejoramiento del muro existente permiten la verificación del nivel B de la Norma IRAM 11605 exigido por la Ley N° 13.059 (Figura 8).

| MURO | Situación original base | Reciclado 1 | Reciclado 2 |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| Esquema | | | |
| K (en $\text{W/m}^2\text{C}$) | 1,61 | 0,83 | 0,48 |
| Nivel IRAM 11605 (condición invierno) | No verifica | Nivel B | Nivel B |
| Reducción del K (en %) | - | 48,45 | 70,19 |

Figura 8. Propuestas tecnológico-constructivas de mejoramiento del muro existente.

En el caso de la envolvente vertical transparente, en la figura 9 se puede observar que, para C2 (carpintería con marco y hoja de chapa doblada y vidrio simple) y C3 (carpintería con marco y hoja de aluminio y vidrio simple), cuyo $K=5,06 \text{ W/m}^2\text{C}$ en ambos casos, se plantea reemplazar el vidrio simple por un doble vidriado hermético (DVH) 4-9-4 mm., lo que permite lograr un $K=3,62 \text{ W/m}^2\text{C}$ (Nivel K5 de Norma IRAM 11507-4:2010). Se debe tener en cuenta que la carpintería de chapa no admite la incorporación de DVH, por lo que puede utilizarse el marco de chapa como premarco para la colocación de una nueva abertura de aluminio, por ejemplo, con DVH. No obstante, para seguir reduciendo el coeficiente de transmitancia térmica y alcanzar niveles menores de la Norma IRAM 11507-4, es necesario incorporar algún tipo de protección solar. Para el caso de C6, una carpintería con marco y hoja de chapa doblada y vidrio simple que cuenta con protección solar (cortina de enrollar de madera, por ejemplo), se puede mejorar su $K=2,84 \text{ W/m}^2\text{C}$ con la incorporación de DVH

| CARPINTERÍA | C2, C3 | | C6 | |
|-------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | Situación original base | Reciclado | Situación original base | Reciclado |
| Esquema | | | | |
| K (W/m ² °C) | 5.06 | 3.62 | 2.84 | 2.32 |
| Nivel IRAM 11507-4 | No verifica | K5 | K4 | K4 |
| Reducción del K (en %) | - | 28.46 | - | 18.31 |

Figura 9. Propuestas tecnológico-constructivas de mejoramiento de la carpintería existente.

4-9-4 mm. (K= 2,32 W/m²°C), alcanzando de esta manera, el nivel K4 de la Norma IRAM 11507-4. (Figura 9)

En el caso de la envolvente horizontal, T2 es un techo de chapa ondulada de hierro galvanizado con cielorraso suspendido sin ningún tipo de aislación térmica (K= 1,77 W/m²°C para verano y K= 2,35 W/m²°C para invierno), por lo cual no verifica el nivel B de la Norma IRAM 11605 para condición de verano (0,48 W/m²°C), tal como exige la Ley N° 13.059. A partir de la incorporación de aislación térmica exterior con 6 cm. de EPS (20 Kg/m³) debajo de la cubierta existente, se logra alcanzar un K= 0,46 W/m²°C para verano y K=0,49 W/m²°C para invierno (propuesta de reciclado 1). Esta estrategia para cubiertas inclinadas es una alternativa de aislación mediante la colocación de placas de EPS entre el entablonado o machimbre y la cubierta original de chapa. Otra alternativa (propuesta de reciclado 2) se basa en incorporar en el cielorraso suspendido, aislación interior con 80 mm de lana de vidrio, que tiene un foil de aluminio en una de sus caras, actuando como barrera de vapor (K=0,39 W/m²°C para verano y K=0,41 W/m²°C para

invierno). Por otra parte, T7 es un techo compuesto por una losa de hormigón armado colada in situ con cielorraso suspendido cuyo K= 1,58 W/m²°C para verano y 2,04 W/m²°C para invierno, ya que no posee aislación térmica. Si se incorporan en el cielorraso suspendido, 80 mm. de lana de vidrio, que con foil de aluminio en una de sus caras, actuando como barrera de vapor, se obtiene un K= 0,37 W/m²°C para verano y K=0,38 W/m²°C para invierno. En ambos casos, las propuestas tecnológico-constructivas de mejoramiento del techo existente permiten la verificación del nivel B de la Norma IRAM 11605 exigido por la Ley N° 13.059 (Figura 10).

Adicionalmente, dado que las ternas encontradas son las que aparecen más frecuentemente en el parque edilicio del sector salud, las propuestas para el mejoramiento para esos tipos de envolvente constituyen en realidad soluciones a nivel de la red de salud y no a nivel de un edificio. Por lo tanto, dado que los resultados obtenidos son aplicables a un sector urbano, las estrategias de intervención son de aplicación masiva.

| TECHO | Situación original base | T2 | | T7 | |
|---|-------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------|
| | | Reciclado 1 | Reciclado 2 | Situación original base | Reciclado |
| Esquema | | | | | |
| K (W/m ² °C) (condición verano) | 1.77 | 0.46 | 0.39 | 1.58 | 0.37 |
| Nivel IRAM 11605 (condición verano) | No verifica | Nivel B | Nivel B | No verifica | Nivel B |
| Reducción del K (en %) | - | 74.01 | 77.97 | - | 76.58 |

Figura 10. Propuestas tecnológico-constructivas de mejoramiento del techo existente.

Debido a que, por lo general, a mayor porcentaje de participación de una terna en el conjunto de edificios, mayor potencial para el ahorro de energía o para el mejoramiento de la EE, el método utilizado ha mostrado ser de ayuda para encontrar las opciones más propicias sobre las cuales intervenir.

Conclusiones

El mejoramiento de la EE permite reducir el consumo de energía (en la Argentina la producción de energía a partir de fuentes no renovables representa más del 50 %) y asimismo posibilita la disminución de los perjuicios ambientales (ej.: reducción de emisiones de CO₂, CH₄, entre otros). Si se tienen en cuenta los compromisos asumidos por el país en cuanto a la reducción de emisiones de CO₂ equivalentes, lograr mejorar la EE de la envolvente del sector salud significaría una disminución del consumo final de energía correspondiente a dicho sector. Asimismo,

la inclusión de medidas de EE en los establecimientos del sector salud, puede ser una referencia urbana que influya favorablemente en la comunidad, de manera que las implementaciones podrían ser tomadas como ejemplo a los efectos de ser extrapoladas a otros sectores y/o edificios.

La Eficiencia Energética como estrategia busca un equilibrio entre el ahorro de energía y la calidad de vida de los usuarios. Ahora bien, la EE en la arquitectura puede estar centrada en las instalaciones, en los procesos tecnológicos-constructivos que conforman la envolvente edilicia o en el modo en que los usuarios usan los edificios, más relacionado este último aspecto al Uso Racional de la Energía (URE). Las estrategias de mejoramiento de la EE de la envolvente edilicia, con períodos de amortización cortos en relación con la etapa de uso del ciclo de vida del edificio, posibilitan el mejoramiento de la calidad térmica de los ambientes, con un menor costo operativo durante este período de tiempo.

Notas finales

Para la aplicación de medidas de EE a la envolvente edilicia a escala masiva es necesario, en primer lugar, identificar las soluciones tecnológico-constructivas más usuales. Como se ha podido observar, las reglas de asociación han podido ser aplicadas al estudio de envolventes edilicias para determinar las soluciones tecnológico-constructivas más frecuentes. La metodología desarrollada y los resultados obtenidos permiten identificar conjuntos de 3 elementos cuya representatividad es “elevada”, entendiéndose por tal a aquellas soluciones tecnológico-constructivas que aparecen un número de veces mayor o igual a un determinado valor umbral, denominado soporte y, al mismo tiempo, satisfaciendo el nivel de confianza requerido. Una vez descubiertas estas ternas, es posible sugerir medidas para el mejoramiento de la EE de la envolvente edilicia, mediante estrategias de reciclado, para su aplicación en forma masiva.

La utilización innovadora de reglas de asociación en el campo de la arquitectura permitió, en este caso, detectar patrones tecnológico-constructivos repetitivos para intervenir en la envolvente edilicia de manera sistemática. No obstante, podría aplicarse también para identificar la condición de exposición predominante en la envolvente edilicia de un sector diferente, como es el caso del sector educación, o bien para analizar lo que ocurre a un nivel más detallado considerando, por ejemplo, las áreas hospitalarias de cada uno de los establecimientos del sector salud. Este último estudio, a nivel de área hospitalaria, forma parte de los trabajos a realizar en el futuro, y que permitirá obtener información más precisa acerca de las áreas que conforman cada establecimiento. De esta manera, las reglas de asociación permiten, en cualquier caso, encontrar conjuntos de elementos que aparecen combinados frecuentemente e intervenir sobre estos, en lugar de que sea de forma individual, para ampliar el alcance de las propuestas.

¹ Weka es un software desarrollado por la Universidad de Waikato. URL: <https://www.cs.waikato.ac.nz/~ml/weka/>

² RapidMiner es un software desarrollado por la empresa del mismo nombre. URL: <https://rapidminer.com/>

Aprobación final del artículo:

Ma. Arq. Andrea Castro Marcucci, editora en jefe aprobó la publicación de este artículo.

Contribución de autoría:

Arq. Emilia Urteneche: Investigación, metodología, preparación del manuscrito, elaboración del manuscrito y revisión y edición del manuscrito.

Dr. Dante Andrés Barbero: Investigación, metodología, supervisión, preparación del manuscrito y elaboración del manuscrito.

Dra. Irene Martini: Responsable del proyecto de investigación, investigación, metodología, supervisión, revisión y edición del manuscrito.

Referencias

AGRAWAL, R., IMIELINSKI, T. Y SWAMI, A. (1993). Mining association rules between sets of items in large databases. *Proc. 1993 ACM-SIGMOD International Conference Management of Data*, pp. 207-216, Washington, D. C. Recuperado de <https://doi.org/10.1145/170036.170072>

AMAT RODRIGO, J. (2018). *Reglas de asociación y algoritmo Apriori con R. Cienciadatos, Github*. Recuperado de https://www.cienciadedatos.net/documentos/43_reglas_de_asociacion#Bibliograf%C3%ADa

BÁEZ ACUÑA, J. M., PAREDES CABAÑAS, C. A., SOSA CABRERA, G. y GARCÍA, M. E. (2018). Descubriendo reglas de asociación en bases de datos del sector retail usando R. *XV Workshop Bases de Datos y Minería de Datos (WBDDM). XXIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*. La Plata, Argentina. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73220>

BAWANEH, K., NEZAMI, F. G., RASHEDUZZAMAN, M. y DEKEN, B. (2019). Energy Consumption Analysis and Characterization of Healthcare Facilities in the United States. *Energies. Vol. 12*. Issue 19. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/en12193775>

CELIS, F., ECHEVERRÍA, E., DA CASA, F., CHÍAS, P. y DOMÍNGUEZ, P. (2019). Eficiencia energética y arquitectura hospitalaria en España. *III Encuentro Latinoamericano y Europeo Sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles*. Recuperado de <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/38635>

DISCOLI, C. A., MARTINI, I. y BARBERO, D. A. (2021). *Quality of Life in Relation to Urban Areas and Sustainability. Application Case: City of La Plata, Buenos Aires, Argentina* (pp. 353–370). Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-3-030-50540-0_18

FONDOSO OSSOLA, S. T., CHÉVEZ P. J. y MARTINI I. (2022). Construcción del año base para el subsector salud. *XII Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura*. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/144600>

HERNÁNDEZ ORALLO, J., RAMÍREZ QUINTANA, M. J. y FERRI RAMÍREZ, C. (2004). *Introducción a la minería de datos*. Person-Prentice Hall.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos* (IRAM 11605: 1996).

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. (2010). Carpintería de obra y fachadas integrales livianas. Ventanas exteriores. Parte 4 – Requisitos complementarios. Aislación térmica (IRAM 11507-4:2010).

MALBERTI RIBEROS, M. A. Y KLENZI, R. O. (2015). Rules of association in the computation of book use in a university library. *Enfoque UTE*. Vol. 6. Nro. 2. Recuperado de <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n2.62>

MINISTERIO DE ECONOMÍA. (2022). *Balance Energético Nacional 2022*. URL: <https://www.argentina.gob.ar/econom%C3%ADa/energ%C3%ADa/planeamiento-energetico/balances-energeticos>. Accedido: 16-8-2023.

PÉREZ GÓMEZ, R. (2020). Generación de reglas de asociación para productos de retail utilizando el algoritmo FP-Growth paralelo. *Actas del Congreso Internacional de Ingeniería de Sistemas 2019: Innovando la educación en tecnología*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12724/11159>

SÁENZ LÓPEZ, A., CORTÉS MARTÍNEZ, F. Y BETANCOURT CHÁVEZ, J. R. (2017). Reglas de asociación en una Base de datos del área médica. *Revista Arquitectura e Ingeniería*. Vol. 11. Nro. 2. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/1939/193954081005/html/>

URTENECHÉ, E., BARBERO, D. A., FONDOSO OSSOLA, S. T. Y MARTINI, I. (2022). Clasificación de establecimientos de salud a partir de características técnico-constructivas de la envolvente edilicia para fundamentar medidas de eficiencia energética. *XLIV Reunión de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*.

WITTEN, I. H., FRANK, E., HALL, M. A. Y PAL, C. J. (2017). *Data mining. Practical machine learning tools and techniques*. Fourth edition. Morgan Kaufmann.

Ye, N. (2014). *Data mining. Theories, algorithms and examples*. CRC Press. Recuperado de https://doc.lagout.org/Others/Data%20Mining/Data%20Mining_%20Theories%2C%20Algorithms%2C%20and%20Examples%20%5B%202013-07-26%5D.pdf

Fuente de imágenes

Figuras 1 y 2. Urteneche et al. 2022 op. cit.

Figuras 3 a 10. Elaboración propia.