

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

TESIS:

DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS ARTESANALES E INDUSTRIALES EN LA CIUDAD DE JAÉN – PERÚ

Para optar el Grado Académico de

MAESTRO EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL

Presentado por:

JOSÉ JOSHIMAR JIMÉNEZ IBÁÑEZ

Asesor:

M.Sc. VITOY BECERRA MONTALVO

Cajamarca, Perú

2025



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:

José Joshimar Jiménez Ibañez

DNI: 71068609

Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Maestría en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental

2. Asesor: M.Sc. Vitoly Becerra Montalvo

3. Grado académico o título profesional

Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor

4. Tipo de Investigación:

Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:

Determinación de la huella hídrica en la producción de ladrillos artesanales e industriales en la ciudad de Jaén – Perú.

6. Fecha de evaluación: **19/12/2025**

7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)

8. Porcentaje de Informe de Similitud: **9%**

9. Código Documento: **1: 3448790637**

10. Resultado de la Evaluación de Similitud:

APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **19/12/2025**

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*

M.Sc. Vitoly Becerra Montalvo
DNI: 27727452

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2025 by
JOSÉ JOSHIMAR JIMÉNEZ IBAÑEZ
Todos los derechos reservados



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 5 pm horas, del dia 28 de octubre del dos mil veinticinco, reunidos en el Aula 1Q-205 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ, M.B.A. SANTIAGO DEMETRIO MEDINA MIRANDA, M.Cs. LUIS DÁVILA ESTELA**, y en calidad de Asesor el **M.Sc. VITOY BECERRA MONTALVO**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **"DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS ARTESANALES E INDUSTRIALES EN LA CIUDAD DE JAÉN - PERÚ"**, presentada por el Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Forestal y Ambiental, **JOSÉ JOSHIMAR JIMÉNEZ IBÁÑEZ**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó aprobada con la calificación de discente (16) la mencionada Tesis; en tal virtud, el Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Forestal y Ambiental, **JOSÉ JOSHIMAR JIMÉNEZ IBÁÑEZ**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS** Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las 5 pm horas del mismo dia, se dio por concluido el acto.


.....
M.Sc. Vitoly Becerra Montalvo
Asesor


.....
Dr. Jimy Frank Oblitas Cruz
Jurado Evaluador


.....
M.B.A. Santiago Demetrio Medina Miranda
Jurado Evaluador


.....
M.Cs. Luis Dávila Estela
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado para todos los valientes que han decidido dedicar su vida, su tiempo y su trabajo y a todo aquel que cada día intentan hacer un mundo mejor. En especial para todas aquellas organizaciones e instituciones que trabajan en cooperación al desarrollo de nuevas tecnologías ambientales en favor de la conservación del planeta. Para todos los que dedican su tiempo a mejorar la vida de aquellos que por el mero hecho de nacer en otro lugar no tienen acceso a los mismos derechos que el mundo “desarrollado” ofrece.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por iluminar mi camino, fortalecerme espiritualmente y brindarme la perseverancia necesaria para alcanzar esta meta.

A todas las personas que me acompañaron en este proceso, por sus palabras motivadoras, sus consejos, sus conocimientos y su apoyo incondicional, que fueron fundamentales para la culminación de este sueño.

A mi familia, pilar esencial de mi vida, y en especial a mis padres, cuyo amor, paciencia y comprensión han sido motor de arranque y fuente constante de inspiración.

El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza. Sin embargo, su agotamiento amenaza la
existencia misma de nuestras civilizaciones

Leonardo Da Vinci

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIACIONES	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Bases teóricas.....	8
2.2.1. Teoría de la huella hídrica.....	8
2.2.2. Teoría del ciclo de vida de un producto.....	11
2.2.3. Metodología para determinar la huella hídrica.	11
2.2.4. Teoría de la producción de ladrillos.....	15
2.2.5. Medición de la humedad del suelo.....	19
2.2.6. Medición del caudal.....	20
CAPÍTULO III.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Ubicación geográfica.....	21
3.2. Materiales y equipos	23
3.2.1. Materiales y Equipos de campo	23
3.2.2. Materiales y equipos de gabinete.....	23
3.3. Metodología	23
3.3.1. Unidad de análisis, población y muestra.....	23

3.3.2. Tipo y diseño de la investigación.....	24
3.3.3. Recopilación de datos	24
3.3.4. Técnicas de procesamiento de datos	47
CAPÍTULO IV	51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1. Resultados.....	51
4.1.1. Huella hídrica del ladrillo artesanal	51
4.1.2. Huella hídrica de ladrillo industrial.....	59
4.1.3. Comparación de las huellas hídricas de ladrillo artesanal e industrial.	67
4.2. Discusión	70
CAPITULO V.....	74
CONCLUSIONES.....	74
CAPITULO VI.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA	75
CAPITULO VII	80
ANEXOS.....	80
7.1. Resultados de la Huella hídrica azul	80
7.2. Panel fotográfico	81
7.3. Ficha técnica de ladrillos LAGT.....	83
7.4. Panel fotográfico de ladrillera artesanal.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Suma de cadenas	13
Figura 2. Enfoque secuencial acumulativo	14
Figura 3. Etapas de la actividad ladrillera.....	17
Figura 4. Ubicación de las ladrilleras en la ciudad de Jaén	22
Figura 5. Tamizado de la arcilla	28
Figura 6. Mezcla homogénea de arcilla	29
Figura 7. Colocación de arcilla en moldes para ladrillos artesanales.	30
Figura 8. Secado artesanal de ladrillos	31
Figura 9. Cocción de los ladrillos artesanales.....	32
Figura 10. Preparación de arcilla para ladrillos industriales.....	35
Figura 11. Chancado de la arcilla para elaborar el ladrillo industrial.....	36
Figura 12. Mezclado de la arcilla para ladrillo industrial.	36
Figura 13. Máquina de moldeado y cortado de ladrillo húmedo	37
Figura 14. Transporte de ladrillos a la cámara de secado	38
Figura 15. Ingreso del ladrillo fresco al horno industrial	38
Figura 16. Apilado de ladrillos terminados	39
Figura 17. Flujograma de la producción de ladrillos artesanales	41
Figura 18. Flujograma de la producción de ladrillos industrial.....	43
Figura 19. Extracción de muestras de arcilla.....	45
Figura 20. Pesado del ladrillo artesanal	46

Figura 21. Huellas hídricas de los ladrillos artesanales e industriales.....68

Figura 22. Porcentajes de las huellas hídricas de los ladrillos artesanales69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM de las ladrilleras artesanal e industrial	21
Tabla 2. Agua presente en la arcilla.....	52
Tabla 3. Contenido de humedad de la arcilla.....	53
Tabla 4. Peso seco de ladrillos	54
Tabla 5. Contenido de humedad de ladrillos.....	55
Tabla 6. Caudal del suministro de agua	56
Tabla 7. Dimensiones de ladrillos artesanales	58
Tabla 8. Cantidad de agua de la materia prima.....	60
Tabla 9. Contenido de humedad de la materia prima	61
Tabla 10. Peso seco de ladrillos	62
Tabla 11. Promedio de contenido de contenido de agua.....	63
Tabla 12. Caudal del suministro de agua	64
Tabla 13. Dimensiones del ladrillo industrial	66
Tabla 14. Prueba de T- Student de las huellas hídricas de cada tipo de ladrillo.....	67
Tabla 15. Porcentajes de huella hídrica	68
Tabla 16. Huella hídrica por tonelada de ladrillos	69
Tabla 17. Huella hídrica de pared estructural	70
Tabla 18. Resultados de la Huella hídrica azul.....	80

LISTA DE ABREVIACIONES

CL: Cantidad de ladrillos

HH: Huella hídrica

HHV: Huella hídrica Verde

HHA: Huella hídrica Azul

HHprod: Huella hídrica de un producto

SENCICO: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la huella hídrica en la producción de ladrillos considerando una ladrillera artesanal y otra industrial ubicadas en la ciudad de Jaén, determinando los valores correspondientes a cada sistema y comparando sus resultados. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y de tipo descriptivo. La metodología se basó en los lineamientos del *Manual de Evaluación de la Huella hídrica*, que considera la identificación de los puntos de consumo de agua en cada etapa del proceso productivo y el cálculo de las huellas verde y azul. Para ello, se describieron las etapas de elaboración de ambos modelos de producción, determinando el uso de agua en cada una. Se utilizaron métodos gravimétrico y volumétrico para determinar los volúmenes de agua empleados en cada uno de estos procesos. Los resultados muestran que la Huella hídrica de la producción artesanal es de 1.37 L/ladrillo (0.14 L/ladrillo de huella verde y 1.23 L/ladrillo de huella azul), mientras que en la producción industrial es de 0.70 L/ladrillo (0.13 L/ladrillo de huella verde y 0.57 L/ladrillo de huella azul). Se evidenció que la Huella hídrica verde presenta valores similares en ambos sistemas, con una diferencia mínima de 0.01 L/ladrillo, mientras que la Huella hídrica azul muestra una diferencia más marcada de 0.66 L/ladrillo entre la producción artesanal e industrial.

Palabras clave: Huella hídrica, ladrillos artesanales, ladrillos industriales.

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the Water Footprint in brick production, considering one artisanal and one industrial brick factory located in the city of Jaén, determining the corresponding values for each system and comparing their results. The study was conducted under a quantitative and descriptive approach. The methodology was based on the guidelines of the *Water Footprint Assessment Manual*, which includes the identification of water consumption points in each stage of the production process and the calculation of green and blue footprints. The stages of both production models were described to determine the water use in each one. Gravimetric and volumetric methods were applied to measure the volumes of water used in these processes. The results show that the Water Footprint of artisanal production is 1.37 L/brick (0.14 L/brick of green footprint and 1.23 L/brick of blue footprint), while in industrial production it is 0.70 L/brick (0.13 L/brick of green footprint and 0.57 L/brick of blue footprint). It was observed that the green Water Footprint presents similar values in both systems, with a minimal difference of 0.01 L/brick, whereas the blue Water Footprint shows a more significant difference of 0.66 L/brick between artisanal and industrial production.

Keywords: water footprint, artisanal bricks, industrial bricks.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El agua ha sido un recurso esencial para el desarrollo y progreso de la humanidad, al posibilitar el surgimiento de la agricultura, el comercio y las primeras ciudades. Su disponibilidad ha impulsado el avance tecnológico, industrial y urbano, consolidándose como un elemento vital para el bienestar y la supervivencia. En la actualidad, la creciente presión sobre los recursos hídricos debido al aumento poblacional, la expansión urbana y el cambio climático ha convertido la gestión sostenible del agua en un desafío prioritario. Según la UNESCO (2019), la rápida urbanización y el incremento de la demanda de agua agravan los problemas de escasez y contaminación, lo que exige estrategias que garanticen su uso eficiente y equitativo.

En el caso del Perú, el Gobierno (2023) advierte que el país enfrenta un alto riesgo de vulnerabilidad hídrica, estimándose que para el año 2030 más del 58% de la población residirá en zonas con escasez de agua. Este escenario resalta la urgencia de implementar políticas y herramientas que aseguren la disponibilidad, calidad y sostenibilidad del recurso hídrico, condición indispensable para el desarrollo social y económico.

En este contexto, la huella hídrica (HH) se presenta como una herramienta clave para evaluar el impacto ambiental asociado al uso del agua en las actividades humanas. Este indicador permite identificar los puntos críticos de consumo y contaminación, optimizar procesos productivos y fomentar un aprovechamiento más sostenible del recurso. Según Zhuo et al. (2020), su aplicación resulta particularmente relevante en el sector de materiales de construcción, como la producción de ladrillos, donde se cuantifica el volumen de agua utilizada

directa e indirectamente desde la extracción de materias primas hasta el almacenamiento del producto final.

En la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca, la producción de ladrillos constituye una actividad económica de importancia, desarrollada tanto de forma artesanal como industrial. Sin embargo, los procesos artesanales suelen carecer de control en el uso del agua, lo cual adquiere relevancia frente a la creciente presión sobre los recursos hídricos causada por la expansión urbana, la variabilidad climática y la limitada disponibilidad de fuentes. En este sentido, evaluar y comparar la huella hídrica en ambas modalidades productivas permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales. A partir de ello, la investigación se formuló la siguiente pregunta: ¿cuál presenta una mayor huella hídrica: el ladrillo elaborado artesanalmente o el ladrillo elaborado de forma industrial en la ciudad de Jaén?. Como hipótesis, se planteó que la producción artesanal registra una huella hídrica superior a la industrial.

Esta investigación se enmarca dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas, principalmente en el ODS 6 “Agua limpia y saneamiento”, al promover el uso eficiente y responsable del recurso hídrico; el ODS 12 “Producción y consumo responsables”, al contribuir a la evaluación de procesos productivos sostenibles; y de forma complementaria, los ODS 9, 13 y 15, vinculados con la innovación industrial, la acción por el clima y la gestión sostenible de los ecosistemas terrestres.

La importancia del presente estudio radica en comprender el impacto del sector ladrillero sobre el recurso hídrico en la ciudad de Jaén, donde la creciente demanda de materiales de construcción impulsa la expansión de ladrilleras artesanales e industriales. Estas actividades, aunque esenciales para el desarrollo urbano y económico, ejercen presión sobre un recurso limitado y vital. Evaluar la huella hídrica en este contexto permite cuantificar el

consumo de agua y su eficiencia en el proceso, aportando información relevante para una gestión más sostenible.

El objetivo general de la investigación fue evaluar la huella hídrica en la producción de ladrillos en la ciudad de Jaén, mientras que los objetivos específicos fueron: (1) determinar la huella hídrica en la elaboración de ladrillos artesanales, (2) determinar la huella hídrica en la elaboración de ladrillos industriales y (3) comparar la huella hídrica de ambos sistemas de producción.

La metodología se basó en los lineamientos del Manual de Evaluación de la Huella Hídrica de Hoekstra et al. (2011), cuantificando los componentes verde y azul a lo largo de las etapas del proceso, desde la extracción de materias primas hasta la cocción y almacenamiento. Se emplearon métodos gravimétrico y volumétrico para determinar los volúmenes de agua utilizados en cada etapa, lo que permitió identificar las diferencias en el impacto hídrico entre las modalidades productivas artesanal e industrial.

Finalmente, la tesis se estructura en siete capítulos: el Capítulo I, Introducción, presenta la problemática y el procedimiento general de la investigación; el Capítulo II, Marco Teórico, expone los modelos, teorías y conceptos relacionados con el estudio; el Capítulo III, Materiales y Métodos, describe el proceso seguido en cada etapa; el Capítulo IV, Resultados y Discusión, analiza e interpreta los hallazgos; el Capítulo V, Conclusiones y Recomendaciones, presenta los principales aportes del estudio; el Capítulo VI, Referencias Bibliográficas, reúne las fuentes consultadas; y el Capítulo VII, Anexos, incluye los materiales complementarios de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Islam et al. (2023) en su trabajo se centró en la evaluación de las huellas ambientales asociadas con la producción de ladrillos en Bangladesh, destacando tres aspectos clave: las emisiones de dióxido de carbono, el consumo de agua y el uso de la tierra. La huella hídrica de la producción de ladrillos en Bangladesh se estima en aproximadamente 49.70 Mm³ en 2006 a alrededor de 115.54 Mm³ en 2020. Se determinó que el consumo indirecto de agua es aproximadamente el doble que el consumo directo, lo que es significativo en términos de la huella hídrica total de la producción de ladrillo. Se estima que para el año 2030 la huella hídrica será 189.47 Mm³, esto representa un aumento significativo en comparación con los años anteriores, y se menciona que esta área de captación de agua será aproximadamente el 0.43%.

Ma et al. (2022) en estudio sobre la huella ambiental de la producción de azulejos cerámicos en China, desde la perspectiva del nexo energía-carbono-agua, reporta que la producción de 1 m² de azulejos cerámicos tiene un impacto significativo en la degradación del agua, particularmente en la ecotoxicidad del agua dulce, con emisiones de contaminantes del suelo y aire contribuyendo en más del 40% a esta huella de degradación del agua. Cuantitativamente, la producción de 1 m² de azulejo tiene una huella de energía de 4.26 kg de equivalentes de petróleo y una huella de carbono de 16.78 kg de CO₂ equivalentes, mientras que la huella de escasez de agua se refleja en un consumo de entre 0.79 y 1.23 L de agua por m² producido. El estudio subraya la necesidad de optimizar el sistema energético para reducir estos impactos, sugiriendo el uso de energías limpias, la reducción de emisiones de CO₂, metano y metales pesados, y una transición gradual y selectiva de políticas de carbón a gas, así como mejorar la gestión de la cadena de suministro para reducir el impacto ambiental total.

En el artículo científico presentado por Barros et al. (2022), titulado “Indicadores de sostenibilidad ambiental de una mina de arcilla en La Guajira (Colombia)”, se investigó el estado ambiental de una mina artesanal dedicada a la explotación de arcilla en Manaure. El estudio se enfocó en un diagnóstico ambiental de la mina utilizando tres tipos de indicadores clave: 1) huella ecológica, 2) huella de carbono y 3) huella hídrica. El análisis detallado permitió evaluar el impacto ambiental de las actividades mineras en estos tres ámbitos. Los resultados revelaron que la producción mensual de 12 000 ladrillos en esta mina artesanal consumía un total de 40 728 L de agua. Esto llevó a la conclusión de que la huella hídrica azul, que mide el volumen de agua dulce consumida era de 3.4 L por ladrillo producido. Además, la investigación proporcionó una visión integral sobre cómo las prácticas de extracción de arcilla afectaban los recursos naturales y ofreció datos cruciales para desarrollar estrategias de sostenibilidad ambiental en la región. Este estudio no solo cuantificó el impacto ambiental, sino que también destacó la necesidad de implementar prácticas más sostenibles en la industria de la minería artesanal de arcilla.

Ahmad et al. (2022), en su estudio sobre la industria de baldosas en Pakistán, específicamente en la provincia de Khyber Pakhtunkhwa, se investigó la huella hídrica de la producción de baldosas en el pequeño polígono industrial de Mardan (SIEM) durante 2017-2018, utilizando un enfoque de ciclo de vida desde el extracción hasta la entrega, determinó que la huella hídrica en el sitio de extracción se calculó en 0.533148 m³/t, en las unidades de procesamiento, la HH fue de 2.601784 m³/t, y durante la construcción o durante el uso, fue de 0.416269 m³/t, respectivamente. La huella hídrica total de una tonelada de baldosas terminadas desde la cuna hasta la puerta fue de 3.627151 m³/t.

Correia (2019) en su trabajo abordó la huella hídrica en el contexto de la producción de bloques cerámicos en una fábrica de cerámica roja en Ceará, Brasil. La investigación se centró en la medición y el análisis del consumo de agua durante el proceso de producción,

considerando la variabilidad estacional de la precipitación en la región, que afectaba la disponibilidad de agua para el humedecimiento del barro. El estudio se llevó a cabo durante un período de 15 días, de los cuales 11 correspondieron a la producción efectiva de bloques. Se registró un consumo total de 14 780 L de agua para la producción de 191 000 bloques, lo que permitió calcular la huella hídrica azul asociada a este proceso. Se determinó que la huella hídrica azul para la producción de un bloque cerámico de 8 huecos era de aproximadamente 0.035 m³ por tonelada. Por bloques la huella hídrica azul en la producción es de 0.077382 L, y cada bloque cerámico pesa un promedio de 2.2 kg.

Skouteris et al (2018) en su estudio sobre la fabricación de ladrillos, se investigó la intensiva demanda de agua en esta industria y se buscó desarrollar una herramienta analítica rigurosa basada en principios de huella hídrica y técnicas de análisis de pinzas de agua para optimizar el consumo de agua. El estudio cuantificó la huella hídrica total de un ladrillo, que se determinó en 2.02 L, desglosada en 1.71 L de agua azul (84.8%) y 0.31 L de agua verde virtual (15.2%). Además, se encontró una huella de agua gris teórica de 1.3 L, valor que habría sido mayor sin el tratamiento previo de aguas residuales en el sitio. Para reducir la huella hídrica del ladrillo, se aplicaron técnicas de análisis de pinzas de agua en los procesos de fabricación. Se exploraron dos esquemas de recuperación de agua: el reuso/reciclaje directo y la regeneración de agua. El esquema de reuso/reciclaje directo redujo la huella hídrica en un 15.6%, mientras que el esquema de regeneración de agua mejoró el valor actual en un 56.4%. El estudio demostró que la integración de técnicas de pinzas de agua con conceptos de huella hídrica proporciona una herramienta efectiva para la gestión sostenible del agua en la industria de fabricación de ladrillos.

En el trabajo de Octavia et al. (2017) realizado en PT. XYZ, una empresa indonesia dedicada a la fabricación de tejas y bloques de pavimentación, se abordaron aspectos ambientales y de salud humana que habían sido descuidados. La investigación identificó que

la empresa utilizaba y descartaba grandes cantidades de agua durante el proceso de producción sin implementar tratamiento para el agua residual. Se propuso determinar los impactos ambientales y de salud humana asociados a estos procesos a través de la evaluación de la huella hídrica (WFA) y la evaluación del ciclo de vida (LCA). Se calculó que la producción de una teja de concreto requería 21.384 L de agua (16.433 L de agua azul y 4.951 L de agua gris), mientras que la producción de un ladrillo consumía 10.496 L (10.48 L de agua azul y 0.016 L de agua gris). Utilizando el método ReCiPe midpoint (H), se encontró que las categorías de impacto predominantes eran la transformación natural del suelo, la eco-toxicidad marina, la eutrofización y la eco-toxicidad de aguas dulces, que representaban el 75.5% del impacto total para los productos evaluados.

Edvaldo y Ricardo (2017) en su estudio, se centraron en la huella hídrica en la fabricación de tejas cerámicas, con especial atención a la teja cerámica portuguesa. Demostró los procesos de producción y ejemplificó aquellos en los que hubo consumo de agua. Mediante cálculos realizados, se evidenció que la huella hídrica para la producción de una tonelada de tejas fue de 0.381 m³/t y que la huella hídrica de una teja cerámica fue de 0.91 litros/teja. La mayor contribución para alcanzar estos valores fue generada por el componente Azul de la huella hídrica.

En su investigación sobre la huella hídrica en la industria del cuero y la fabricación de ladrillos en India, Irfan y Mondal (2016) destacaron varios aspectos clave que sirvieron como antecedentes para comprender el impacto ambiental de estas actividades. Determinaron que una ladrillera en Bengala Occidental produce entre 12 000 y 15 000 ladrillos por día, utilizando un promedio diario de alrededor de 5 000 L de agua. Con una producción promedio de 13 500 ladrillos al día, se concluyó que la huella hídrica era de 0.37 L por ladrillo. Además, el estudio reveló la alta dependencia del agua en estos procesos industriales y resaltó la variabilidad en el consumo de agua entre diferentes ladrilleras. Estos hallazgos subrayaron la necesidad urgente

de implementar prácticas de gestión sostenible del agua y de buscar soluciones para reducir el impacto ambiental de la industria de la fabricación de ladrillos, contribuyendo así a una mejor planificación y conservación de los recursos hídricos en la región

Rincón et al. (2016), en su investigación sobre la producción de ladrillos en Boyacá, incluyeron un análisis detallado del consumo de agua en el proceso de fabricación. Indicaron que, en el caso de Colombia, hay alrededor de 1 500 a 2 000 hornos que producen un estimado de 350 000 t de ladrillos al mes. Determinaron que el consumo de agua se obtuvo mediante encuestas en las ladrilleras y se encontró que para un promedio de producción de 15 000 ladrillos se consumen 5 000 L de agua, lo que se traduce en que producir un ladrillo consume 0.333 L de agua.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Teoría de la huella hídrica

La teoría de la huella hídrica, desarrollada por Hoekstra (2011), propone un marco conceptual para cuantificar el volumen total de agua dulce consumida y contaminada directa o indirectamente en la producción de bienes y servicios. Esta teoría considera que toda actividad productiva ejerce presiones sobre el recurso hídrico y que su medición debe incluir tanto los volúmenes visibles como los procesos ocultos dentro de la cadena de suministro. Asimismo, incorpora el lugar y el momento donde se emplea el agua, lo que permite una evaluación más precisa de los impactos ambientales asociados (Hoekstra et al., 2011).

2.2.1.1. Huella hídrica verde

La teoría de la huella hídrica verde establece que parte del consumo hídrico de un producto proviene del agua de lluvia almacenada en el suelo y utilizada por cultivos o cobertura vegetal. Este concepto es especialmente relevante en actividades agrícolas, donde la humedad

natural del suelo aporta una fracción significativa del recurso hídrico involucrado en la producción. Según Skouteris et al. (2018), la inclusión de esta componente permite dimensionar con mayor exactitud la dependencia de la actividad productiva respecto a los ciclos hidrológicos naturales.

2.2.1.2. Huella hídrica azul

La huella hídrica azul se refiere al agua superficial y subterránea que es extraída y consumida durante un proceso productivo. Este consumo implica que el agua no retorna a la misma fuente o lo hace en condiciones distintas. Para Hoekstra et al. (2011), este componente refleja la presión directa ejercida sobre los cuerpos de agua disponibles, por lo que su cuantificación es esencial para identificar riesgos de escasez hídrica en zonas de alta demanda o baja disponibilidad.

2.2.1.3. Huella hídrica gris

La Teoría de la Huella Hídrica Gris plantea que parte del impacto hídrico de un producto proviene del agua necesaria para diluir los contaminantes generados durante su proceso productivo hasta alcanzar estándares de calidad ambiental. Este enfoque incorpora explícitamente la contaminación como un componente del uso del agua, permitiendo analizar la carga que los procesos productivos imponen sobre los ecosistemas (Skouteris et al., 2018).

2.2.1.4. Huella hídrica de un producto

La Teoría de la Huella Hídrica de un Producto integra los tres componentes descritos (verde, azul y gris) a lo largo de todo el ciclo de vida del bien. Se define como el volumen total de agua utilizado y contaminado en todas las etapas que conducen a la obtención del producto final. Esta teoría resalta que la medición debe considerar espacialidad y temporalidad, reconociendo que el impacto depende del lugar y la época en que se demanda el recurso (Skouteris et al., 2018).

2.2.1.5. Huella hídrica en empresas

De acuerdo con Hoekstra et al. (2011), la huella hídrica de una empresa representa el volumen total de agua dulce consumida o contaminada en el desarrollo de sus actividades, tanto de forma directa como indirecta. Este indicador se divide en dos componentes principales: la huella hídrica operacional, que corresponde al agua consumida o contaminada directamente por la empresa en sus procesos productivos, y la huella hídrica de la cadena de suministro, que comprende el agua utilizada en la producción de bienes y servicios que forman parte de los insumos empleados por la organización. Además, los autores señalan la existencia de una huella hídrica de las actividades generales, asociada al agua empleada en el mantenimiento, limpieza o funcionamiento administrativo, sin estar directamente vinculada a la fabricación de un producto específico. En algunos casos, también se considera la huella hídrica de la fase de utilización, referida al consumo o contaminación de agua que ocurre cuando los consumidores emplean los productos de la empresa. Sin embargo, esta última se atribuye principalmente al usuario final y no forma parte directa de la evaluación corporativa de la huella hídrica.

2.2.1.6. Gestión integral de recursos hídricos y huella hídrica

La Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) es un enfoque que promueve la administración coordinada del agua, la tierra y los recursos asociados, con el objetivo de maximizar el bienestar social y económico sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas (Katusiime & Schütt, 2020). Este enfoque reconoce que el agua es un recurso finito y vulnerable, y que su gestión debe considerar de manera integrada las dimensiones ambiental, social, económica y política.

En el contexto latinoamericano, la implementación de la GIRH enfrenta desafíos como la limitada coordinación entre actores, la disponibilidad insuficiente de información y la escasa

participación efectiva de los usuarios del agua. Bezerra et al. (2021) señalan que, aunque existen marcos normativos, el desempeño institucional suele ser débil, lo que restringe la aplicación plena de la GIRH. Por tanto, traducir este enfoque en acciones efectivas requiere fortalecer la gobernanza, consolidar capacidades institucionales y establecer mecanismos de monitoreo y evaluación permanentes.

Dentro de este marco, la huella hídrica se posiciona como una herramienta técnica clave para operacionalizar la GIRH, ya que permite cuantificar los volúmenes de agua consumidos y contaminados en actividades productivas, identificando las presiones que ejercen sobre los ecosistemas y las fuentes de agua (Hoekstra et al., 2011). Su aplicación en sectores como la producción de ladrillos artesanales e industriales ofrece información precisa que puede integrarse en los sistemas de planificación y gestión del recurso hídrico.

2.2.2. Teoría del ciclo de vida de un producto

La teoría del ciclo de vida sostiene que un producto genera impactos ambientales a lo largo de todas sus etapas: extracción de materias primas, procesamiento, producción, distribución, uso y disposición final. El análisis de ciclo de vida (ACV) cuantifica estos impactos mediante un enfoque sistémico y longitudinal. En el contexto hídrico, la teoría del ciclo de vida es fundamental para la huella hídrica, ya que esta no se limita al agua usada en una etapa específica, sino que considera el consumo y la contaminación acumulada en toda la cadena de valor de un producto (Skouteris et al., 2018). Por ello, la huella hídrica es considerada un indicador basado en el ciclo de vida, lo cual refuerza su uso en la evaluación de productos como los ladrillos artesanales e industriales.

2.2.3. Metodología para determinar la huella hídrica.

La huella hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se usa directa o indirectamente para la producción de un producto. La estimación se realiza

considerando el consumo de agua y la contaminación en todas las etapas de la cadena de producción. El procedimiento contable es parecido al de toda clase de productos, ya sean productos derivados del sector primario, secundario o terciario (Hoekstra et al., 2011).

2.2.3.1. Esquematización del sistema de producción en etapas de un proceso.

Para la estimación de la huella hídrica de un producto es necesario esquematizar el sistema de producción en un número limitado de etapas del proceso. Además, cuando se intenta ir más allá de un análisis superficial basado en medias globales, habrá que especificar las etapas en tiempo y espacio, lo que significa que habrá que localizar el origen del producto (Hoekstra et al., 2011).

2.2.3.2. Medición de la huella hídrica de un producto.

El cálculo de la huella hídrica de un producto consiste en estimar el volumen total de agua consumida y contaminada a lo largo de su ciclo de vida. Según Cruz y Tan (2023), este proceso considera tres componentes principales: agua azul, verde y gris, que representan, respectivamente, el uso de agua superficial o subterránea, el aprovechamiento de agua de lluvia y el volumen necesario para diluir contaminantes. Este análisis permite identificar los puntos críticos de mayor consumo o contaminación y promover estrategias de eficiencia en la gestión del recurso hídrico, contribuyendo así a una producción más sostenible y responsable con el medio ambiente.

2.2.3.3. Enfoque de la suma de cadenas.

Este enfoque es más simple que el siguiente, pero se puede utilizar únicamente en caso de que un sistema de producción genere un producto final. En este caso específico, las huellas hídricas que pueden asociarse con las diferentes etapas del proceso en el sistema de producción

se pueden atribuir por completo al producto resultante del sistema (Hoekstra, et al., 2011). En este simple sistema de producción, la huella hídrica de un producto p (volumen/ masa) es igual a la suma de las huellas hídricas de los procesos relevantes dividida entre la cantidad producida del producto p :

$$HH_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^k HH_{proc}[s]}{P[p]} \quad [\text{volumen/masa}]$$

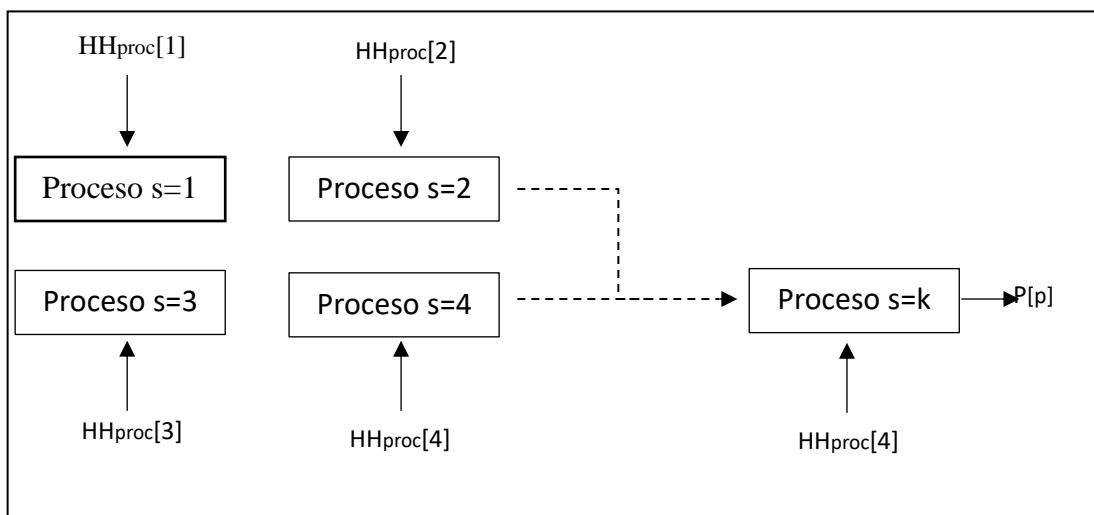
Donde:

$HH_{prod}[s]$: Huella hídrica la etapa s del proceso (volumen/tiempo)

$P[p]$: Cantidad producida del producto p (masa/tiempo)

Figura 1

Suma de cadenas



Nota. Esquematización de suma de sumas de cadenas tomado del Manual de la huella hídrica por Hoekstra et al. (2011)

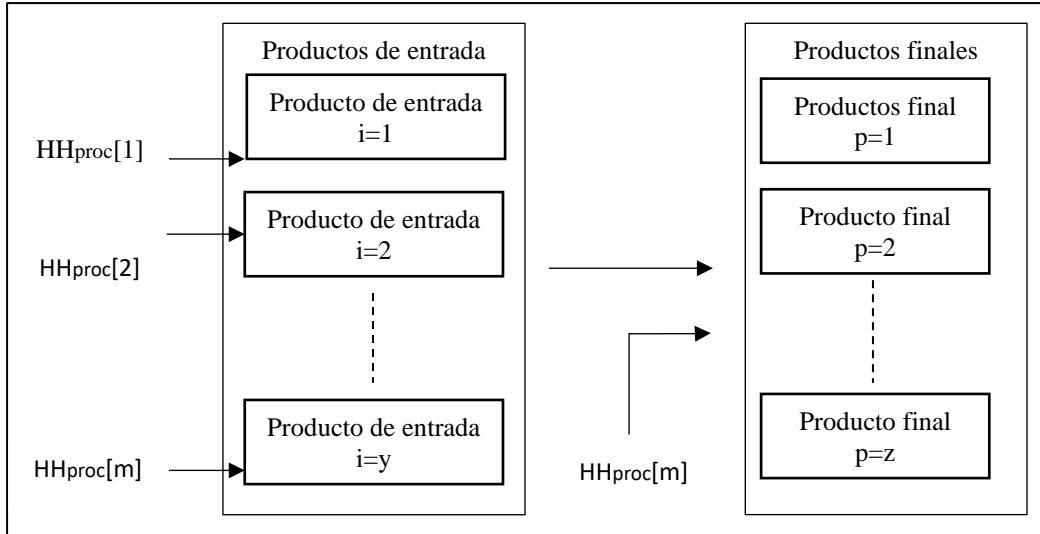
2.2.3.4. Enfoque secuencial acumulativo.

Este enfoque es una forma genérica de calcular la huella hídrica de un producto basado en las huellas hídricas de los productos de entrada que fueron necesarias en la última etapa de

producción para generar el producto final y la huella hídrica de proceso de esa etapa del proceso, según el Manual de Huella Hídrica elaborado por los investigadores como Hoekstra et al. (2011).

Figura 2

Enfoque secuencial acumulativo



Nota. Esquematización del enfoque secuencial acumulativo, tomado de Manual de la Huella Hídrica por Hoekstra et al. (2011)

Si hay agua involucrada en el proceso, la huella hídrica de proceso se añade a las huellas hídricas de los productos de entrada antes de que el total sea distribuido a los diversos productos finales. La huella hídrica de un producto final p se calcula con la siguiente fórmula:

$$HHprod[p] = (HHprod[p] \sum_{i=1}^y HHprod[i]) / (\int p[p, i]) \times \int v[p]$$

[volumen/masa]

Datos:

HHprod [p]: Huella hídrica (volumen/masa) del producto final p .

HHprod [i]: Huella hídrica del producto de entrada i .

HH_{proc} [p]: Huella hídrica de proceso de la etapa del proceso que transforma los productos de entrada y en los productos finales z, expresados en uso de agua por unidad de producto procesado p (volumen/masa).

fp [p, i]: fracción de producto.

fv [p]: fracción de valor.

2.2.4. Teoría de la producción de ladrillos

2.2.4.1. Definición y características

Desde el punto de vista técnico, el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO, 2020) define el ladrillo como una unidad cerámica de dimensiones y peso que permiten su manipulación con una sola mano, elaborada principalmente a base de arcilla moldeada, secada y cocida. Sin embargo, más allá de esta definición técnica, Artola y Valladares (2021) destacan que el ladrillo es un material constructivo con propiedades físicas y térmicas que varían según el tipo de arcilla, el proceso de cocción y las condiciones de fabricación, influyendo directamente en su eficiencia estructural y ambiental. Asimismo, diversos estudios señalan que las características del ladrillo no solo determinan su resistencia y durabilidad, sino también su impacto ambiental, especialmente en lo relacionado con el consumo de agua y energía durante su producción.

2.2.4.2. Tipos de ladrillos

- a) **Ladrillo artesanal.** Los ladrillos artesanales generalmente tienen una forma rectangular estándar. Las dimensiones pueden variar ligeramente debido a la producción manual, pero típicamente siguen tamaños comunes como 20 cm x 10 cm x 5 cm. Es común encontrar ladrillos con hendiduras o ranuras diseñadas para mejorar la adherencia con el mortero (Chicchón & Rivasplata, 2020).

b) **Ladrillo industrial.** Los ladrillos industriales más conocido es el denominado King Kong de 18 huecos, cuyas dimensiones, generalmente son: 9 cm de alto, 13 cm de ancho y 24 cm de largo. La suma de las áreas de los huecos no sea mayor al 30% del área de la cara de asentado del ladrillo (Aceros Arequipa, 2024).

2.2.4.3. Cantidad de ladrillos estructural por m^2

La cantidad de ladrillo (unidad de albañilería) por metro cuadrado para muro dependerá del tipo de aparejo a utilizar y puede ser de será de soga o cabeza, traslapándose las unidades entre las hiladas consecutivas (SENCICO, 2020).

Para calcular la cantidad de ladrillos por metro cuadrado de muros se aplicará la siguiente fórmula (Ramos, 2015):

$$CL = 1/((L + J_h)x(H + J_Y))$$

Donde:

CL: Cantidad de ladrillos por metro cuadrado (m^2)

L : Longitud de ladrillo (m)

J_h : Espesor junta horizontal (m)

H : Altura del ladrillo (m)

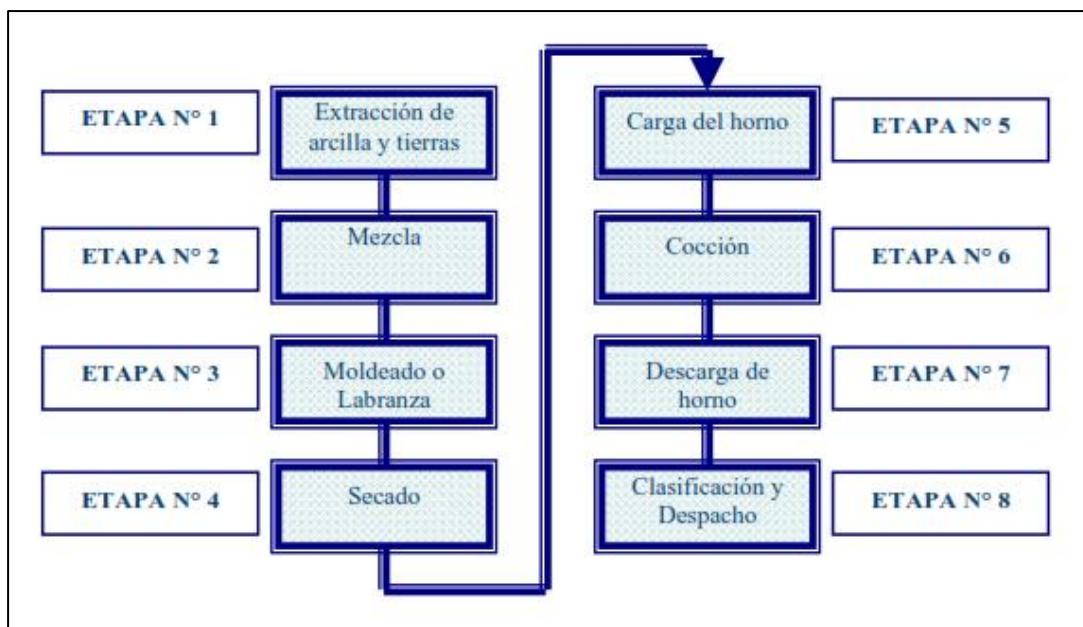
J_y : Espesor junta vertical (m)

2.2.4.4. Etapas de elaboración de ladrillo.

La producción de ladrillos consta de varias etapas de fabricación, siendo la extracción la etapa inicial y la clasificación domo etapa final, tal como lo muestra el diagrama de Flujo general para la actividad ladrillera (Figura 3).

Figura 3

Etapas de la actividad ladrillera



Nota. Secuencia para la elaboración de ladrillo tomado de Ministerio de la Producción (2010).

- a) **Extracción de la arcilla:** Actividad que permite la remoción del material arcilloso proveniente del yacimiento (Del Carpio, 2017). Esta actividad se puede realizar en lugares alejados de la zona de producción o en la misma zona de producción.
- b) **Mezcla:** Primero se hace la mezcla de componentes en seco y luego se agrega agua hasta obtener la masa plástica (Barranzuela, 2014).
- c) **Moldeado:** El proceso de moldeado es realizado a través de moldes ya dimensionados de acuerdo al tipo de ladrillo que se quiere realizar (Cún, 2010)
- d) **Secado:** Los ladrillos se secan aprovechando la acción natural del sol y el viento, El secado se realiza hasta que el ladrillo crudo pierde aproximadamente un 13% de humedad y queda listo para ser cargado al horno (Ministerio de la Producción, 2010).
- e) **Carga del horno:** Primero se arma el “malecón” o arreglo de encendido acomodando los ladrillos secos de manera que, siguiendo el perfil de la ventana de aireación, formen

una bóveda por encima del canal de encendido a todo lo largo del horno (Ministerio de la Producción, 2010).

- f) **Cocción:** Este proceso consiste en someter a los ladrillos previamente secados, a condiciones de alta temperatura por tiempos prolongados en hornos, con el fin de que adquieran sus propiedades mecánicas, físicas y su apariencia final, ya que la arcilla sin cocer tiene propiedades muy bajas (Barranzuela, 2014).
- g) **Descarga del horno:** Una vez que la etapa de cocción finaliza se van abriendo poco a poco las ventilaciones del horno para dejar enfriar los ladrillos de manera gradual. El enfriamiento es de abajo hacia arriba por efecto de las mismas corrientes de aire que han contribuido a la combustión. Antes de proceder con la descarga se espera que el horno se enfríe. En épocas de alta demanda los ladrillos se empiezan a descargar cuando todavía están calientes sin esperar el período de enfriamiento normal (Barranzuela, 2014).
- h) **Clasificación y despacho:** Los ladrillos se descargan y se apilan en los alrededores del horno clasificándolos según el resultado de la cocción; bien cocidos (coloración rojiza intensa y sonido metálico a la percusión, son duros y presentan el grano fino y compacto en su fractura, sus aristas deben ser duras y la superficie lisa y regular), medianamente cocidos o “bayos” (color menos rojizo) y crudos o no cocidos. Estos últimos se tienen que volver a cocer, mientras que los otros son adquiridos por los compradores a precios diferenciados pagándose obviamente menos por aquellos que no están bien cocidos (Ministerio de la Producción, 2010).

2.2.4.5. *Método de elaboración de ladrillos*

A. Elaboración de ladrillo artesanal

Este tipo de ladrillo se produce principalmente de manera manual, donde tanto el amasado como el moldeado se realizan a mano. Cada ladrillo artesanal muestra variaciones únicas debido a la naturaleza manual de su fabricación (Barranzuela, 2014).

B. Elaboración de ladrillo industrial

Este ladrillo se elabora mediante procesos automatizados, utilizando maquinaria para amasar, moldear y prensar o extruir la arcilla. A diferencia del ladrillo artesanal, el ladrillo industrial se caracteriza por su uniformidad en términos de características y dimensiones. Aunque los métodos artesanales y semi-industriales siguen una secuencia de pasos similar, la principal diferencia reside en los equipos, técnicas y herramientas utilizados en su producción (Barranzuela, 2014).

2.2.5. *Medición de la humedad del suelo.*

2.2.5.1. *Método gravimétrico.*

Este método implica recoger una muestra de arcilla, que se pesa inicialmente para determinar su peso húmedo. Luego, la muestra se seca en un horno a una temperatura constante de 105°C hasta alcanzar un peso constante, generalmente durante un período de 24 horas. La diferencia de peso entre la muestra húmeda y la seca permite calcular el contenido de agua en el suelo. Este proceso es crucial para entender la cantidad de agua natural que contribuye a la elaboración de los ladrillos (Castañeda & Murcia, 2023).

$$W(\%) = (W_h - W_s)/W_s \times 100$$

Donde:

W: Contenido de humedad (%)

Wh: Peso húmedo

Ws: Peso seco

2.2.6. *Medición del caudal.*

2.2.6.1. *Método Volumétrico.*

El método volumétrico es una técnica directa y sencilla que permite medir la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo, comúnmente utilizada en aplicaciones hidrológicas y de ingeniería civil. Este método implica la medición del volumen de agua que pasa a través de una sección de un canal o conducto durante un intervalo de tiempo determinado. Se coloca un recipiente de volumen conocido bajo el flujo de agua y se permite que el agua fluya hacia el recipiente durante un tiempo preciso y controlado. Una vez que se alcanza el tiempo deseado, el flujo se detiene o el recipiente se retira (Antenor , 2022). Este método es fácil de implementar y no requiere equipamiento costoso o complejo, siendo muy preciso para flujos pequeños o medianos si se manejan adecuadamente el tiempo y el volumen.

El caudal (Q) se calcula usando la fórmula:

$$Q = V/t$$

donde:

Q es el caudal (volumen por unidad de tiempo).

V es el volumen de agua recogido (en litros o metros cúbicos).

t es el tiempo durante el cual se recogió el agua (en segundos).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica

El presente estudio se realizó en dos ladrilleras. La ladrillera Artesanal “Ladrillera Brayli” la cual se encuentra ubicada en el sector Shanango, y la ladrillera Industrial “Ladrillos LAGT” la cual está ubicada en el sector Yanuyacu Bajo, ambas ladrilleras están situadas en los márgenes de la vía Jaén – San Ignacio, cuyas coordenadas se presentan en la Tabla 1.

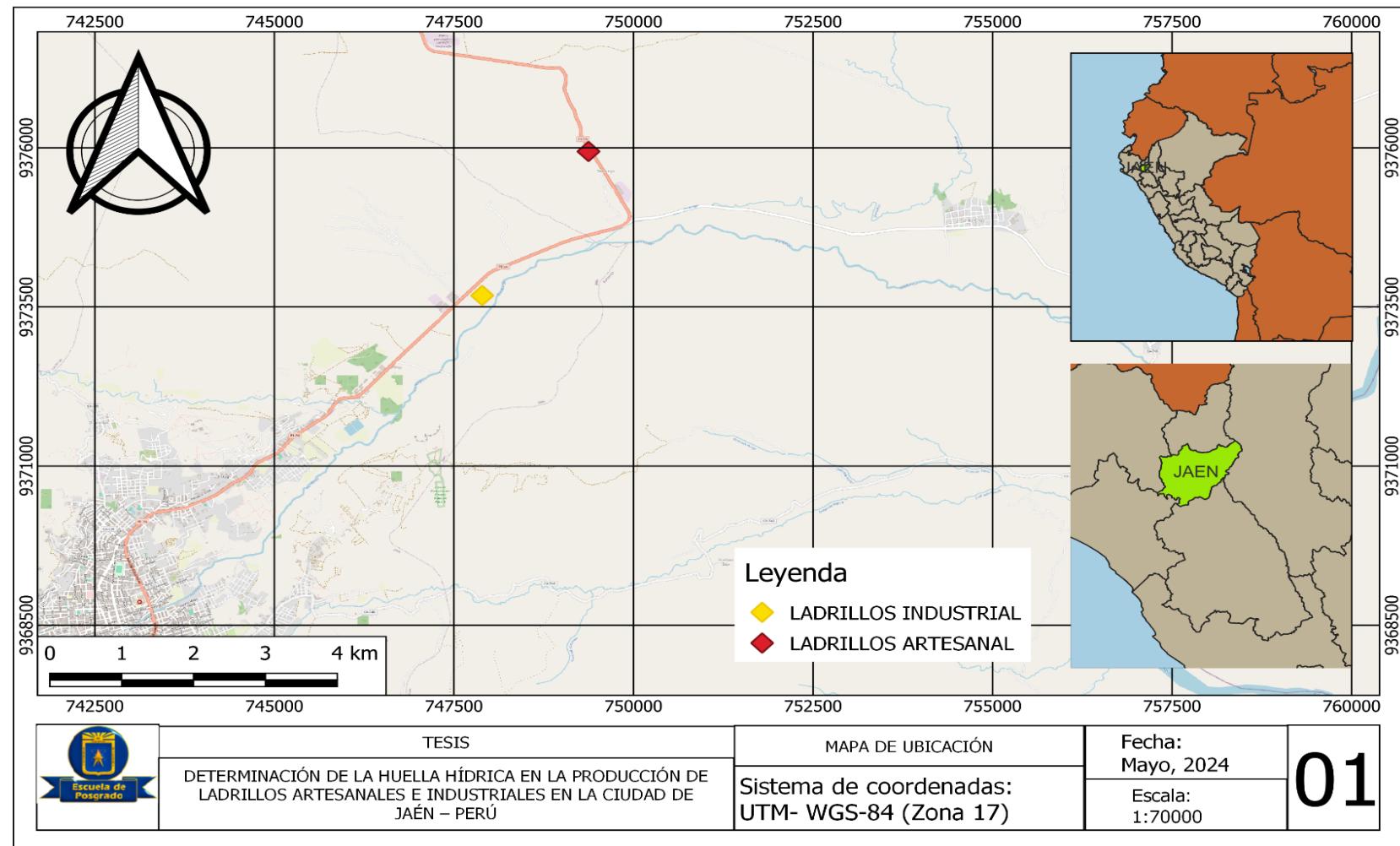
Tabla 1

Coordenadas UTM de las ladrilleras artesanal e industrial

Ladrilleras	Coordenadas UTM	
	Este	Norte
Ladrillera artesanal	749373.68	9375941.84
Ladrillera industrial	747893.69	9373678.74

Figura 4

Ubicación de las ladrilleras en la ciudad de Jaén



3.2. Materiales y equipos

3.2.1. *Materiales y Equipos de campo*

- Libreta: tamaño A5, hojas cuadriculadas, para registro de datos y observaciones.
- Cámara: resolución mínima de 12 MP, con función de macro y zoom óptico 4x.
- Bolsas herméticas: capacidad de 1 L, material plástico grado alimenticio.
- Cooler: capacidad de 15 L, aislamiento térmico de poliestireno expandido.
- Cronómetro: precisión de ± 0.01 s, con función de conteo regresivo
- GPS: precisión horizontal ≤ 3 m, pantalla a color de 2.6", compatible con sistemas GPS
- Balanza analítica: capacidad de 2000 g, precisión de ± 0.0001 g, calibración interna
- Estufa de laboratorio: rango de temperatura entre 40 °C y 250 °C, control digital, circulación de aire forzado,
- Calibrador vernier: rango de medición de 0–150 mm, precisión de ± 0.02 mm, de acero inoxidable

3.2.2. *Materiales y equipos de gabinete*

- Papel Bond
- Tinta para impresora
- Computadora portátil
- Impresora a color
- Memorias USB

3.3. Metodología

3.3.1. *Unidad de análisis, población y muestra*

- **Unidad de análisis:** 10 ladrillos fabricados en ladrilleras artesanales e industriales de la ciudad de Jaén.

- **Población:** 15 000 ladrillos artesanales y 24 960 ladrillos industriales de la ciudad de Jaén.
- **Muestra:** Para el análisis de las características de los ladrillos, se tomaron 10 unidades de cada tipo, seleccionadas aleatoriamente de acuerdo con la Norma E.070, la cual establece que, para lotes de hasta 50 millares de unidades, se deben extraer 10 ladrillos para realizar ensayos de variación de dimensiones, alabeo, resistencia a la compresión y absorción de agua (SENCICO, 2020).
- **Muestreo:** El muestreo aplicado fue no probabilístico por conveniencia, ya que la elección de las ladrilleras no se realizó al azar, sino en función de la accesibilidad al campo y de la disposición de los propietarios a participar en la investigación. De cada unidad productiva se tomaron 10 ladrillos como muestras para la estimación de la huella hídrica. Metodología de investigación

3.3.2. *Tipo y diseño de la investigación*

El diseño de la investigación es de tipo descriptivo con enfoque cuantitativo, dado que busca caracterizar la huella hídrica de la producción de ladrillos artesanales e industriales a través de la recopilación y análisis de datos numéricos. Además, es un estudio no experimental, ya que no se manipulan las variables de estudio, sino que se observan y analizan en su estado natural. Se presentan mediciones detalladas del consumo de agua en cada tipo de producción, diferenciando los componentes de la huella hídrica, con el fin de proporcionar información precisa sobre el impacto hídrico de estos procesos.

3.3.3. *Recopilación de datos*

Se realizaron visitas técnicas a dos unidades productivas del distrito de Jaén: la Ladrillera Brayli (artesanal) y la Ladrillera LAGT (industrial), con el propósito de observar los

procesos productivos, identificar las fuentes y formas de uso del agua, y recolectar muestras representativas para el cálculo de la huella hídrica. El trabajo de campo se desarrolló durante el mes de abril de 2024.

3.3.3.1. Descripción de las etapas de elaboración de ladrillos de cada proceso

En esta sección se describen las etapas de producción de ladrillos tanto artesanales como industriales, desde la extracción de materia prima hasta el almacenamiento del producto final.

A. Ladrillera artesanal

a) Descripción del ladrillo artesanal

El ladrillo artesanal presenta una forma rectangular con bordes ligeramente irregulares, resultado del moldeado manual característico de este tipo de producción. Su color es rojizo anaranjado, producto de la cocción tradicional en hornos de leña, y puede variar según la temperatura alcanzada durante el proceso. Las dimensiones promedio registradas fueron de 7,25 cm de alto, 12,52 cm de ancho y aproximadamente 23.4 cm de largo, con un peso medio de 2803,47 g. La superficie es rugosa y porosa, lo que mejora la adherencia con el mortero durante el asentado. En una de sus caras longitudinales, el ladrillo presenta una depresión rectangular central, formada durante el moldeado, que cumple la función de favorecer el agarre y la unión entre piezas al momento de la instalación

b) Descripción del proceso de fabricación de ladrillos artesanales

• Etapas del proceso de fabricación de ladrillos

El proceso de elaboración de ladrillos comprende una serie de etapas definidas que permiten transformar la arcilla en un producto sólido y resistente. Estas fases incluyen la extracción de materia prima, la preparación y acondicionamiento de la arcilla, la mezcla, el

moldeado, el secado y la cocción del material (Barranzuela, 2014). A continuación, se presentan las principales etapas del proceso:

1. Extracción de materia prima

Consiste en obtener arcilla desde depósitos naturales, que pueden encontrarse a diferentes profundidades según la zona. Esta etapa busca asegurar un suministro adecuado de material base con características físicas y químicas apropiadas para la fabricación de ladrillos.

2. Preparación y acondicionamiento de la arcilla

La arcilla extraída pasa por un proceso de limpieza y eliminación de impurezas. Según el tipo de producción, puede ser sometida a tamizado, trituración o desintegración para obtener una textura más uniforme. En esta fase también pueden incorporarse materiales complementarios (como arena u otros aditivos) para mejorar la trabajabilidad y propiedades del producto.

3. Mezclado

En esta etapa se incorpora agua a la arcilla y se homogeniza la mezcla hasta lograr una consistencia plástica adecuada para el moldeado. El proceso busca asegurar la uniformidad de la masa y la correcta distribución de todos los componentes agregados.

4. Moldeado

La mezcla preparada se conforma en unidades con dimensiones definidas, utilizando moldes o equipos de conformado. Este procedimiento permite dar forma al ladrillo, manteniendo medidas y proporciones estables.

5. Secado

Los ladrillos moldeados se someten a un proceso de reducción gradual de humedad. El secado puede realizarse mediante exposición al ambiente o mediante sistemas controlados, con el fin de evitar deformaciones, fisuras o agrietamientos antes de la cocción.

6. Cocción

Una vez secos, los ladrillos se someten a altas temperaturas en hornos diseñados para este propósito. La cocción modifica la estructura interna del material y otorga resistencia, durabilidad y estabilidad dimensional al producto final.

7. Enfriamiento y almacenamiento

Tras la cocción, los ladrillos deben enfriarse de manera progresiva para evitar tensiones internas. Finalmente, se almacenan y organizan para su distribución o uso posterior.

- **Proceso de fabricación de ladrillos artesanales**

La elaboración de ladrillos de manera artesanal es un proceso tradicional que implica varios pasos manuales, utilizando técnicas y materiales locales. A continuación, se describe brevemente este proceso

1. Extracción de materia prima: La materia prima principal se extrajo manualmente del área cercana a la zona de producción. Este proceso artesanal comenzó con la identificación de depósitos de arcilla adecuados, seguida de la excavación con herramientas manuales como palas y picos. La arcilla extraída se transportó en carretillas hasta el lugar de procesamiento.

2. Preparación de la Arcilla: Una vez extraída, la arcilla se sometió a un proceso de tamizado artesanal para eliminar piedras grandes, raíces y otras impurezas. Este tamizado se realizó utilizando mallas o cribas manuales. En esta etapa también se agrega arena, ceniza y paja o cáscara de arroz, para mejorar las propiedades del ladrillo, como su resistencia y durabilidad (Figura 5).

Figura 5

Tamizado de la arcilla



3. Mezclado: En esta etapa, la arcilla tamizada se le agrega agua. Para iniciar con el proceso de mezclado el cual se realizó manualmente, utilizando herramientas simples como palas y los pies, hasta asegurar una distribución uniforme de los componentes (Figura 6). La mezcla se dejó reposar para asegurar una buena integración de los materiales y facilitar el manejo durante el moldeado. Esta etapa es esencial para obtener la consistencia y la calidad deseadas en los ladrillos finales.

Figura 6

Mezcla homogénea de arcilla



4. Moldeado: La masa de arcilla se colocó en moldes de madera para darle forma de ladrillo. Este proceso se realizó manualmente, asegurando que cada molde estuviera bien compactado para evitar defectos estructurales en los ladrillos. Para evitar que la arcilla se pegara a la madera, los moldes se untaron con ceniza o arena fina antes de cada uso (Figura 7). Una vez llenos, los moldes se nivelaron y se dejó que el exceso de arcilla se desprendiera, garantizando que cada ladrillo tuviera un tamaño y forma consistentes.

Figura 7

Colocación de arcilla en moldes para ladrillos artesanales.



5. Secado: Los ladrillos moldeados se colocaron en áreas de secado al aire libre, conocidas como pampillos, donde se dejaron secar al sol durante varios días. Este paso fue crucial para eliminar el exceso de humedad antes de la cocción. Los ladrillos se dispusieron de manera que permitieran una buena circulación de aire entre ellos, lo que ayudó a reducir el riesgo de agrietamiento. Después del secado inicial en el pampillo, se armaron y alinearon en estructuras diseñadas para maximizar la ventilación (Figura 8). En caso de condiciones climáticas adversas, como lluvia, los ladrillos se cubrieron con telas o materiales impermeables para protegerlos y asegurar un secado uniforme. Este proceso meticoloso garantizó que los ladrillos alcanzaran la consistencia y dureza necesarias para la siguiente etapa de cocción, minimizando defectos y mejorando la calidad final del producto. Además, el secado adecuado contribuyó a la eficiencia del proceso de cocción al reducir el tiempo y la energía necesarios para completar la fabricación de los ladrillos.

Figura 8

Secado artesanal de ladrillos



6. Cocción: Los ladrillos secos se apilaron en hornos tradicionales con una capacidad de 12 500 ladrillos, generalmente de tipo artesanal, construidos con arcilla y ladrillos reciclados (Figura 9). El proceso de cocción implicó la quema de madera, carbón, cascara de arroz u otros materiales combustibles, alcanzando altas temperaturas que endurecieron y fortalecieron los ladrillos. La cocción se prolongó durante varios días hasta 4 días, con una vigilancia constante para mantener la temperatura adecuada y asegurar una cocción uniforme. Este proceso transformó la arcilla cruda en ladrillos duraderos y resistentes, listos para su uso en la construcción.

Figura 9

Cocción de los ladrillos artesanales



7. Enfriamiento y Almacenamiento: Una vez cocidos, los ladrillos se dejaron enfriar gradualmente dentro del horno para evitar grietas y deformaciones causadas por cambios bruscos de temperatura. Después, se retiraron y se almacenaron listos para su uso en la construcción.

B. Ladrillera industrial

a) Descripción del ladrillo industrial

El ladrillo industrial presenta una forma prismática regular, fabricado mediante un proceso mecanizado que garantiza uniformidad en sus dimensiones y propiedades físicas. Posee un color rojo intenso, característico de la cocción controlada en hornos de alta temperatura, lo que asegura una mayor homogeneidad y resistencia estructural. Las dimensiones promedio registradas fueron de 9,15 cm de alto, 12,52 cm de ancho y 22,9 cm de largo, con un peso medio de 2514,48 g. En su cara superior se distribuyen dieciocho perforaciones longitudinales, dispuestas de manera equidistante, que reducen el peso total del

ladrillo y mejoran su comportamiento térmico y acústico. Las superficies laterales son lisas y bien definidas, lo que facilita su manipulación, apilado y adherencia uniforme con el mortero.

b) Descripción del proceso de elaboración de ladrillos industriales

• Etapas del proceso de fabricación de ladrillos

El proceso de elaboración de ladrillos comprende una serie de etapas definidas que permiten transformar la arcilla en un producto sólido y resistente. Estas fases incluyen la extracción de materia prima, la preparación y acondicionamiento de la arcilla, la mezcla, el moldeado, el secado y la cocción del material (Barranzuela, 2014). A continuación, se presentan las principales etapas del proceso:

1. Extracción de materia prima

Consiste en obtener arcilla desde depósitos naturales, que pueden encontrarse a diferentes profundidades según la zona. Esta etapa busca asegurar un suministro adecuado de material base con características físicas y químicas apropiadas para la fabricación de ladrillos.

2. Preparación y acondicionamiento de la arcilla

La arcilla extraída pasa por un proceso de limpieza y eliminación de impurezas. Según el tipo de producción, puede ser sometida a tamizado, trituración o desintegración para obtener una textura más uniforme. En esta fase también pueden incorporarse materiales complementarios (como arena u otros aditivos) para mejorar la trabajabilidad y propiedades del producto.

3. Mezclado

En esta etapa se incorpora agua a la arcilla y se homogeniza la mezcla hasta lograr una consistencia plástica adecuada para el moldeado. El proceso busca asegurar la uniformidad de la masa y la correcta distribución de todos los componentes agregados.

4. Moldeado

La mezcla preparada se conforma en unidades con dimensiones definidas, utilizando moldes o equipos de conformado. Este procedimiento permite dar forma al ladrillo, manteniendo medidas y proporciones estables.

5. Secado

Los ladrillos moldeados se someten a un proceso de reducción gradual de humedad. El secado puede realizarse mediante exposición al ambiente o mediante sistemas controlados, con el fin de evitar deformaciones, fisuras o agrietamientos antes de la cocción.

6. Cocción

Una vez secos, los ladrillos se someten a altas temperaturas en hornos diseñados para este propósito. La cocción modifica la estructura interna del material y otorga resistencia, durabilidad y estabilidad dimensional al producto final.

7. Enfriamiento y almacenamiento

Tras la cocción, los ladrillos deben enfriarse de manera progresiva para evitar tensiones internas. Finalmente, se almacenan y organizan para su distribución o uso posterior.

- **Proceso de fabricación de ladrillos industrial**

La elaboración de ladrillos de manera industrial es un proceso automatizado que utiliza maquinaria avanzada para producir ladrillos de alta calidad en grandes cantidades. A continuación, se describe brevemente este proceso:

1. **Extracción de materia prima:** La materia prima principal, fue extraída de yacimientos naturales utilizando equipos de minería avanzados como excavadoras y cargadoras frontales. Estos equipos permitieron extraer grandes volúmenes de arcilla de manera eficiente y rápida. Una vez extraída, la arcilla fue transportada a la planta de producción

utilizando camiones de gran capacidad, asegurando un suministro constante y abundante para el proceso de fabricación.

2. **Preparación de la arcilla:** Para preparar la materia prima, se utilizó una retroexcavadora para mezclar la arcilla, la arena y la tierra negra de manera eficiente. La retroexcavadora removió y mezcló estos materiales hasta obtener una mezcla homogénea. Una vez que la mezcla alcanzó la consistencia deseada, se trasladó a la tolva utilizando el equipo de carga (Figura 10).

Figura 10

transporte de arcilla para ladrillos industriales



3. **Chancado:** La arcilla preparada pasó por un proceso de chancado en equipos trituradores industriales. Estos trituradores redujeron las partículas grandes a un tamaño mucho más pequeño y uniforme, asegurando una textura fina necesaria para la siguiente etapa del proceso (Figura 11). Este paso fue crucial para obtener una calidad de ladrillo superior, eliminando irregularidades.

Figura 11

Chancado de la arcilla para elaborar el ladrillo industrial



4. **Mezclado:** La arcilla chancada se mezcló nuevamente con agua en amasadoras industriales de alta eficiencia. Estas amasadoras es una mezcladora de 2 ejes, y están equipadas con paletas mezcladoras, para asegurar una integración completa de todos los componentes, resultando en una masa homogénea y de consistencia uniforme, lista para ser moldeada (Figura 12).

Figura 12

Mezclado de la arcilla para ladrillo industrial.



5. **Moldeado:** La mezcla de arcilla fue moldeada utilizando un extrusor industrial, que formó los ladrillos con las dimensiones y formas precisas requeridas. Este proceso fue altamente automatizado, permitiendo la producción de grandes volúmenes de ladrillos con consistencia y precisión (Figura 13). El extrusor forzó la mezcla a través de moldes específicos, cortando los ladrillos a medida mediante la cortadora automática.

Figura 13

Máquina de moldeado y cortado de ladrillo húmedo



6. **Secado:** Los ladrillos moldeados fueron trasladados a cámaras de secado controladas por sistemas automáticos de ventilación y calefacción (Figura 14). Estas cámaras mantuvieron condiciones óptimas de temperatura y humedad, acelerando el proceso de secado y reduciendo el riesgo de grietas y deformaciones. Este secado controlado fue mucho más eficiente que los métodos artesanales, permitiendo una producción continua y rápida.

Figura 14

Transporte de ladrillos a la cámara de secado



7. **Cocción:** Los ladrillos secos fueron colocados en hornos túnel o de cúpula, donde se cocieron a temperaturas muy altas (entre 900 y 1100 °C) durante un período de tiempo cuidadosamente controlado, el cual fue de 39 h y 40 min. Estos hornos industriales permitieron una cocción continua y eficiente, con un control preciso de la temperatura y la atmósfera interna (Figura 15). Este proceso de cocción mejoró significativamente la dureza y durabilidad de los ladrillos.

Figura 15

Ingreso del ladrillo fresco al horno industrial



8. **Enfriamiento y almacenamiento:** Después de la cocción, los ladrillos se enfriaron gradualmente dentro del horno, evitando cambios bruscos de temperatura que pudieran causar grietas. Una vez enfriados, se retiraron del horno mediante sistemas automatizados de transporte y se llevaron a las áreas de almacenamiento. Los ladrillos terminados se apilaron y se prepararon para su distribución y uso en la construcción, asegurando un manejo eficiente y seguro del producto final (Figura 16).

Figura 16

Apilado de ladrillos terminados



3.3.3.2. Determinación de fuentes, uso y destino del recurso hídrico.

Con el propósito de determinar las fuentes y formas de uso del agua en las ladrilleras artesanal e industrial, se realizó la identificación de los puntos donde el recurso hídrico interviene directa o indirectamente en cada etapa del proceso productivo. Asimismo, se evaluó el destino final del agua utilizada, con el fin de identificar posibles pérdidas, reutilización o vertimientos.

Para una mejor comprensión del flujo del agua dentro del proceso, se elaboraron flujogramas para cada tipo de ladrillera, los cuales muestran las etapas de elaboración y los puntos específicos donde ocurre el ingreso o aprovechamiento del recurso hídrico.

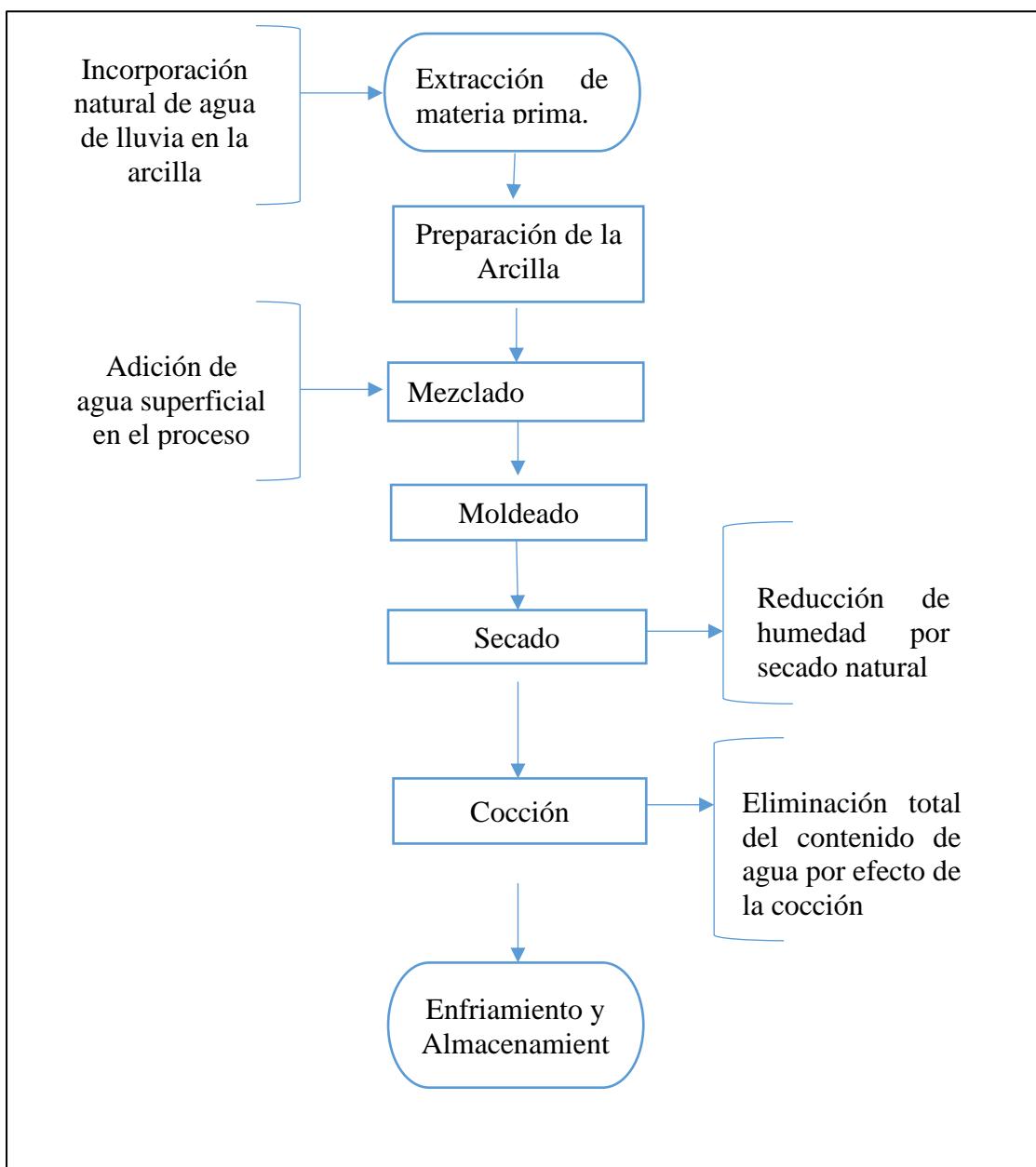
1. Ladrillera artesanal

En la ladrillera artesanal, el proceso productivo se caracteriza por el uso de técnicas tradicionales, con una fuerte dependencia de la mano de obra y un manejo empírico del recurso hídrico.

A continuación, se presenta el flujograma del proceso de producción de ladrillos artesanales, donde se identifican las etapas en las que se utiliza agua y el tipo de fuente involucrada.

Figura 17

Flujograma de la producción de ladrillos artesanales



A. Uso del agua de lluvia

Se llevó a cabo una evaluación para determinar si la ladrillera artesanal aprovechaba el agua de lluvia durante las diferentes etapas de producción de ladrillos. En la ladrillera artesanal se observó que no se almacenaba agua de lluvia para su uso posterior. La única forma en que se aprovecha el agua de lluvia es a través de la humedad natural de la arcilla empleada en el

proceso de producción. Por lo tanto, se determinó únicamente el contenido de humedad presente en la materia prima.

B. Uso del agua superficial

Se evaluó el uso de aguas superficiales en la ladrillera artesanal para identificar en qué etapas del proceso productivo se incorpora este recurso. Se determinó que el agua superficial se emplea únicamente en la etapa de mezclado de la arcilla, proceso en el cual se añade agua para lograr la consistencia plástica adecuada.

C. Evaluación de posibles fuentes de contaminación del agua

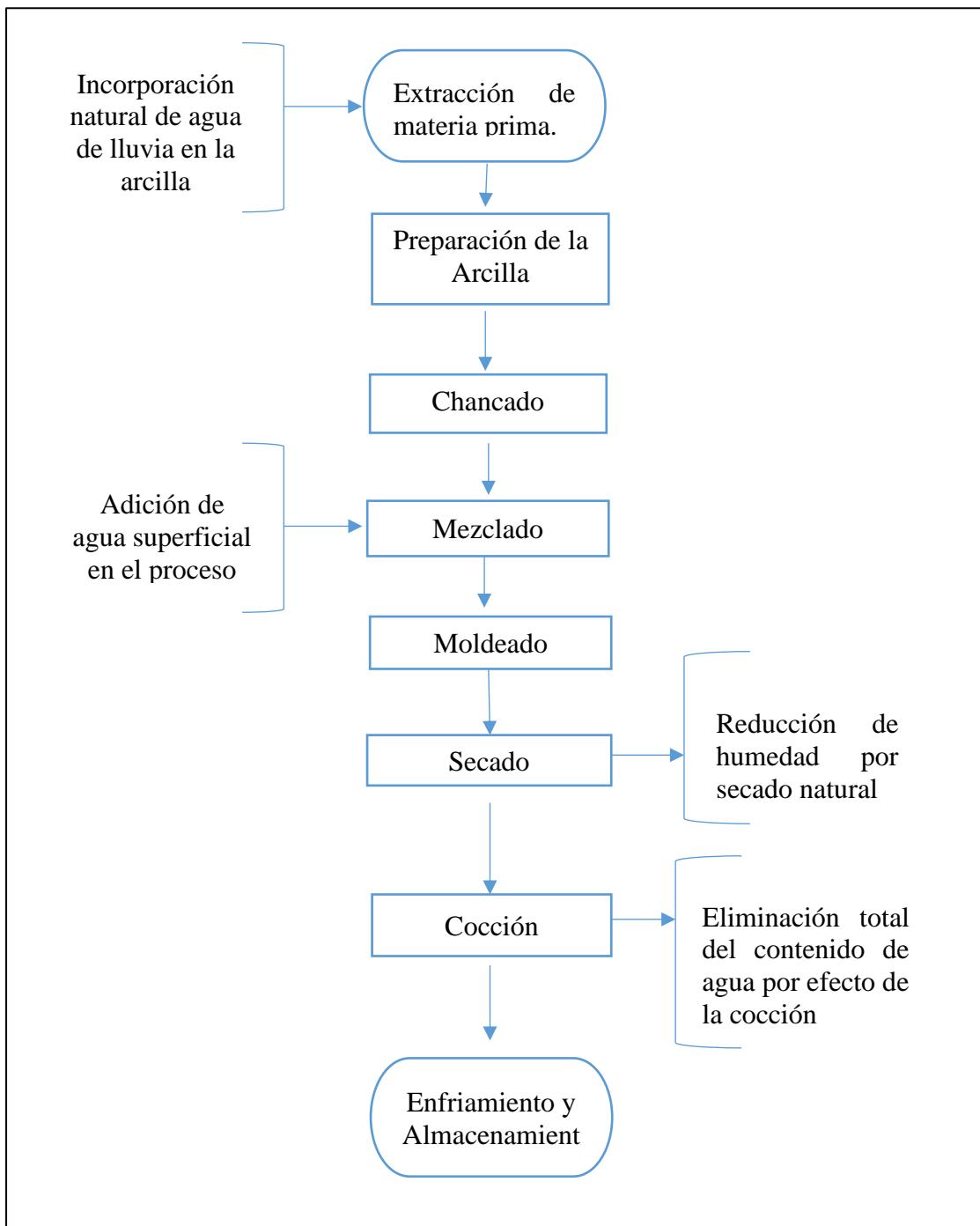
Se realizó una identificación detallada de todas las etapas del proceso de producción de ladrillos artesanales con el fin de detectar posibles fuentes de contaminación del recurso hídrico. No se evidenció generación de efluentes líquidos ni vertimientos de contaminantes hacia cuerpos de agua. Por consiguiente, se concluye que la huella Hídrica gris no se considera aplicable dentro del presente estudio para la ladrillera artesanal.

2. Ladrillera industrial

La ladrillera industrial presenta un proceso productivo más tecnificado, con maquinaria que optimiza el uso de materiales y recursos, incluido el agua. El siguiente flujograma del proceso de producción de ladrillos industriales muestra las principales etapas de transformación de la materia prima, señalando los puntos donde se requiere el uso del recurso hídrico.

Figura 18

Flujograma de la producción de ladrillos industrial



A. Uso del agua de lluvia

Se llevó a cabo un análisis para determinar si la ladrillera artesanal aprovechaba el agua de lluvia durante las diferentes etapas del proceso productivo.

En la ladrillera industrial se observó que no se realizaba almacenamiento de agua de lluvia para su posterior utilización. El único aprovechamiento identificado corresponde a la humedad natural contenida en la arcilla, empleada como materia prima.

B. Uso del agua superficial

Se evaluó el uso de aguas superficiales en la ladrillera industrial para determinar las etapas del proceso donde se utiliza este recurso. Se identificó que el agua superficial se utiliza exclusivamente en la etapa de mezclado de la arcilla, para alcanzar la consistencia adecuada del material.

C. Evaluación de posibles fuentes de contaminación del agua

Se realizó una evaluación detallada de las etapas del proceso productivo en la ladrillera industrial para identificar fuentes potenciales de contaminación del agua. No se evidenció la presencia de vertimientos ni generación de efluentes que pudieran afectar cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Por tanto, la huella Hídrica gris no se considera aplicable para la ladrillera industrial.

3.3.3.3. *Recolección de muestras y datos*

Se realizó la toma de muestras durante el mes de abril, complementada con el registro de datos necesarios para la determinación de los componentes verde y azul de la huella hídrica en ambos tipos de ladrilleras. El procedimiento comprendió la recolección de muestras de materia prima y de ladrillos terminados, así como la medición del caudal de agua utilizado en la etapa de mezclado, con el propósito de cuantificar el volumen de agua empleado directa e indirectamente en el proceso productivo.

A. Toma de muestras de materia prima

Se realizó la selección de 10 muestras de arcilla para cada ladrillera (artesanal e industrial) con el propósito de determinar el contenido de humedad mediante el método gravimétrico (Rowell, 1994). El procedimiento consistió en:

- Pesar la muestra húmeda (peso inicial).
- Someterla a secado en horno a temperatura constante.
- Registrar el peso seco.
- Calcular el porcentaje de humedad con la ecuación:

En la ladrillera artesanal, las muestras se tomaron directamente del área de acopio de arcilla; mientras que, en la ladrillera industrial, se obtuvieron de la faja transportadora posterior a la molienda y homogenización del material.

Figura 19

Extracción de muestras de arcilla



B. Toma de muestras de ladrillos

Se seleccionaron 10 ladrillos de cada tipo de producción (artesanal e industrial), una vez completadas todas las etapas del proceso. Estos ladrillos fueron pesados en estado completamente seco con el fin de determinar el peso promedio seco representativo de cada tipo de producto.

Figura 20

Pesado del ladrillo artesanal



C. Medición de caudal

Con el fin de determinar el volumen de agua empleada durante el mezclado de la arcilla (huella hídrica azul), se aplicó el método volumétrico (Chow et al., 1988). El procedimiento consistió en medir el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido.

$$Q=V/t$$

Donde;

Q: Caudal

V: Volumen

t: Tiempo

En la ladrillera artesanal se utilizó un recipiente de 20 L, mientras que en la industrial uno de 5 L. En ambos casos, se realizaron 10 repeticiones del ensayo para uniformizar los resultados. Además, se cronometró el tiempo de apertura de la válvula de suministro durante la mezcla, registrando la cantidad de ladrillos producidos en cada lote para calcular el volumen de agua empleado por ladrillo.

3.3.4. *Técnicas de procesamiento de datos*

Una vez obtenidos los datos de campo, se procedió al procesamiento de la información para estimar los componentes verde y azul de la huella Hídrica en ambos sistemas productivos.

1. Cálculo de la huella Hídrica verde para el artesanal e industrial

Para este cálculo se empleó el mismo procedimiento metodológico tanto para el ladrillo artesanal como para el industrial, utilizando los valores específicos obtenidos de las muestras correspondientes. El componente huella hídrica verde (HH verde) representa el agua incorporada naturalmente en la arcilla producto de las lluvias. Para su determinación, se relacionó el contenido promedio de humedad de la materia prima con el peso seco promedio de un ladrillo, según la siguiente ecuación:

$$HH \text{ verde} = \text{Promedio de humedad} \times \text{Peso seco promedio del ladrillo}$$

El procedimiento se aplicó tanto para la ladrillera artesanal como para la industrial, utilizando los valores obtenidos de las muestras secadas en laboratorio. Este cálculo permitió

estimar la cantidad de agua de origen natural (lluvia o humedad ambiental) presente en cada ladrillo.

2. Cálculo de la huella hídrica azul para el artesanal e industrial

Para este cálculo se utilizó el mismo método tanto para el ladrillo artesanal como para el industrial, adaptando únicamente los volúmenes de agua registrados en cada proceso. La huella hídrica azul (HH azul) corresponde al volumen de agua superficial incorporado durante la etapa de mezclado de la arcilla. Su determinación se efectuó a partir del caudal promedio del punto de suministro de agua hacia la mezcladora, obtenido mediante mediciones repetidas con el propósito de garantizar la representatividad y precisión de los datos.

El cálculo del volumen total de agua utilizada se realizó multiplicando el caudal promedio por el tiempo total de apertura del flujo de agua registrado durante la preparación de cada lote de producción. Posteriormente, dicho volumen se relacionó con la cantidad total de ladrillos elaborados, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{HH azul} = \text{Volumen total de agua} / \text{Cantidad total de ladrillos}$$

Este cálculo permitió determinar el consumo específico de agua superficial por unidad de producto, a fin de asegurar la comparabilidad de los resultados obtenidos

3. Cálculo de la huella hídrica por metro cuadrado de muro estructural

Este procedimiento se aplicó de igual manera para los ladrillos artesanales e industriales. Con el fin de expresar el consumo hídrico en términos de rendimiento de la huella hídrica en el impacto en el ámbito constructivo, se estimó la huella m^2 de muro estructural. Para ello, se determinó primero la cantidad de ladrillos necesarios para cubrir un metro cuadrado de muro considerando las dimensiones específicas de cada tipo de ladrillo.

Para calcular la cantidad de ladrillos por metro cuadrado de muros se aplicará la siguiente fórmula (Ramos, 2015):

$$CL = 1/((L + J_h)x(H + J_Y))$$

Donde:

CL: Cantidad de ladrillos por metro cuadrado (m^2)

L : Longitud de ladrillo (m)

J_h : Espesor junta horizontal (m)

H : Altura del ladrillo (m)

J_y : Espesor junta vertical (m)

Posteriormente, se multiplicó la huella hídrica total por ladrillo por el número de unidades requeridas para conformar un metro cuadrado:

$$HH\ m^2 = HH_{total} \times \text{Cantidad de ladrillos por m}^2$$

Este procedimiento se aplicó de igual manera para los ladrillos artesanales e industriales, lo que permitió comparar la eficiencia hídrica de ambos sistemas desde un enfoque constructivo.

4. Comparativo entre ambos sistemas

Con el propósito de determinar si las diferencias entre las huellas hídricas de los ladrillos artesanales e industriales presentan significancia estadística, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes con varianzas desiguales (t de Welch).

El análisis se realizó considerando las variables huella hídrica verde (L/ladrillo) y huella hídrica azul (L/ladrillo), correspondientes al consumo de agua verde y azul por unidad de producto. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con el fin de evaluar si las diferencias observadas entre ambos sistemas productivos podían atribuirse al azar o reflejaban variaciones reales en los patrones de uso del recurso hídrico. Complementariamente, se elaboraron gráficos de barras comparativos, los cuales permitieron visualizar de manera más

clara las diferencias en los valores promedio de huella hídrica y facilitar la interpretación de los resultados estadísticos, contribuyendo a una mejor comprensión del comportamiento del consumo de agua en ambos tipos de producción.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. *Huella hídrica del ladrillo artesanal*

En esta sección se presenta un análisis detallado de la huella hídrica del ladrillo artesanal. La huella hídrica se desglosa en tres componentes principales: la Huella hídrica verde, la huella hídrica azul y la huella hídrica gris. La huella hídrica verde representa el agua de lluvia utilizada en el proceso de producción, mientras que la huella hídrica azul se refiere al agua superficial y subterránea empleada. La huella hídrica gris mide la cantidad de agua necesaria para diluir los contaminantes generados durante la producción hasta alcanzar niveles seguros para el medio ambiente. A continuación, se detallan los cálculos y consideraciones para cada uno de estos componentes.

4.1.1.1. *Huella hídrica verde del ladrillo artesanal.*

a) **Agua presente en la arcilla.**

La arcilla con la que se fabricaron los ladrillos artesanales presentó un contenido de agua variable. En las muestras recolectadas, se observó que la mayor cantidad de agua se registró en la primera muestra, con 13.03 g de agua, mientras que la menor cantidad se encontró en la quinta muestra, con 3.72 g. Para determinar el contenido promedio de agua en la arcilla utilizada, se analizaron varias muestras representativas del material. Este análisis permitió identificar la variabilidad en el contenido de humedad de la arcilla. (Tabla 2).

Tabla 2*Agua presente en la arcilla*

Muestras	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Contenido de agua (g)
1	183.73	170.7	13.03
2	178.25	166.01	12.24
3	156.12	150.18	5.94
4	150.29	146.51	3.78
5	141.49	137.77	3.72
6	150.1	145.66	4.44
7	174.53	163.96	10.57
8	158.16	148.38	9.78
9	166.82	162.57	4.25
10	161.62	152.8	8.82

El contenido de agua en las muestras presentó un rango de 9.31 g, con valores que oscilaron entre 3.72 g y 13.03 g. El contenido promedio de agua en la arcilla fue de 7.96 g, lo cual representa una medida representativa del material utilizado en el proceso de elaboración. Por otro lado, el análisis estadístico arrojó una desviación estándar de 3.65 g, lo que indica que existe una dispersión moderada en los valores respecto al promedio.

b) Contenido de humedad de la arcilla.

Se determinó que el contenido de humedad de la arcilla usado para la elaboración de ladrillos artesanales es de un 4.87 % (Tabla 3). La humedad de las muestras presentó un rango de 5.05 %, con valores que oscilaron entre 2.58 % y 7.63 %. Se uso el método gravimétrico para obtener el contenido de humedad:

Tabla 3*Contenido de humedad de la arcilla*

Muestra	Contenido de agua (g)	Peso Seco (g)	Humedad (%)
1	13.03	170.7	7.63%
2	12.24	166.01	7.37%
3	5.94	150.18	3.96%
4	3.78	146.51	2.58%
5	3.72	137.77	2.70%
6	4.44	145.66	3.05%
7	10.57	163.96	6.45%
8	9.78	148.38	6.59%
9	4.25	162.57	2.61%
10	8.82	152.8	5.77%
Contenido de Humedad			4.87%

Asimismo, la desviación estándar fue de 2.09, lo que indica una dispersión moderada en los valores de humedad respecto al promedio.

c) Peso seco de los ladrillos.

Se pesaron diez ladrillos artesanales con el propósito de obtener un promedio de peso y evaluar la consistencia del proceso de producción. El ladrillo 7 registró el mayor valor con 2 887.6 g, mientras que el ladrillo 5 presentó el menor con 2 737.5 g, determinándose un rango de 150.1 g (Tabla 4). Este análisis del peso seco fue fundamental para comprender la calidad y densidad de los ladrillos producidos, así como para estimar la cantidad de material empleado en cada unidad.

Tabla 4*Peso seco de ladrillos*

Ladrillo	Peso seco (g)
1	2 853.2
2	2 790.7
3	2 816.8
4	2 797.6
5	2 737.5
6	2 790.7
7	2 887.6
8	2 807.9
9	2 761.5
10	2 791.2

La desviación estándar del peso seco de los ladrillos es 40.44 g, lo que indica una baja variabilidad entre los valores registrados.

d) Determinación de la huella hídrica verde de ladrillo artesanal.

La determinación de la huella hídrica verde del ladrillo artesanal se realizó correlacionando el peso seco de los ladrillos con el contenido de humedad presente en la arcilla utilizada. El contenido de agua en los diez ladrillos artesanales evaluados presentó valores comprendidos entre 133.36 g/ladrillo y 140.67 g/ladrillo, correspondientes al ladrillo 5 y al ladrillo 7, respectivamente. Esto representó un rango de 7.31 g/ladrillo. El promedio es de 136.57 g de agua por ladrillo, lo que equivale a 0.137 L de agua por unidad (Tabla 5).

$$\text{HH verde} = 136.57 \text{ g /ladrillo}$$

Transformando la unidad de g a L para determinar la huella hídrica para expresarlo en L por unidad de ladrillo se obtuvo una huella hídrica verde de 0.14 L/ladrillo

$$\text{HH verde} = 0.14 \text{ L/ladrillo}$$

Tabla 5

Contenido de humedad de ladrillos

Ladrillo	Peso seco (g)	Contenido de agua(g/ladrillo)
1	2 853.2	138.99
2	2 790.7	135.95
3	2 816.8	137.22
4	2 797.6	136.28
5	2 737.5	133.36
6	2 790.7	135.95
7	2 887.6	140.67
8	2 807.9	136.79
9	2 761.5	134.52
10	2 791.2	135.97
Promedio		136.57

La desviación estándar del contenido de humedad es de 2.03 g/ladrillo, lo cual indica una variación moderada entre los ladrillos analizados. Esta variabilidad puede deberse a pequeñas diferencias en las condiciones de secado, mezcla o almacenamiento del material.

4.1.1.2. Huella hídrica azul del ladrillo artesanal.

a) Caudal del suministro de agua.

El caudal medido en las diez pruebas presentó valores comprendidos entre 16.67 L/min y 17.91 L/min, correspondientes a las mediciones 5 y 3, respectivamente, determinándose un rango de 1.24 L/min. El caudal promedio de la línea de suministro de agua utilizada para el mezclado de la arcilla fue de 17.20 L/min (Tabla 6).

La desviación estándar del caudal fue de aproximadamente 0.38 L/min, lo que indica una baja variabilidad entre las mediciones

Tabla 6

Caudal del suministro de agua

Mecición	Volumen (L)	Tiempo (min)	Caudal (L/min)
1	20	01:11	16.90
2	20	01:10	17.14
3	20	01:07	17.91
4	20	01:09	17.39
5	20	01:12	16.67
6	20	01:09	17.39
7	20	01:11	16.90
8	20	01:08	17.65
9	20	01:11	16.90
10	20	01:10	17.14
Promedio			17.20

b) Tiempo de flujo de agua

El tiempo de que se aplicó agua a la materia prima (arcilla) para realizar el mezclado fue de 02:55 h, lo que serían 175 min. Este periodo se definió según la apreciación del operador, en función del aspecto y la consistencia alcanzada por la arcilla durante su saturación.

c) Volumen total de agua utilizada en el mezclado.

El volumen total de agua utilizada en el mezclado se calculó a partir del caudal de suministro y el tiempo de aplicación, obteniéndose 3 010 L. Esta cantidad corresponde al agua requerida para alcanzar la humedad óptima de la arcilla, condición indispensable para su adecuada manipulación en la producción de ladrillos artesanales.

$$V = 3\,010 \text{ L}$$

d) Huella hídrica azul del ladrillo artesanal.

La huella hídrica azul de los ladrillos artesanales alcanzó un valor de 1.23 L por unidad, resultado obtenido a partir del volumen total de agua utilizada en el mezclado y la producción registrada de ladrillos.

$$\text{HH azul} = 1.23 \text{ L/ladrillo}$$

4.1.1.3. Huella hídrica de ladrillo artesanal.

La huella hídrica de un ladrillo artesanal se estimó en 1.37 L por unidad. Considerando que el peso seco promedio de los ladrillos evaluados fue de 2 803.47 g, equivalente a 2.80 kg, se realizó la conversión correspondiente para expresar el indicador en metros cúbicos por tonelada de producto. De esta manera, la huella hídrica específica para los ladrillos artesanales fue de 0.49 m³/t.

4.1.1.4. Huella hídrica por m^2 de muro estructural

a) Dimensiones de ladrillo para muro de cabeza.

Las dimensiones de los ladrillos artesanales evaluados presentaron alturas comprendidas entre 7.18 cm y 7.38 cm, correspondientes a los ladrillos 10 y 3, respectivamente, lo que determinó un rango de 0.20 cm. En cuanto al ancho, los valores oscilaron entre 12.46 cm y 12.58 cm, registrados en los ladrillos 2 y 3, respectivamente, estableciéndose un rango de 0.12 cm. Siendo los promedios 7.25 cm de alto y 12.52 cm de ancho

Tabla 7

Dimensiones de ladrillos artesanales

Ladrillo	Alto (cm)	Ancho (cm)
1	7.28	12.57
2	7.19	12.46
3	7.38	12.58
4	7.31	12.56
5	7.21	12.51
6	7.23	12.47
7	7.19	12.57
8	7.22	12.49
9	7.34	12.53
10	7.18	12.48
Promedio	7.25	12.52

b) Número de ladrillos artesanales por m^2

Considerando las dimensiones promedio de los ladrillos, se determinó que la cantidad necesaria para conformar un metro cuadrado de muro estructural es de 81.5 ladrillos/ m^2

c) Huella hídrica por m²

La huella hídrica por metro cuadrado de muro estructural se estimó en 111.66 L/m², resultado del producto entre el número de ladrillos necesarios para conformar un metro cuadrado de muro y la huella hídrica individual de cada ladrillo artesanal.

HH de muro estructural: 111.66 L/m²

4.1.2. *Huella hídrica de ladrillo industrial.*

En esta sección se presenta un análisis detallado de la huella hídrica del ladrillo artesanal. La Huella hídrica se desglosa en dos componentes principales: la huella hídrica verde y la huella hídrica azul. A continuación, se detallan los cálculos y consideraciones para cada uno de estos componentes.

4.1.2.1. *Huella hídrica verde de ladrillo industrial.*

a) Agua presente en la arcilla.

La arcilla con la que se fabrica los ladrillos artesanales presenta un contenido de agua de variado siendo la mayor cantidad de agua en la muestra 3 con 6.01 g de agua y la menor cantidad de la muestra 1, que contuvo 4.61 g, estableciéndose un rango de 1.40 g. El contenido promedio de agua fue de 5.10 g, lo que evidenció una cantidad moderada de humedad natural en la materia prima antes del proceso de mezclado. Asimismo, la desviación estándar calculada fue de 0.41 g, lo que indicó una variabilidad baja a moderada entre las muestras analizadas (Tabla 8).

El contenido promedio de agua fue de 5.10 g, lo que evidenció una cantidad moderada de humedad natural en la materia prima antes del proceso de mezclado. Asimismo, la desviación estándar calculada fue de 0.41 g, lo que indicó una variabilidad baja a moderada entre las muestras analizadas.

Tabla 8*Cantidad de agua de la materia prima*

Muestra	Peso húmedo (g)	Peso Seco (g)	Cantidad de agua (g)
1	103.89	99.28	4.61
2	104.34	99.01	5.33
3	105.08	99.07	6.01
4	103.56	98.74	4.82
5	105.5	100.34	5.16
6	104.59	99.28	5.31
7	103.94	99.01	4.93
8	104.3	99.07	5.23
9	103.56	98.74	4.82
10	105.1	100.34	4.76
Promedio			5.10

b) Contenido de humedad de la materia prima

El contenido de humedad de la materia prima utilizada en la fabricación de los ladrillos artesanales presentó valores comprendidos entre 4.64 % en la muestra 1 y 6.07 % en la muestra 3, lo que estableció un rango de 1.43 %. Se obtuvo que el contenido de humedad del suelo (arcilla) usado para la elaboración de ladrillos artesanales es de un 5.13 % (Tabla 9). La desviación estándar del contenido de humedad fue de 0.42 %, lo que indica una moderada variabilidad entre las muestras analizadas

Tabla 9*Contenido de humedad de la materia prima*

Muestra	Peso del agua (g)	Peso seco materia prima (g)	Contenido de humedad (%)
1	4.61	99.28	4.64%
2	5.33	99.01	5.38%
3	6.01	99.07	6.07%
4	4.82	98.74	4.88%
5	5.16	100.34	5.14%
6	5.31	99.28	5.35%
7	4.93	99.01	4.98%
8	5.23	99.07	5.28%
9	4.82	98.74	4.88%
10	4.76	100.34	4.74%
Promedio			5.13%

c) Peso seco de los ladrillos industriales

Los resultados obtenidos mostraron que el ladrillo 1 registró el mayor peso seco con 2 542,5 g, mientras que el ladrillo 5 registró el menor valor con 2 431,5 g. El rango de variación entre el valor máximo y el mínimo fue de 111 g (Tabla 10). Esta uniformidad en el peso es un indicador de la consistencia en la fabricación y el control de calidad en el proceso de producción industrial de ladrillos. Además, la desviación estándar fue de 35.84 g, lo que indicó una baja variabilidad en los pesos.

Tabla 10*Peso seco de ladrillos*

Ladrillo	Peso seco (g)
1	2 542.5
2	2 530.7
3	2 525.7
4	2 540
5	2 431.5
6	2 521.2
7	2 468.6
8	2 519.7
9	2 528.8
10	2 536.1

d) Determinación de la huella hídrica verde de ladrillo industrial.

La huella hídrica verde del ladrillo industrial se determinó mediante la relación del peso seco de los ladrillos con el porcentaje de humedad presente en la arcilla utilizada en cada ladrillo. En este cálculo el ladrillo 5 tiene el menor contenido de humedad siendo 127.01 g y el ladrillo 1 el mayor contenido de humedad siendo 132.81 g, lo que estableció un rango de 5.80 g. En promedio, se encontró que el contenido de humedad es de 131.34 g/ladrillo, lo que equivale a 0.13 L/ladrillo (Tabla 11).

$$\text{HH verde} = 0.13 \text{ L/ladrillo}$$

La desviación estándar del contenido de agua es de 1.87 g, lo cual indica una baja variabilidad entre las muestras analizadas

Tabla 11*Promedio de contenido de agua*

Ladrillo	Peso seco (g)	Contenido de agua (g)
1	2 542.5	132.81
2	2 530.7	132.19
3	2 525.7	131.93
4	2 540	132.68
5	2 431.5	127.01
6	2 521.2	131.69
7	2 468.6	128.95
8	2 519.7	131.61
9	2 528.8	132.09
10	2 536.1	132.47
Promedio		131.34

4.1.2.2. Huella hídrica azul del ladrillo industrial.**a) Caudal del suministro de agua.**

El caudal de la línea de suministro de agua utilizada para alimentar la mezcladora se determinó midiendo el tiempo necesario para llenar un volumen constante de 5 litros en 10 repeticiones. Los resultados obtenidos evidenciaron que el caudal presentó un valor máximo de 0.543 L/s en la muestra 3 y un valor mínimo de 0.474 L/s en la muestra 2, lo que representa un rango de 0.069 L/s. A partir de estos datos se obtuvo que el promedio del caudal es de 0.5191 L/s, equivalente a 31.14 L/min (Tabla 12). La desviación estándar del caudal fue de 0.02 L/s, lo que refleja una baja variabilidad entre las mediciones

Tabla 12*Caudal del suministro de agua*

Medición	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal(L/s)
1	5	9.48	0.527
2	5	10.55	0.474
3	5	9.21	0.543
4	5	9.36	0.534
5	5	9.59	0.521
6	5	9.41	0.531
7	5	9.65	0.518
8	5	10.11	0.495
9	5	9.46	0.529
10	5	9.59	0.521
Promedio			0.519

b) Tiempo de flujo de agua.

El tiempo total durante el cual se aplicó agua a la materia prima para facilitar el mezclado fue de 02:41 h, equivalente a 161 min. Este periodo respondió al pase de agua establecido por el supervisor de planta, mediante la apertura regulada de la válvula de abastecimiento.

c) Volumen total de agua utilizada en el mezclado.

El volumen total de agua empleada en el mezclado se determinó a partir del caudal de suministro y el tiempo de aplicación, alcanzando un total de 5 013.54 L. Esta cantidad representó el agua necesaria para garantizar la humedad adecuada de la arcilla, asegurando así su correcta manipulación durante el proceso de producción de ladrillos artesanales.

$$V = 5013.54 \text{ L}$$

d) HH azul de ladrillo industrial.

La huella hídrica azul de los ladrillos industriales fue de 0.57 L por unidad, valor obtenido a partir del volumen total de agua empleada en el mezclado y la producción registrada de ladrillos.

$$\text{HH azul} = 0.57 \text{ l/ladrillo}$$

4.1.2.3. Huella hídrica de ladrillo industrial.

La huella hídrica de un ladrillo industrial es la suma de la huella hídrica verde de ladrillo industrial y la huella hídrica azul de ladrillo industrial, resultando en un total de 0.7 L/ladrillo. Ya que tenemos los pesos de ladrillos secos, se obtuvo un promedio que equivale a 2 514.48 g, que serían 2.5144 kg. Con este dato transformamos a m^3/t . La huella hídrica de un ladrillo industrial es:

$$\text{HH} = 0.28 \text{ m}^3/\text{t}$$

4.1.2.4. Huella hídrica por m^2 de muro estructural

a) Dimensiones de ladrillo artesanal.

Las dimensiones promedio de un ladrillo artesanal son; alto 9.154 cm y ancho 12.522 cm (Tabla 13). El valor más bajo registrado para el alto fue de 9.00 cm y el más alto fue de 9.29 cm. En cuanto al ancho, el valor mínimo fue de 12.49 cm y el máximo de 12.58 cm. Se calculó una desviación estándar es de 0.08 cm para el alto y 0.03 cm para el ancho.

Tabla 13*Dimensiones del ladrillo industrial*

Ladrillo	Alto(cm)	Ancho(cm)
1	9.189	12.511
2	9.001	12.489
3	9.105	12.513
4	9.201	12.546
5	9.103	12.584
6	9.11	12.521
7	9.189	12.492
8	9.212	12.544
9	9.142	12.495
10	9.285	12.529
Promedio	9.154	12.522

b) Número de ladrillos industriales por m²

Considerando las dimensiones promedio de los ladrillos industriales y los espacios de junta entre piezas, se determinó que la cantidad necesaria para conformar un metro cuadrado de muro estructural es de 66.9 ladrillos/m².

c) Huella hídrica por m²

La huella hídrica por m² de muro estructural se determinó en 46.83 L/m², a partir de la multiplicación del número de ladrillos por metro cuadrado, equivalente a 66.9 unidades, por la huella hídrica individual de cada ladrillo industrial, que fue de 0.7 L/ladrillo.

HH de muro estructural: 46.83 L/ m²

4.1.3. Comparación de las huellas hídricas de ladrillo artesanal e industrial.

4.1.3.1. Análisis de datos de las huellas hídricas.

La huella hídrica del ladrillo artesanal está compuesta por la huella hídrica verde, que equivale a 0.14 L/ladrillo, y la huella hídrica azul, que asciende a 1.23 L/ladrillo. En conjunto, la huella hídrica total del ladrillo artesanal es de 1.37 L/ladrillo. De manera similar, la huella hídrica del ladrillo industrial se desglosa en una huella hídrica verde de 0.13 L/ladrillo y una huella hídrica azul de 0.57 L/ladrillo, resultando en una huella hídrica total de 070 L/ladrillo (Tabla 14).

Tabla 14

Prueba de T- Student de las huellas hídricas de cada tipo de ladrillo

Tipo de ladrillo	Huella hídrica verde	Huella hídrica azul
Artesanal	0.14 ± 0.020	1.23 ± 0.014
Industrial	0.13 ± 0.019	0.57 ± 0.013
“p”	P=1.04E-07	P=3.67235E-27

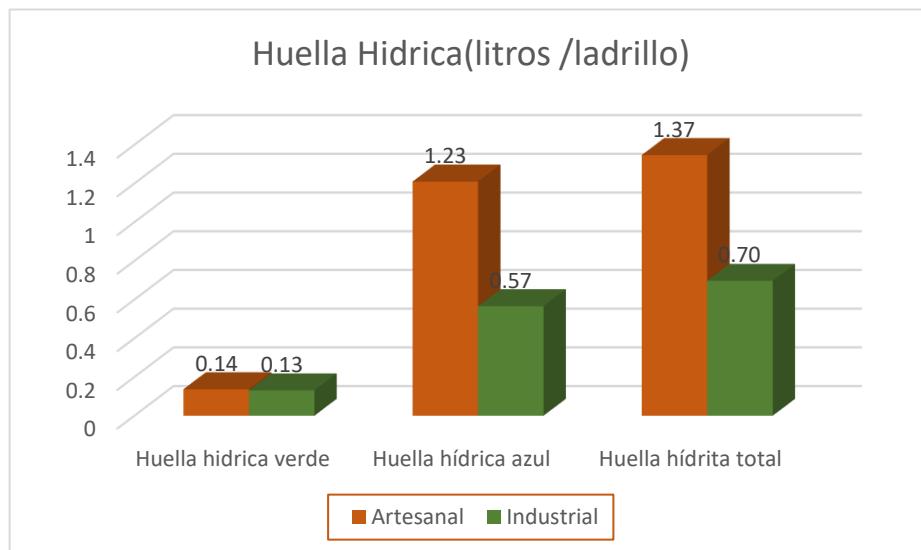
Los valores obtenidos para la prueba t de Student fueron altamente significativos: $p = 1.04 \times 10^{-7}$ para la huella hídrica verde y $p = 3.67 \times 10^{-27}$ para la huella hídrica azul, ambos menores al umbral de 0.05. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los ladrillos artesanales e industriales en cuanto a sus huellas hídricas. En consecuencia, se afirmar con un alto nivel de confianza que el tipo de ladrillo influye directamente en el consumo de agua, reflejándose en valores distintos de huella hídrica entre ambos procesos

productivos. Se destaca que en la huella hídrica verde es similar en ambos tipos de ladrillo.

Pero la huella hídrica azul del ladrillo artesanal es mayor al ladrillo industrial (Figura 21).

Figura 21

Huellas hídricas de los ladrillos artesanales e industriales



4.1.3.2. Porcentaje de las huellas hídricas de cada tipo de ladrillo.

En el análisis de la HH del ladrillo artesanal, se observa que la HHV constituye el 10% del total, mientras que la HHA representa el 90% restante. Por otro lado, en el caso del ladrillo industrial, la HHV representa el 19% de la huella hídrica total, y la HHA comprende el 81% (Tabla 15).

Tabla 15

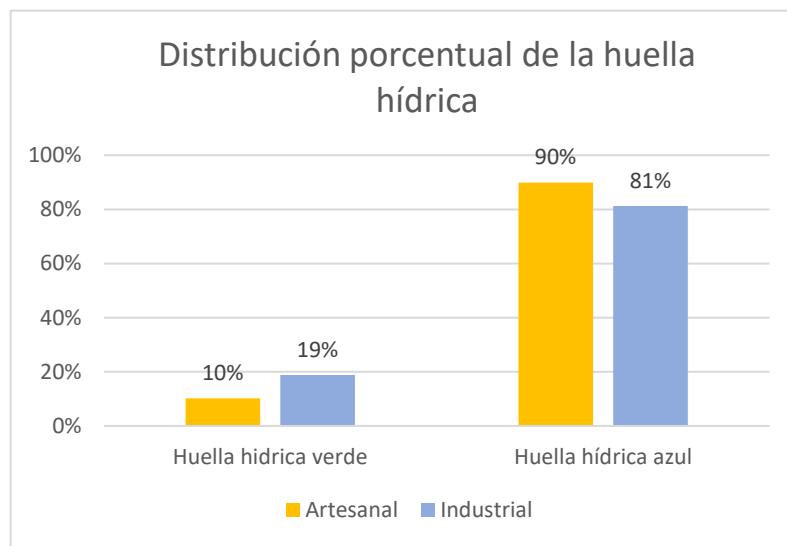
Porcentajes de huella hídrica

Tipo de ladrillo	Huella hídrica verde	Huella hídrica azul
Artesanal	10%	90%
Industrial	19%	81%

En ambos tipos de ladrillo se reconoce que el mayor porcentaje de uso de agua está en aprovechar el agua superficial (Figura 22).

Figura 22

Porcentajes de las huellas hídricas de los ladrillos artesanales e industriales



4.1.3.3. Comparación en otras expresiones de medidas

A. Huella hídrica por tonelada de ladrillo

La huella hídrica expresada en metros cúbicos de agua por tonelada de ladrillos, se obtuvo que para ladrillos artesanales es de $0.49 \text{ m}^3/\text{t}$ y para ladrillos industriales es de $0.28 \text{ m}^3/\text{t}$.

Tabla 16

Huella hídrica por tonelada de ladrillos

Tipo de ladrillo	Huella hídrica (m^3/t)
Ladrillo Artesanal	0.49
Ladrillo Industrial	0.28

B. Huella hídrica para ladrillo estructural

La huella hídrica para muros estructural para ladrillos artesanales es de 111.66 L/m² y para ladrillos industriales es de 46.83 l/m².

Tabla 17

Huella hídrica de pared estructural

Tipos de ladrillos	Huella hídrica de pared estructural (l/m²)
Ladrillo Artesanal	111.66
Ladrillo Industrial	46.83

4.2. Discusión

En el presente estudio, se determinó que la huella hídrica de la producción de ladrillos artesanales fue de 1.37 L de agua por ladrillo. Esta cifra se desglosa en una huella hídrica azul de 1.23 L por ladrillo, la cual es significativamente inferior a la reportada por Barros et al. (2022), quienes determinaron una huella hídrica azul de 3.4 L por ladrillo. Este consumo de agua más elevado en el estudio de Barros et al. podría deberse a que los suelos en las minas de arcilla examinados son más secos y carecen de un control adecuado del humedecimiento de la arcilla antes de ser moldeada, contrariamente, los valores obtenidos en nuestro estudio son considerablemente superiores a los reportados por Irfan y Mondal (2016), quienes encontraron una huella hídrica azul de 0.37 L de agua por ladrillo. De manera similar, Rincón et al. (2016) reportaron un consumo de agua de 0.333 L por ladrillo. La disparidad en estas cifras puede atribuirse a la metodología utilizada, ya que Irfan y Mondal, así como Rincón et al., se basaron en cuestionarios aplicados a los propietarios de las ladrilleras para estimar el volumen de agua utilizada, en lugar de realizar un conteo real del consumo de agua. Además, se encontró que la

huella hídrica verde es de 0.14 L por ladrillo, atribuible al agua de lluvia presente en la arcilla. No se aprovecha el agua de lluvia de otras formas, ya que se determinó que la arcilla utilizada contiene un 4.87% de humedad. Por otro lado, Chura y Cotrado (2023) reportaron una humedad del 9.08% en un yacimiento de arcilla, diferencia que se debe a que sus muestras se obtuvieron en una zona húmeda y cercana a aguas superficiales, lo que resultó en una mayor humedad de la arcilla. Los resultados de nuestro estudio sugieren la necesidad de implementar mejores prácticas de manejo de agua en las ladrilleras, especialmente en el control del humedecimiento de la arcilla, para optimizar el consumo de agua y reducir la huella hídrica. Estas diferencias en la huella hídrica azul y la humedad de la arcilla subrayan la importancia de considerar las condiciones locales y la metodología empleada al evaluar el impacto hídrico de la producción de ladrillos artesanales.

En este estudio, la huella hídrica de un ladrillo industrial se ha determinado en 0.70 L por ladrillo, de los cuales 0.13 L corresponden a la huella hídrica verde y 0.57 L a la huella hídrica azul. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Skouteris et al. (2017), quienes reportaron una huella hídrica total de 2.02 litros por ladrillo industrial, compuesta por 0.31 L de huella hídrica verde y 1.71 L de huella hídrica azul. En nuestro estudio, la huella hídrica verde representa el 19% de la huella hídrica total, mientras que la huella hídrica azul representa el 81%. Estos datos difieren de los obtenidos por Skouteris et al. (2017), donde la huella hídrica verde constituía el 15.2% de la huella hídrica total y la huella hídrica azul el 84.8%. Las diferencias observadas pueden atribuirse a varios factores. En primer lugar, la diferencia en la huella hídrica verde podría explicarse por las condiciones climáticas en el momento de la toma de muestras. Skouteris, Ouki, Foo et al. realizaron sus mediciones durante períodos lluviosos, lo que incrementó el contenido de humedad de la arcilla, resultando en una mayor huella hídrica verde. En contraste, nuestro estudio se llevó a cabo en condiciones más secas, lo que redujo la contribución del agua de lluvia al proceso de producción. La diferencia en la huella hídrica azul

puede deberse a la implementación de tecnologías más sostenibles y eficientes en el uso del agua en las plantas industriales evaluadas en nuestro estudio, en comparación con las prácticas observadas por Skouteris et al. (2017). La variabilidad en los métodos de producción, la gestión del agua y las condiciones ambientales locales pueden influir significativamente en los resultados de la huella hídrica.

En cuanto a la comparación de las huellas hídricas obtenidas para cada tipo de ladrillo, se observa que los valores correspondientes a la huella hídrica verde son muy similares entre ambos sistemas productivos: 0.14 L/ladrillo para el ladrillo artesanal y 0.13 L/ladrillo para el industrial. Esta cercanía en los valores puede explicarse por el origen común de la materia prima, dado que la arcilla utilizada proviene de la misma zona geográfica, lo que implica condiciones climáticas, características edáficas y niveles de humedad ambiental prácticamente equivalentes. Por otro lado, los resultados evidencian una diferencia notable en la huella hídrica azul. La producción artesanal presenta un valor significativamente mayor, con 1.23 L/ladrillo frente a los 0.57 L/ladrillo registrados en la producción industrial, lo que representa una diferencia absoluta de 0.66 L/ladrillo. La razón entre ambos valores (1.93) indica que la huella hídrica azul del ladrillo artesanal es casi el doble que la del ladrillo industrial. Este patrón se mantiene cuando la huella hídrica se expresa en términos de volumen de agua por tonelada de ladrillos, alcanzando 0.49 m³/t para la producción artesanal y 0.28 m³/t para la industrial. Estos resultados coinciden con lo reportado por Islam et al. (2023), quienes señalan que la producción artesanal de ladrillos suele presentar una huella hídrica más elevada debido al uso menos eficiente de los recursos hídricos. Un factor determinante en esta diferencia es la implementación de tecnologías más sostenibles en las ladrilleras industriales, las cuales permiten optimizar el uso del agua en la etapa de mezclado y reducir significativamente el componente de huella hídrica azul. En contraste, los procesos artesanales dependen de técnicas

manuales que, aunque tradicionales, demandan mayores volúmenes de agua para alcanzar la consistencia adecuada de la mezcla.

Cuando se analiza la huella hídrica de muros estructurales, los resultados muestran una diferencia aún mayor. La huella hídrica de muros hechos con ladrillos artesanales fue de 111.66 L /m², mientras que para los ladrillos industriales fue de 46.83 L/m². Esto significa que la huella hídrica de los muros estructurales hechos con ladrillos artesanales es aproximadamente 2.356 veces mayor que la de los muros hechos con ladrillos industriales. Este incremento en la proporción se debe a las dimensiones de los ladrillos utilizados para construir los muros. Los ladrillos artesanales suelen tener menores dimensiones que los ladrillos industriales, lo que implica que se necesitan más ladrillos artesanales para cubrir la misma área, aumentando así la huella hídrica total del muro estructural. Este hallazgo subraya la importancia de considerar tanto la eficiencia del uso del agua como las características físicas de los materiales al evaluar el impacto ambiental de los diferentes métodos de producción de ladrillos.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- La huella hídrica en la elaboración de ladrillos artesanales se compone de 0.14 L/ladrillo de huella hídrica verde y 1.23 L/ladrillo de huella hídrica azul, obteniéndose una huella hídrica total de 1.37 L/ladrillo. El valor de la huella hídrica expresado por tonelada de producto es de 0.49 m³/t. La huella hídrica asociada a la construcción de un muro estructural con ladrillo artesanal es de 111.66 L/m². (SENCICO, 2020)
- La huella hídrica en la elaboración de ladrillos industriales se compone de 0.13 L/ladrillo de huella hídrica verde y 0.57 L/ladrillo de huella hídrica azul, obteniéndose una huella hídrica total de 0.70 L/ladrillo. El valor de la huella hídrica expresado por tonelada de producto es de 0.28 m³/t. La huella hídrica asociada a la construcción de un muro estructural con ladrillo industrial es de 46.83 L/m².
- La comparación de la huella hídrica entre ambos sistemas de producción indica que la huella hídrica verde presenta valores prácticamente equivalentes, con una diferencia de 0.01 L por ladrillo, ligeramente superior en el ladrillo artesanal. En contraste, la huella hídrica azul evidencia una diferencia considerable de 0.66 L por ladrillo, también mayor en el sistema artesanal. En consecuencia, la huella hídrica total del ladrillo artesanal es de 1.37 L por ladrillo, superando en 0.67 L por ladrillo a la del ladrillo industrial, que alcanza 0.70 L por ladrillo. Los resultados de la prueba t de Student indicaron diferencias estadísticamente significativas, con un valor de p inferior a 0.05, por lo que se concluye que la producción artesanal requiere un mayor consumo de agua y genera un impacto hídrico más elevado en comparación con la producción industrial.⁷

CAPITULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

Aceros Arequipa. (22 de Mayo de 2024). *acerosarequipa.com*.

<https://www.acerosarequipa.com/manuales/manual-de-construccion-para-propietarios/los-ladrillos#:~:text=El%20m%C3%A1s%20conocido%20es%20el,y%2024%20cm%20de%20largo.>

Ahmad, T., Hussain, M., Iqbal, M., Ali, A., Manzoor , W., Bibi, H., Ali, S., Rehman, F., Rashedi, A., Amin, M., Tabassum, A., Raza, G., & Shams, D. F. (2022, Julio 7). Environmental, energy, and water footprints of marble tile production chain in a life cycle perspective. *Sustainability*, 14(8325). <https://doi.org/10.3390/su14148325>

Antenor , B. J. (2022). *Elementos de hidrologia aplicada* (Primera Edición ed.). (E. Blucher, Ed.) Editora Blucher.

Artola, D. C., & Valladares, S. G. (2021). Estudio de las propiedades físicas y mecanicas de unidades de ladrillos de arcilla de fábricas artesanales colindantes a la carretera Nueva León, municipio La Paz Centro, departamento de León. *Universidad Nacional de Ingenieria[Repositorio Institucional]*.

<https://repositoriosiidca.csuca.org/Record/RepoUNI4029>

Barranzuela, J. (2014). Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región Piura. *Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura.*

Barros, E., Chamorro, A., Molina, M., & López, D. (2022, Octubre). Indicadores de sostenibilidad ambiental de una mina de arcilla en La Guajira (Colombia). *Scientific Electronic Library Online*, 33(5). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000500125>

Bezerra, M., Vollmer, D., Acero, N., Marquez, M., Restrepo, D., & Mendoza, E. (2021). Operationalizing Integrated Water Resource Management in Latin America: Insights from Application of the Freshwater Health Index. *Environmental Management*, 69(4), 815–834. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00267-021-01446-1](https://doi.org/10.1007/s00267-021-01446-1)

Castañeda, C., & Murcia, J. (2023). *Fundamentación teórico-práctico inicial para química analítica* (Primera Edición ed.). (W. Becerra Mayonga, Ed.) Tunja, Boyacá, Colombia: UTPC.

Chicchón, J. M., & Rivasplata, L. F. (2020). Características físicas y mecánicas del ladrillo artesanal de arcilla king kong del distrito de Monsefú, provincia de Chiclayo, Región de Lambayeque. *Universidad Ricardo Palma*. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/3410>

Chura, F. A., & Cotrado, R. (2023). Análisis comparativo del contenido de humedad mediante método resistividad eléctrica y método convencional en suelo arcilloso y limoso, Ilave 2022. *Repositorio de la Universidad Cesar Vallejo*. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/109539>

Correia, V. J. (2019). Pegada hídrica no sistema produtivo de uma olaria de cerâmica vermelha no ceará. *Universidade Federal Rural Do Semi-Árido*. <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/5996>

Cún, M. F. (2010). Mejoramiento y tecnificación de máquina extrusora para la elaboración de ladrillos artesanales. *DSpace en ESPOL.*
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/13270>

Del Carpio, M. N. (2017). Propuesta de Mejora en el Área de Producción para incrementar las ventas de Ladrillos de la Ladrillera Continental SAC-Arequipa. *[Tesis de grado, Universidad Católica de San María].*
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c6935b24-e35d-4bc6-a007-9591095d266c/content>

Edvaldo, S., & Ricardo , S. (2017). Pegada hídrica: estudo de caso sobre telhas cerâmicas. *Ânima Educação.* <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/4341>

Gobierno del Perú. (14 de Julio de 2023). *Perú: alto riesgo de vulnerabilidad debido a crisis del agua.* <https://www.gob.pe/institucion/ceplan/noticias/690049-peru-alto-riesgo-de-vulnerabilidad-debido-a-crisis-del-agua>

Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard.* Londres, Reino Unido: Earthscan.

Irfan, Z., & Monda, M. (2016). Environmental Assessment on the Operative Mode of Tanneries. *American Journal of Engineering Research (AJER), 5(7), 169-175.*
https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/47615992/U050701690175-libre.pdf?1469786631=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEnvironmental_Assessment_on_the_Operativ.pdf&Expires=1721583128&Signature=eddD4CdG044PvU11yiNVCFyACn0U53xzZ5U8z1qYSwGde0uI

Islam, K., Motoshita, M., & Murakami, S. (2023, Marzo 15). Environmental sustainability of bricks in an emerging economy: current environmental hotspots and mitigation potentials for the future. *Sustainability*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/su15065228>

Katusiime, J., & Schütt, B. (2020). Integrated Water Resources Management Approaches to Improve Water Resources Governance. *Water*, 12(12), 3424. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12123424>

Ma, X., Zhang, T., Shen, X., Zhai, Y., & Hong, J. (2022, Febrero 22). Environmental footprint assessment of China's ceramic tile production from energy-carbon-water nexus insight. *Journal of Cleaner Production*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130606>

Ministerio de la Producción. (2010). *Guia de buenas practicas para ladrilleras artesanales*.

Navidi, W. (2021). *Principles of Statistics for Engineers and Scientists* (Segunda ed.). McGraw-Hill's Education.

Octavia, C., Laurence, & Hartono, N. (2017). Water footprint and life cycle assessment of concrete roof tile and brick products at PT. XYZ. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 109(012006). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/109/1/012006>

Ramos, J. (2015). *Costos y presupuestos en edificaciones* (Vol. 1). Lima, Perú: Editorial Marco. <https://editorialmacro.com/catalogo/costos-y-presupuestos-en-edificaciones/>

Rincón, C. D., Gil , J. C., Lesmes, C. A., & Caro , C. A. (2016). Evaluación de la Sostenibilidad de la Producción de Ladrillo en la Región de Boyacá, Colombia. *L'esprit Ingénieur*, 7(1).

SENCICO. (2020). *Norma E.070 Albañilería*. Reglamento Nacional de Edificaciones:

<https://drive.google.com/file/d/15N2ZQwZGegdoui4rrjTR6uq5blTu7uyv/view>

SERVIR. (Julio de 2021). *Gestión sostenible del agua*. Curso MOOC, Escuela Nacional de Administración Pública: www.enap.edu.pe.

Skouteris, G., Ouki, S., Foo, D., Saroj, D., Altini, M., Melidis, P., Cowley, B., Ells, G., Palmere, S., & O'Dell, S. (2018, Enero 20). Water footprint and water pinch analysis techniques for sustainable water management in the brick-manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 172(1), 786-794.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.213>

UNESCO & UN-Water. (2019). *he United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*. United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos.

Zhuo, L., Feng, B., & Wu, P. (Octubre de 25 de 2020). Water Footprint Study Review for Understanding and. *Water*, 12(11). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12112988>

CAPITULO VII

ANEXOS

7.1. Resultados de la Huella hídrica azul

Tabla 18

Resultados de la Huella hídrica azul.

Nº	HH azul (L/ladrillo)	HH azul (L/ladrillo)
1	1.214	0.582
2	1.225	0.559
3	1.242	0.574
4	1.231	0.552
5	1.216	0.586
6	1.249	0.568
7	1.238	0.589
8	1.227	0.563
9	1.245	0.571
10	1.213	0.578
Promedio	1.23	0.57

7.2. Panel fotográfico

Pesado de las muestras de la materia prima para elaborar ladrillos artesanales e industriales



Muestras en la estufa para determinar la humedad



Canal donde extraen el agua para el mezclado de la ladrillera industrial



7.3. Ficha técnica de ladrillos LAGT



FICHA TECNICA

DEFINICION DEL PRODUCTO			
	KING KONG 18 HUECOS		
USO :	<i>Ladrillo para muros portantes</i>	REQUISITOS NORMADOS:	
MATERIA PRIMA:	UNIDAD	ESPECIFICACION	NTP.399.613 NTP.331.017 RNE.070
PROPIEDADES FISICAS:			
PESO: Mínimo - Máximo	Kg	2.300 – 2.500	--
DIMENSIONES	Largo	cm	23
	Ancho	cm	12
	Alto	cm	9
ABSORCION DE AGUA	%	7	Máx. 22.0
AREA DE VACIOS	%	45 – 48	--
ALABEO	mm	<2	Máx. 4.0
DENSIDAD	g/cm ³	1.90 – 2.00	
EFLORESCENCIA		No presenta	No presenta
CLASE			
RENDIMIENTO	Mortero 1.0cm	Uni/m ²	42
	Mortero 1.5cm		39
PROPIEDADES MECANICAS			
RESISTENCIA A LA COMPRESION	Kg/cm ²	>130	Mín. 130

7.4. Panel fotográfico de ladrillera artesanal

Reservorio de agua para mezclado de arcilla



Mezclado de la arcilla para ladrillo



Armado de ladrillos en el horno artesanal



Instalaciones de la ladrillera artesanal

