

VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE UN LADRILLO ECOLÓGICO COMPUESTO DE PET Y CENIZAS DE POLLERÍAS EN EL CONTEXTO DE TACNA – PERÚ

DETERMINING THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTING AN ECOLOGICAL BRICK COMPOSED OF PET AND ASH FROM THE ESTABLISHMENT OF SALE GRILLED CHICKENS IN THE CONTEXT OF TACNA - PERU

DOI: <https://doi.org/10.47796/ra.2021i19.489>

PRESENTADO : 03.03.21

ACEPTADO : 15.06.21

JOSÉ ANTONIO APAZA ATENCIO¹

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna - Perú

<http://orcid.org/0000-0002-9012-4749>

joseaa@unjbg.edu.pe

MARIA FERNANDA PORTUGAL CRUZ²

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna - Perú

<http://orcid.org/0000-0002-6995-0739>

mportugal@unjbg.edu.pe

LEO ULISES MICHAELL TIRADO REBAZA³

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna - Perú

<http://orcid.org/0000-0002-6599-8866>

leotiradorebaza@gmail.com

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Tacna (Perú) a una altitud de 564 m.s.n.m., con temperaturas que variaron desde los 12 °C hasta los 26 °C. Se tuvo como finalidad la determinación de la factibilidad económica y ambiental del uso de ladrillos ecológicos (compuestos de plástico PET, ceniza de pollerías, arena y cemento) para construcciones, intentando dar una alternativa de solución paralela a la problemática de contaminación atmosférica producto de las ladrilleras y la abundancia de residuos sólidos en Tacna. Inicialmente se fabricaron 7 muestras de ladrillo con los componentes mencionados a diferentes concentraciones. Estas fueron sometidas a pruebas de resistencia a la compresión, absorción de agua y transferencia de calor. Finalmente se realizó una optimización obteniendo como proporciones ideales: 50 % de cemento, 25 % de plástico PET, 20 % de arena y 5

ABSTRACT

This research was developed in the city of Tacna, Peru, at an altitude of 564 m.a.s.l., with temperatures that varied from 12 °C to 26 °C. The purpose was to determine the economic and environmental feasibility of the use of ecological bricks (PET plastic compounds, ash from the establishment of sale of grilled chickens, sand and cement) for constructions, trying to provide an alternative solution parallel to the problem of atmospheric pollution caused by the brickyards and the abundance of solid waste in Tacna. Initially, 7 brick samples were manufactured with the mentioned components at different concentrations. These were subjected to tests for compressive strength, water absorption and heat transfer. Finally, an optimization was carried out, obtaining as ideal proportions: 50% cement, 25% PET plastic, 20% sand and 5% ash for the manufacture of

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

² Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

³ Bachiller en Ciencias con mención en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

% de ceniza para la fabricación de ladrillos ecológicos, mismos que cumplieron con las normativas técnicas peruanas exigidas actualmente.

PALABRAS CLAVE: Ladrillos ecológicos, resistencia a la compresión, absorción de agua, transferencia de calor, factibilidad económica y ambiental

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de cualquier actividad económica genera impactos sociales y ambientales (Castro et al., 2020) tanto positivos (la generación de empleo, por ejemplo) como negativos (aumento de la producción de residuos sólidos, efluentes y emisiones atmosféricas) (Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación de Bolivia, 2002).

Los residuos sólidos aparentemente carecen de valor, empero, pueden ser aprovechados como materia prima al ser correctamente valorizados y reinsertados en el circuito económico. Los plásticos, por ejemplo, son uno de los residuos más generados en el mundo, debido al consumismo impregnado actualmente en la sociedad (United States Environmental Protection Agency, 2019). Y su permanencia prolongada en nuestro planeta, aunado a su caótica disposición final, hace que sea una problemática latente (Rivera, 2019), puesto que a medida que sufren un proceso de degradación, son capaces de perturbar ecosistemas marítimos, terrestres e incluso aéreos, incluyendo a todos sus componentes bióticos y abióticos; además de representar un grave peligro para actividades como la pesca, el turismo, la navegación y demás (Montoto et al., 2017). Pese a ello, únicamente el 41 % de plástico es reciclado o reutilizado en el planeta (Geyer et al., 2017).

ecological bricks, which complied with the Peruvian Technical Regulations currently required.

KEYWORDS: Ecological bricks, compressive strength, water absorption, heat transfer, economic and environmental feasibility

En la ciudad de Tacna, se evidencia una significativa presencia de residuos plásticos PET en las calles, lugares públicos y parques (Caihuaray, 2017) debido a la escasa cultura ambiental, los pocos mecanismos de regulación y al incesable crecimiento demográfico (Tirado, 2021), por lo cual, es necesario encontrar un mecanismo que permita su reaprovechamiento.

En cuanto a las pollerías del Perú, estos son establecimientos de servicios en los que se ofertan pollos a la brasa para el consumo directo de los clientes. Estos establecimientos emplean leña para la cocción del alimento dentro del horno brasero, a partir de lo cual se genera ceniza. Este residuo de fácil esparcimiento, por la pequeñez de sus partículas, pone en riesgo la salud de las personas tras la afectación de su aparato digestivo y respiratorio; asimismo, altera cuerpos de agua y la calidad de suelos.

Si bien se ha referenciado a la ceniza como un potencial abono rico en potasio, calcio, magnesio y fósforo (Omil, 2007), la añadidura de materiales complementarios a la leña para su posterior uso, hacen que la ceniza generada tenga componentes altamente tóxicos que requieren un manejo cauteloso.

Por todo ello, se ha propuesto múltiples acciones, pero todo apunta a que la adopción del concepto de una economía circular a partir del reciclaje, reaprovechamiento y reutilización

es el camino adecuado que permitirá reducir el impacto ambiental y minimizar la utilización de recursos naturales, de forma que se permita aumentar el bienestar social y a la vez pueda surgir nuevas oportunidades de empleo (Rojas, 2016).

Por otro lado, la contaminación atmosférica es considerada uno de los principales escollos a nivel mundial (Andrade et al., 2018) causada por la proliferación de agentes contaminantes como el dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, óxido nítrico, compuestos orgánicos volátiles, ozono (Abril et al., 2017) y material particulado. Estos producirían efectos agudos y crónicos en los organismos según el tiempo y la concentración de exposición (Aldaz, 2017), lo cual conduce al aumento de los niveles de morbilidad y mortalidad de las personas (Ballester et al., 1999).

La contaminación del aire en la ciudad de Tacna proviene principalmente del tráfico vehicular y de las ladrilleras (Ministerio del Ambiente del Perú, 2013). Estas últimas son capaces de perturbar a los ecosistemas aledaños y contribuir con el efecto invernadero (Gomezcoello et al., 2012).

En busca de una solución, se ha planteado distintas alternativas para poder limitar la contaminación atmosférica derivada de la producción de mampostería tradicional. El uso de hornos ecológicos, por ejemplo, es uno de los métodos que se intentó implantar (Cervera et al., 2004), sin embargo, el uso de este equipo por parte de los ladrilleros es casi nulo por ser considerado ineficiente (González, 2010). Asimismo, dentro de las disyuntivas más vanguardistas, se puede mencionar a Bolobosky et al. (2018) quienes elaboraron ladrillos ecológicos a base de PET y virutas metálicas; en tanto, Carrasco et al. (2018) diseñaron un ladrillo a partir de arena de sílice y arcilla provenientes de una compañía minera.

En ese contexto, la presente investigación manifiesta una opción innovadora basada en la fabricación de ladrillos ecológicos compuestos por botellas de plástico PET y ceniza proveniente de pollerías en la ciudad de Tacna. Empero, este conglomerado de alternativas deben ser la tendencia que marque un cambio en la era de la construcción.

El uso de ladrillos ecológicos mitigaría la contaminación ambiental producida por la emisión de gases de efecto invernadero de los hornos de las ladrilleras, brindando un nuevo uso al plástico PET y a la ceniza generada en las pollerías, limitando ligeramente el uso de cemento. De este modo, la finalidad es desarrollar una alternativa sostenible que pueda desarrollarse de forma suplementaria al de la mampostería tradicional en Tacna e incluso a nivel nacional.

El objetivo general de la investigación fue determinar la viabilidad de la implementación de un ladrillo ecológico compuesto de PET y cenizas de pollerías en el contexto de Tacna, evaluando su desempeño físico, térmico, y factibilidad económica.

Asimismo, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- 1) Determinar la resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos y realizar una comparación de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP E.070 – Albañilería.
- 2) Evaluar la absorción de agua de los ladrillos ecológicos y compararlo con la Norma Técnica Peruana NTP 331.017 – Unidades de Albañilería.
- 3) Determinar la cantidad óptima de cenizas, plástico PET, cemento y arena para la fabricación de los ladrillos ecológicos, y evaluar la transferencia de calor.
- 4) Evaluar la factibilidad económica y ambiental del uso de la mampostería ecológica diseñada.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación es de tipo exploratorio, puesto que en el Perú no se han registrado estudios orientados a la fabricación de mampostería no convencional que integre estrictamente ceniza de pollerías, plástico PET, arena y cemento; en tanto, el diseño de la investigación fue experimental.

Fue realizada en la ciudad de Tacna, ubicada a 562 m.s.n.m., específicamente en los interiores de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Sede “Los Granados”. Tuvo una duración de 3 meses (octubre a diciembre), registrándose un clima semi – cálido con temperaturas que variaron desde los 12 °C hasta los 26 °C.

DESARROLLO

Inicialmente, se recolectaron las botellas plásticas PET en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y se introdujeron en una máquina trituradora para obtener pedazos en forma de escama como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Plástico PET triturado



Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, se recolectó ceniza proveniente de pollerías del cercado de Tacna, la cual se tamizó para evitar la formación de cúmulos. Adicionalmente, se adquirió cemento y arena.

Se fabricaron moldes de madera con dimensiones de 20 cm x 10 cm x 8 cm para cada unidad experimental, imitando los valores dimensionales de los ladrillos convencionales. En la Figura 2, se observa el proceso de mezclado y homogeneizado a partir de las materias primas mencionadas.

Se aplicó un diseño de mezclas de vértices extremos con 7 unidades experimentales, con las proporciones que se muestran en la Tabla 1.

Figura 2. Elaboración de ladrillos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Descripción del diseño de mezclas (en porcentaje)

Muestra	Cemento	Arena	Plástico PET	Ceniza	Total
MP – 01	50	50	0	0	100
MP – 02	50	25	25	0	100
MP – 03	40	35	25	0	100
MP – 04	40	20	0	40	100
MP – 05	30	45	0	25	100
MP – 06	40	20	20	20	100
MP – 07	25	35	20	20	100

Fuente: Elaboración propia

Las cantidades previamente pesadas para cada unidad experimental se introdujeron en los moldes forrados con plástico para darle la forma adecuada. Para evitar la generación de burbujas de agua, las muestras se presionaron y dejaron secar en el molde por un periodo de 12 horas. Pasado el tiempo, se desmoldaron las muestras y se dejaron secar al sol por 8 días, durante los cuales fueron pesadas una vez cada día. Esta etapa es de gran importancia, debido a que ayuda a reducir el nivel de contaminación ambiental que produce el proceso de fabricación convencional de los ladrillos de arcilla o de hormigón, pues anula el paso por un horno de secado, uno de los grandes contaminantes del proceso convencional. En la Figura 3 se observan algunas de las unidades experimentales obtenidas.

Figura 3. Muestra de ladrillos



Fuente: Elaboración propia

Terminado el proceso de secado, las muestras se llevaron al Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, en donde se determinó la resistencia a la compresión para cada muestra empleando la prensa universal presentada en la Figura 4.

Figura 4. Prueba de resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos



Fuente: Elaboración propia

Antes de la realización de las pruebas de absorción de agua de las unidades experimentales, estas fueron secadas en una estufa a 105 °C por un periodo de 5 horas. Transcurrido el tiempo, se pesaron las muestras, considerando a este como el peso seco (W_s). Se siguió el protocolo de la Norma Española UNE 7 061, basada en el mantenimiento prolongado de ladrillos bajo el agua. Siguiendo a esta norma, se sumergió las muestras a un tercio de su altura. Después de 2 horas, se elevó el nivel de agua a dos tercios de su altura por 2 horas más. Pasado el tiempo, se elevó a 1 cm sobre su altura. Luego de 24 horas de comenzar el ensayo en húmedo, se sacó cada muestra y se pesó. Posteriormente, se sumergieron los ladrillos otra vez, por otras 24 horas. Si el peso a esta cantidad de horas difiere en menos del 10 % al peso a 48 horas, se considera a este último, el peso saturado de agua (W_{sa}).

Se determinó la absorción de agua en porcentaje aplicando la siguiente formula:

$$[(W_{sa} - W_s) / W_s] * 100$$

Donde:

- Peso saturado de agua: W_{sa}
- Peso seco: W_s

Una vez con los resultados de las pruebas realizadas a las 7 unidades experimentales o muestras, se realizó el análisis estadístico en el programa Statgrafics Centurion XVI.II con el fin de determinar cuál mezcla obtendrá las mejores propiedades de resistencia a la compresión y absorción de agua para ser finalmente comparadas con la Norma Técnica Peruana NTP E.070-Albañilería y la Norma Técnica Peruana NTP 331.017-Unidades de Albañilería, respectivamente.

Se realizó un modelamiento en 3D en el programa Sketch Up 2017, para elaborar una estructura ecológica con dimensiones de 66 cm x 42 cm x 44 cm, para calcular la cantidad de réplicas a elaborar. Se escogieron estas dimensiones porque la producción era de 24 ladrillos ecológicos/día. Para las réplicas se dio un tiempo de secado de 7 días (3 a medio ambiente y 4 en horno solar), para poder acelerar el proceso de secado de las replicadas elaboradas.

La estructura a base de ladrillos ecológicos (ver Figura 5) fue edificada sobre suelo areno arcilloso, predominante dentro de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Esta estuvo completamente sellada, a excepción de un orificio, por el cual, se evaluó la transferencia de calor midiendo la temperatura interna, externa y entre el ladrillo utilizando termocuplas Tespro Tipo J encamisado con enchufe macho. También se midió la radiación solar con un solarímetro SL 200 Kimo durante la época de primavera, en periodos de 30 minutos desde las 8:00 h hasta las 19:00 h. La transferencia de calor del

material, su conductividad térmica y su eficiencia térmica solo se pudo determinar durante el horario diurno debido a las restricciones de ingreso a las instalaciones de la Universidad durante la noche. Las pruebas de transferencia de calor se realizaron durante 7 días y se promediaron los valores obtenidos.

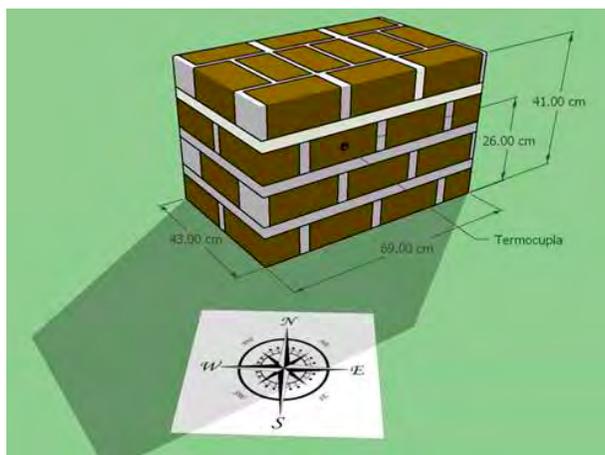
Figura 5. Estructura de ladrillos ecológicos



Fuente: Elaboración propia

La representación gráfica de la estructura construida a base de ladrillos ecológicos, indicando la orientación respecto al norte se observa en la Figura 6.

Figura 6. Esquematización de la estructura de ladrillos ecológicos



Fuente: Elaboración propia

Para culminar con la investigación, se determinó si este tipo de mampostería no convencional ecológica posee una sustentada

factibilidad de uso económico y ambiental teniendo en cuenta los precios estándares del mercado y la disposición de los materiales a emplear.

RESULTADOS

Las mediciones de peso tras el proceso de secado obtenidas de las 7 unidades experimentales se detallan en la Tabla 2.

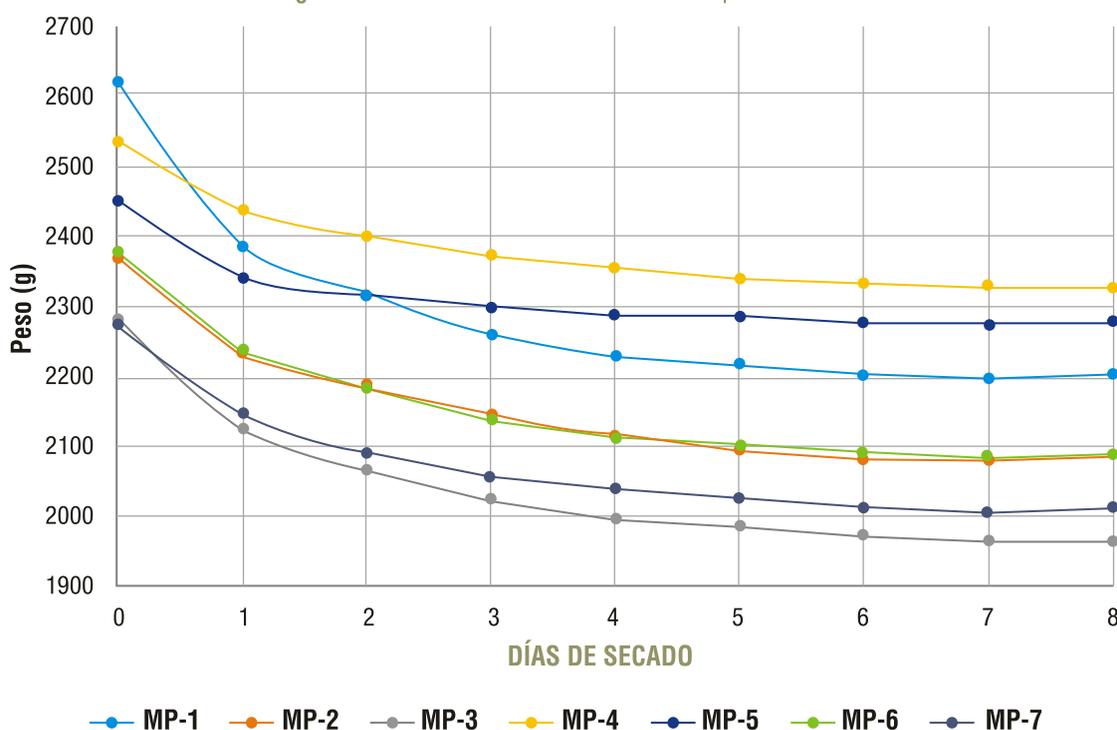
En la Figura 7 se observa la disminución del peso de cada muestra por 8 días, los cuales tuvieron un peso inicial en un rango de 2.3 a 2.6 kg que luego disminuyó de 1.8 a 2.3 kg. Además, las muestras MP-04 y MP-05 mostraron una diferencia menor a 200 g de agua evaporada a comparación de las otras, y se obtuvieron con un tiempo mayor de secado de lo establecido, y con las cenizas como principal componente.

Tabla 2. Días de secado para las 7 unidades experimentales

Unidad	Día 0 (g)	Día 1 (g)	Día 2 (g)	Día 3 (g)	Día 4 (g)	Día 5 (g)	Día 6 (g)	Día 7 (g)	Día 8 (g)	Δ peso (g) (0 - 8) día
MP -01	2620	2387	2318	2260	2230	2218	2202	2197	2204	416
MP -02	2370	2233	2185	2146	2115	2097	2084	2080	2088	282
MP -03	2282	2126	2067	2026	1997	1986	1973	1965	1966	316
MP -04	2537	2437	2401	2373	2355	2340	2334	2329	2328	209
MP -05	2450	2342	2316	2298	2290	2286	2278	2274	2280	170
MP -06	2378	2240	2182	2137	2112	2102	2092	2086	2090	288
MP -07	2273	2144	2091	2057	2040	2027	2014	2006	2015	258

Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Curva de secado de las 7 unidades experimentales



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 se observa el análisis de varianza para la resistencia a la compresión en donde existe diferencia significativa a un 95% de confianza entre las 7 unidades experimentales, con un coeficiente de variabilidad de 27.15%.

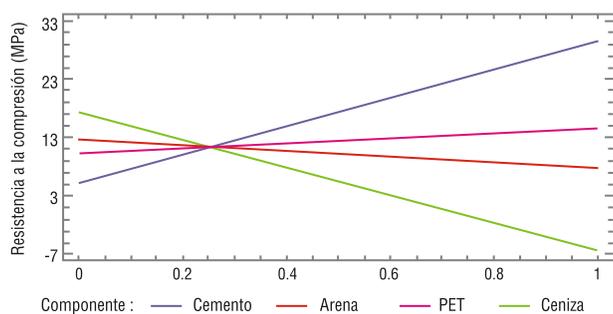
Tabla 3. Análisis de Varianza para la resistencia a la compresión

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo Lineal	324.223	3	108.074	12.02	0.0353
Error total	26.9781	3	8.99271		
Total	351.201	6			

CV= 27.15%

Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Gráfica de traza para resistencia a la compresión de las 7 unidades experimentales



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8, se muestra que entre menor sea la cantidad de ceniza, mayor será la resistencia a la compresión.

En la Tabla 4, se observa el nivel de absorción de agua de las 7 unidades experimentales, las cuales se encuentran en un rango del 10 % al 22 %.

En los datos obtenidos, todas las unidades experimentales cumplen la Norma Técnica Peruana NTP 331.017 donde se indica que los ladrillos estrictamente deben presentar una absorción máxima de agua del 22 %. Sin embargo, se observa que la menor absorción de agua se da en las muestras MP-04 y MP-05, las cuales contienen predominantemente ceniza, considerando que este material disminuye la absorción de agua.

Analizando las pruebas de compresión y absorción de agua, se observó que las cenizas reducen la resistencia a la compresión si muestran una proporción significativa, pero mantienen la absorción de agua al mínimo. En la Tabla 5, se observa las cantidades en gramos y porcentaje necesarias para obtener los resultados óptimos en la fabricación de ladrillos ecológicos.

Tabla 4. Absorción de agua para las 7 muestras

Muestras	W _s	W _{sa} a 24h	W _{sa} a 48h	⊗W _{sa}	Absorción de agua (%)
MP-01	183	218	218	0	19.13
MP-02	533	616	617	1	15.67
MP-03	442	517	518	1	17.08
MP-04	412	466	466	0	13.11
MP-05	343	379	379	0	10.50
MP-06	345	411	412	1	19.28
MP-07	271	327	326	0	20.66

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Optimización de Respuesta para resistencia a la compresión y absorción de agua

Componente	%	g	Resistencia a la compresión (MPa)	Absorción de agua (%)
Cemento	50	1250		
Arena	20	500		
Plástico PET	25	250	21.13	12.11
Ceniza	5	75		

Fuente: Elaboración propia

La optimización de respuesta arroja que los componentes del ladrillo ecológico deben contener en un 50 % cemento, 20 % de arena, 25 % de plástico PET y 5 % de ceniza. Bajo estas condiciones, se obtuvo un resultado de 21.13 MPa para la resistencia a la compresión, el cual cumple con la Norma Técnica Peruana NTP E0.70 superando al “Ladrillo V”, el cual debe manifestar una resistencia mínima de 17.6 MPa.

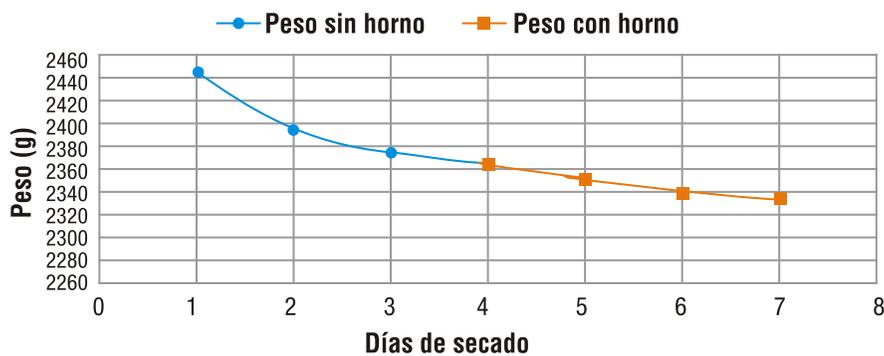
En cuanto a la absorción de agua, esta fue del 12.11 %, cumpliendo con la Norma Técnica Peruana NTP 331.017.

Determinadas las proporciones óptimas, se elaboró el diseño de la estructura ecológica de dimensiones: 66 cm x 42 cm x 44 cm. A partir de ello, se replicaron 38 ladrillos ecológicos en total.

El proceso de secado se muestra en la Figura 9, y tuvo como datos en promedio la reducción del peso de las unidades. El peso final por unidad fue en promedio 2330 g con una densidad de 1.46 g/cm³.

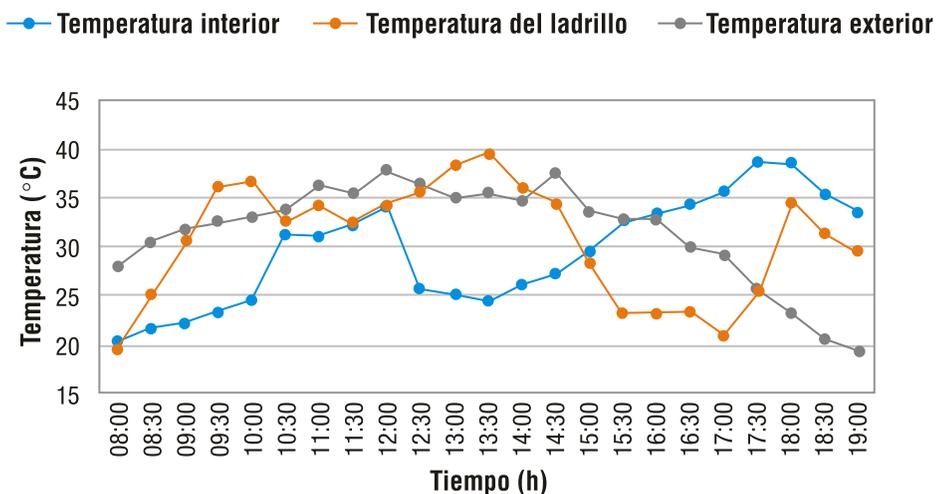
Construida la estructura, se obtuvo los datos de temperatura interna, externa y entre los ladrillos. En la Figura 10, se observan las comparaciones de la temperatura. Se evidenció que, durante la mañana, la temperatura interior se mantenía regulada a comparación de la temperatura externa, la cual ascendió hasta los 37.8 °C; y, durante la noche, la temperatura interna de la estructura se mantuvo elevada a comparación de la temperatura externa, la cual disminuyó hasta 19.5 °C a las 19:00 horas.

Figura 9. Curva de secado de ladrillos ecológicos



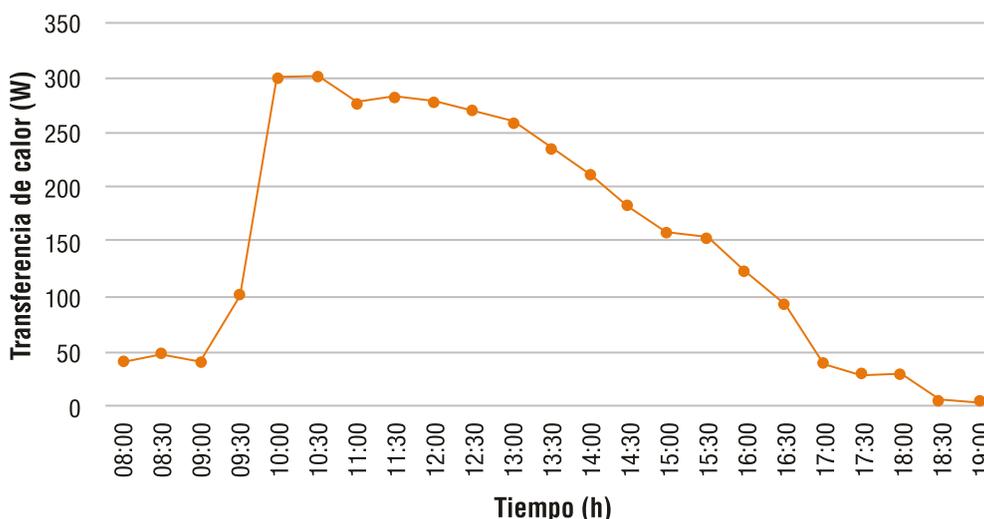
Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Gráfica de temperatura vs. hora del día



Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Transferencia de calor vs. hora del día

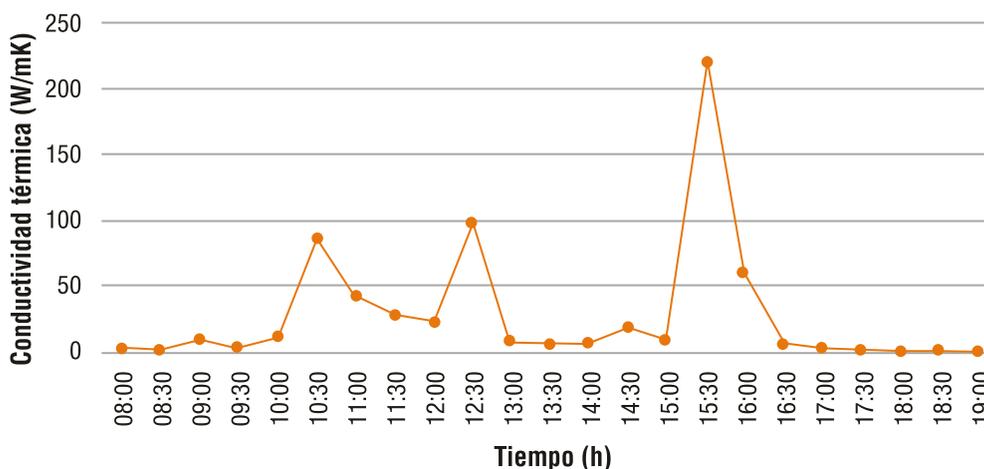


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11, se muestra la transferencia de calor por conducción (W) por hora del día. Se tuvo el valor más alto a las 10:00 h, siendo en este punto el mayor flujo de calor hacia el interior de la estructura ecológica, a

partir de esta hora, fue en descenso hasta las 19:00 h, mostrando una tendencia de regulación. Entre menor sea la transferencia de calor, el ambiente al interior de los ladrillos se mantendrá regulada por la tarde y noche.

Figura 12. Conductividad térmica vs. hora del día



Fuente: Elaboración propia

Aunque la temperatura interna esté regulada, a comparación de la temperatura ambiental, muestra valores superiores a esta por la tarde, actuando como un conductor de calor. Por la mañana, la temperatura interna será óptima incrementando a partir de las 10:00

h a 12:00 h cuando hay mayor radiación solar. En este lapso de 2 horas, se da la máxima transferencia de calor del exterior al interior (Figura 10) coincidiendo estas tres temperaturas con un rango de 30 a 35 °C. Que la temperatura del ladrillo sea superior a la temperatura

interna, supone que desde este punto se está acumulando calor y se va elevando hasta las 14:30 h y desciende a partir de esta, debido a que la temperatura externa está en descenso. Todo este calor acumulado por el ladrillo lo transfiere a su interior, incrementando la temperatura dentro de la estructura en un lapso de 3.5 horas, hasta las 18:00 h corroborándose que a las 15:30 h la conductividad térmica es de 221 W/m K, siendo el punto en donde el calor acumulado se transfiere al interior (Figura 12). Una vez transferido todo el calor retenido, la temperatura del ladrillo e interna disminuyen paralelamente debido al descenso de temperatura exterior.

Debido al restringido acceso a la Universidad durante la noche, no se calculó la transferencia de calor después de las 19:00 h, por lo tanto, no se podría afirmar que se llegua a un punto de equilibrio entre las temperaturas, o de lo contrario, la temperatura interna descienda hasta estar regulada y se pueda mantener durante la noche.

En cuanto a la factibilidad económica, se tuvo en cuenta el costo de los materiales al precio actual de mercado, recabados a partir de la información brindada por recolectores y comerciantes locales. Con la finalidad de tener una mayor precisión, se realizó un análisis de costo unitario del ladrillo ecológico en dólares (Ver Tabla 6), a partir del cual, los stakeholders tendrán una referencia para la elaboración de presupuestos en caso deseen replicar y aplicar la presente investigación.

En cuanto a la factibilidad ambiental, la fabricación de los ladrillos ecológicos permite limitar la acción contaminante de sus componentes en el momento de su reaprovechamiento, brindando de esta forma, una alternativa suplementaria al de los ladrillos convencionales, que además es amigable con el ambiente y presentan propiedades físicas similares que cumplen con las Normas Técnicas Peruanas. En la Tabla 7 se observa la cantidad de material reciclado que se emplea por cada ladrillo ecológico.

Tabla 6. Costo de materiales para la elaboración de un ladrillo ecológico, por unidad

Material	Unidad	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Cemento	kg	1.250	0.120	0.150
Arena	kg	0.500	0.010	0.005
Plástico PET	kg	0.250	0.150	0.038
Ceniza	kg	0.075	0.960	0.072
Total				0,265

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Alternativas de materiales para la elaboración de los ladrillos ecológicos

Material	Referencia	Materiales requeridos por ladrillo ecológico	Total de material por ladrillo ecológico (g)
Plástico PET	Botellas PET de 2 L – 55 g por unidad	4,54 botellas	250 g
Ceniza	1 kg de carbón vegetal de pollerías	1,5 kg de carbón vegetal (con un rendimiento para la obtención de ceniza del 5 %)	75 g

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

Cote et al. (2014) indican que la elaboración de los ladrillos ecológicos a base de Tereftalato de Polietileno (PET) son una alternativa ambientalmente amigable. Ello porque incluye en su composición a un plástico altamente resistente a cargas muy pesadas, que cumple una buena función como aislante térmico (Echevarría, 2017), al igual que las cenizas (Leiva, 2017) que también forman parte de su materia prima.

En cuanto a la resistencia a la compresión de la mampostería, se sabe que esta tiende a crecer con el incremento del contenido de cemento y disminuye a medida que crece la relación agua/cemento (Delacoste, 2015).

Cabe mencionar que, el ladrillo ecológico optimizado reportó un valor de resistencia a la compresión de 21.13 MPa superando al reportado por Echevarría (2017) quien obtuvo un máximo valor de 17.53 MPa. Esto se debe a la materia prima del ladrillo ecológico que él fabricó, ya que su composición solo contempló, además de materiales convencionales, al plástico PET, mas no ceniza. También influyeron las dimensiones del ladrillo ecológico propuesto en la presente investigación, ya que posee un mayor volumen a comparación de la muestra del investigador.

Los bajos niveles de absorción de agua de los ladrillos a base de plástico hacen que estos puedan ser usados como material de construcción (Arun et al. 2019).

También, el ladrillo ecológico obtenido en la presente investigación supera al 10 % de absorción de agua, por lo cual difiere a lo reportado por Cabo (2011) quien calculó un máximo de 5.5 %, lo cual se debe a que la mampostería que elaboró estuvo compuesta por cemento y cal hidráulica de proporciones de 5, 10 y 15 % a 10 MPa y careció de ceniza.

La estructura construida a base de ladrillos ecológicos tuvo dimensiones bastante pequeñas y prácticamente careció de espacios abiertos en comparación a una construcción real, lo cual ocasionó que la concentración de calor dentro de esta se incrementara significativamente debido a que la transferencia de calor de la mampostería, no solo es producto de la conducción, sino que, al no ser homogénea, se produce también la transferencia por radiación y por convección en sus poros (Erazo, 2007). Si bien es cierto, teóricamente un ladrillo convencional posee una conductividad térmica de 0.8 W / m K en condiciones normales, este valor no puede ser comparado con los hallados en la presente investigación ya que las condiciones meteorológicas variables causaron fluctuaciones.

Se recomienda realizar pruebas calorimétricas construyendo una estructura con dimensiones similares a la de una vivienda para evaluar con mayor precisión los parámetros de conductividad térmica, transmitancia, resistencia térmica y transferencia de calor. Ello con el fin de corroborar los resultados obtenidos en la presente investigación que evidencien el potencial calórico aceptable de los ladrillos ecológicos.

Complementariamente, es recomendable efectuar pruebas de corrosión, para suelos con elevado nivel de salinidad, y evaluar la transferencia de calor en horario nocturno (lo cual fue una de las limitaciones de la investigación), en zonas alto andinas o en zonas con temperaturas muy bajas. Asimismo, realizar monitoreos de los gases que pueda emitir el ladrillo ecológico durante su exposición al sol, ya que, pese a que Chávez et al. (2016) determinaron que no hubo emanación de dióxido de carbono en la fundición del plástico para la fabricación de ladrillos ecológicos hechos con PET, se podría estar emitiendo otros tipos de contaminantes atmosféricos.

Por otro lado, los ladrillos ecológicos elaborados en la presente investigación fueron cotizados en 0.265 \$ por unidad. Según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú (2020) la unidad del ladrillo King Kong V tiene un costo igual a 0.184 \$ al adquirir un millar de ladrillos. Se evidenció una diferencia de 0,081 \$ considerado como un valor agregado debido al aporte ambiental y sello verde del producto. Esta diferencia podría reducirse más si se logra consolidar una industria sofisticada dedicada a la fabricación de ladrillos ecológicos.

Alegre (2018) quien fue Viceministro de Gestión Ambiental del Perú en aquel año, expresó: *“En la actualidad, el plástico representa el 10 % del total de residuos sólidos generados en el Perú, de los cuales, el PET representa la cuarta parte”*.

Dicha alegación evidencia que las botellas plásticas PET pueden ser adquiridas de forma rápida, fácil y económica, por lo que no serían un factor limitante.

Pese a que en el Perú existen casi 13 mil pollerías (“Día del pollo a la brasa”, 2019), y que una pollería promedio consume entre 10 a 20 kilos de carbón diariamente (“Un 85% de pollerías”, 2019), la ceniza requerida de estos establecimientos para fabricar ladrillos ecológicos a una gran escala, probablemente no podría ser abastecida. Para lograrlo, sería necesario emplear otros tipos de ceniza de forma complementaria previa prueba de laboratorio para garantizar la no alteración de las características físicas del producto ecológico.

CONCLUSIONES

- Se recomienda emplear los ladrillos ecológicos a base de PET y ceniza de pollerías en la ciudad de Tacna por ser una alternativa amigable con el ambiente y tratarse de un producto que goza de un sólido desempeño

físico y térmico, es factible económicamente y tiene la ventaja de contar con un gran suministro de materia prima compuesta por residuos sólidos en comparación con otros tipos de ladrillo ecológico.

- Se determinó la resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos optimizados obteniendo un valor igual a 21.13 MPa superando al “Ladrillo V”, que según la Norma Técnica Peruana NTP E0.70 – Albañilería, debe presentar una resistencia a la compresión mínima de 17.6 MPa.

- Se evaluó la absorción de agua de los ladrillos ecológicos optimizados obteniendo un valor de 12.11 % cumpliendo con la Norma Técnica Peruana NTP 331.017 – Unidades de Albañilería, la cual indica que la absorción de agua debe presentar un valor menor al 22 %. Cabe resaltar que todas las unidades experimentales fabricadas previamente cumplieron con esta norma.

- Se determinó que la mezcla óptima para la fabricación de un ladrillo ecológico debe estar compuesto por 1250 g de cemento, 500 g de arena, 250 g de plástico PET y 75 g de ceniza. Con estas proporciones, se alcanzó una máxima transferencia de calor del exterior al ladrillo de 300.79 W desde las 10:00 h a 12:00 h y del ladrillo al interior a las 15:30 h, con una conductividad de 221 W/m K.

La factibilidad económica del uso de los ladrillos ecológicos fue comprobada habiendo una diferencia de costo unitario de ladrillos igual a 0.081 \$ respecto a uno convencional. Pese a que la diferencia podría verse sustentada por el valor agregado que tiene el ladrillo ecológico, esta brecha puede reducirse si se desea invertir en una industria capaz de fabricar este tipo de productos debido a la minimización de precios por producción a gran escala. Asimismo, la factibilidad ambiental e importancia de ladrillos ecológicos recae en que, por la fabricación de

cada uno de estos, se estaría reaprovechando 4,54 botellas PET de 2 L y aproximadamente la décima parte de la ceniza que genera una pollería promedio del Perú tras su actividad comercial diaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abril, G., García, M., Ojeda, S., Represa, S. (2017). Contaminación atmosférica en Dock Sud, pcia. de Buenos Aires, Argentina: análisis de su comportamiento temporal en el período 2011-2017. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, 1-15. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6773>.

Aldaz, G. (2017). Material particulado y la afección a las vías respiratorias de los trabajadores del área de molino de la empresa Ecuacauchos [Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Ambato] Repositorio.

Alegre, M. (2018). MINAM: El plástico representa el 10% de todos los residuos que generamos en el Perú. Ministerio del Ambiente. <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/minam-el-plastico-representa-el-10-de-todos-los-residuos-que-generamos-en-el-peru/>.

Andrade, K., Sevilla, N. (2018). Polución del aire generado por los automotores e incidencia en niños/as de la Esc, Eugenio Espejo del cantón Milagro [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal de Milagro]. Repositorio Institucional.

Arun, K., Brindha, M., Girinath, R., Marshal, A. (2019). An experimental study of clay brick using polystyrene. International Research Journal of Engineering and Technology, 6(4): 722-727. ISSN: 2395-0056.

Ballester, F., Pérez, S., Tenías, J. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud:

Una introducción. Revista Española de Salud Pública, 73(2): 109-121. ISSN: 2173-9110.

Bolobosky, M., Candanedo, M., Madrid, J., Nacarí, M., Maure, J. (2018). Fabricación de ladrillos a base de polímeros PET y virutas metálicas. Revista de Iniciación Científica, (4): 33 - 38. ISSN: 2412 - 0464. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1816>.

Cabo, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Universidad Pública de Navarra.

Caihuaray, M. (2017). Elaboración de un plan de educación ambiental para minimizar la contaminación generada por las juntas vecinales de Para Chico, Villa Panamericana y Para Grande que permita plantear un programa de reaprovechamiento de envases plásticos descartables – 2013 [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann] Repositorio Institucional.

Carrasco, E., Tinoco, D. (2018). Elaboración de ladrillos ecológicos a partir de arena de sílice y arcillas mixtas procedentes de la compañía minera Sierra Central S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional.

Castro, A., Suysuy, E. (2020). Herramientas de gestión ambiental para reducir el impacto de los costos ambientales en una empresa de construcción. Revista Universidad y Sociedad, 12(6): 82 - 88. ISSN: 2218 - 3620. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000600082.

Cervera, L., Córdova, G., Romo, M. (2004). Estudio urbano - ambiental de las ladrilleras en el municipio de Juárez. Estudios Fronterizos, 5(9): 9-34. ISSN: 2395-9134.

Chávez, M., Lartategui, F., Letona A., Rodriguez, L. (2016). Factibilidad de uso del PET reciclado

en elementos de cubiertas y envolventes. *Ingeniería*, 27(2): 40-55. ISSN: 2215-2652.

Comité Técnico de Normalización. (1999). UNE 7 061. Piezas y productos cerámicos de arcilla cocida para construcción tales como: ladrillos, bloques, tejas, bovedillas y tableros, en sus aspectos de definiciones, clasificación, especificaciones y métodos de ensayo. Normalización Española.

Conde, A. (2013). Efectos nocivos de la contaminación ambiental sobre la embarazada. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 51(2): 226-238. ISSN: 1561-3003. <http://scielo.sld.cu/pdf/hie/v51n2/hie11213.pdf>.

Cote, M., Martínez, A. (2014). Diseño y fabricación de ladrillo reutilizando materiales a base de PET. *INGE CUC, X*, 10(2): 76-80. ISSN: 0122-6517.

Decreto Supremo 011-2006-VIVIENDA. (2006). NTP E.070 Albañilería. Reglamento Nacional de Edificaciones. <http://jilsac.com/rnc/Albanileria.pdf>.

Delacoste, E. (2015). Ahorro energético en construcciones con cerramientos de mampuestos no convencionales. Universidad Nacional de Córdoba.

Día del Pollo a la Brasa: ¿Cuántas pollerías hay en todo el Perú? (21 de julio de 2019). El Comercio. Redacción EC, p. 1. <https://elcomercio.pe/economia/peru/dia-pollo-brasa-pollerias-peru-domingo-21-julio-peru-noticia-656775-noticia/?ref=ecr>.

Echevarría E. (2017). Ladrillos de concreto con plástico PET [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional.

Erazo, R. (2007). Variación de la conductividad térmica con la humedad en materiales de

construcción [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional.

Geyer, R., Jambeck, J., Law, K. (s.f.). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 3(7): 1-2, 2017. <https://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782>.

Gomezcoello, J., Jaya, J. (2012). Análisis comparativo de la contaminación atmosférica producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional.

González, P. (2010). La introducción de hornos ecológicos en una comunidad ladrillera: Factores de adopción y resistencia al cambio tecnológico. [Tesis de Maestría, El Colegio de la Frontera Norte]. Repositorio Institucional.

Leiva, D. (2017). Ladrillos ecológicos: una estrategia didáctica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. ISSN: 2174-6486.

Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación de Bolivia. (2002). Informe de Gestión 2002. Artes Gráficas Sagitario.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. (2020). Evolución mensual del precio promedio de materiales de construcción, 2014 - 2020. Oficina de Estudios Estadísticos y Económicos.

Ministerio del Ambiente del Perú. (2013). Informe Nacional de la Calidad del Aire. MINAM.

Montoto T, E Rojo. (2017). Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global. *Ecologistas en Acción*. ISBN: 978-84-946151-9-1.

Omil B. (2007). Gestión de cenizas como fertilizante y enmendante de plantaciones

jóvenes de *Pinus radiata* [Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela]. Repositorio Institucional.

Resolución Directoral N° 010-2015-INACAL/DN. (2015). NTP 331.017 - Unidades de albañilería. Dirección de Normalización. <https://toaz.info/doc-viewer>.

Rivera, N. (2019). Sistema de transformación y reutilización de residuos plásticos. Proyecto de Grado. Universidad El Bosque.

Rojas T. (10 de enero de 2016). El Colombiano. <http://www.elcolombiano.com/especiales/que-hacercon-la-basura/colombia-entierra-millones-de-pesos-por-no-reciclar-FD3410601>

Tirado L. (2021). Aprovechamiento de residuos sólidos plásticos PET para la construcción de una habitación ecológica en Tacna. *Arquitek*, (18), 10-18.

<https://doi.org/10.47796/ra.2020i18.435>.

United States Environmental Protection Agency. (abril de 2019). United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.sa.gov.au/files/4771336_guide_waste_definitions.pdf.

Un 85% de pollerías usa carbón de origen prohibido. (17 de marzo de 2019). El Tiempo. El Diario de Piura, p. 1. <https://eltiempo.pe/un-85-de-pollerias-usa-carbon-de-origen-prohibido-rv/>.