

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura



Obtención de ladrillos por procesos de geopolimerización enfocado al mejoramiento de envolventes en edificaciones de uso residencial mediante la verificación de prestaciones constructivas arquitectónicas y ambientales

## **TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Ramiro Alberto Correa Jaramillo**

Maestro en Arquitectura

Madrid, 2024



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura

## **Doctorado en Construcción y Tecnologías Arquitectónicas**

Obtención de ladrillos por procesos de geopolimerización enfocado al mejoramiento de envolventes en edificaciones de uso residencial mediante la verificación de prestaciones constructivas arquitectónicas y ambientales

# **TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Ramiro Alberto Correa Jaramillo**

Maestro en Arquitectura

Bajo la dirección de:

Dr. Francisco Hernández Olivares

Madrid, 2024

Título: Obtención de ladrillos por procesos de geopolimerización enfocado al mejoramiento de envolventes en edificaciones de uso residencial mediante la verificación de prestaciones constructivas arquitectónicas y ambientales.

Autor: Ramiro Alberto Correa Jaramillo

Programa de Doctorado: Construcción y Tecnologías Arquitectónicas

Dirección de tesis:

Dr. Francisco Hernández Olivares  
Catedrático de Universidad Emérito. Universidad Politécnica de Madrid. (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:



## **Dedicatoria**

¡A Dios!

A Mercedes; mi esposa, Cayetana y Constanza; mis hijas, ¡mi inspiración, mi vida!

¡A la memoria de mi padre!

## Agradecimientos

Mi agradecimiento a la Universidad Politécnica de Madrid, por gestar este importante logro profesional y personal.

A la Universidad Técnica Particular de Loja en Ecuador, ya que por su apoyo hizo posible seguir avanzando en el conocimiento generado desde “*el último rincón del mundo*”, permitiendo proyectarnos y creer que todo es posible, con sacrificio, dedicación y perseverancia.

A Berenice, Alonso, Israel, Edy, Jean Carlos, Daniela, John, Renato, Carlos, Diego, Jonathan, con quienes fue posible realizar esta investigación y con quienes descubrimos los aportes en materiales. ¡A ellos, gracias!

¡A mi familia, por impulsarme y apoyarme en cada paso andado!

# Abstract

Brick is the second most widely used material in construction and tends to quickly turn into debris due to its use in buildings, demolitions, and even non-compliance with basic technical requirements, making it a discardable material. In Ecuador, brick production has not been significantly industrialized, resulting in highly variable and deficient properties. Specifically, in the city of Loja, most bricks come from artisanal factories in the vicinity of the city. The present research aims to generate a proposal for sustainable construction material through geopolymerization processes using discarded brick waste from the surplus of artisanal brick factories, which have been analyzed in this study.

Sodium hydroxide was used as the alkaline activator in the geopolymerization process. The geopolymer products were subjected to different solution contents (CS), molar concentrations (M), and varying temperatures to arrive at the formula that provides the best performance, both in the geopolymerization process and in the material's strength. This was followed by measuring other variables related to the practical application in building envelopes to determine a potential use for improving the thermal contributions of this material when applied constructively.

Additionally, by applying the Brazilian method for determining the optimization factor FO[1], it was concluded that the best result out of the 240 developed combinations was the one with: 12.5 M, 26% CS, and 150°C. After achieving this first objective, the determination of its physical-mechanical and chemical-mineralogical properties and composition continued, comparing them with the closest existing standards for this type of material. It was concluded that for compressive strength, it meets the

requirements, but for flexural strength, the obtained value is 15% below what the standard requires.

Once the optimal mix was determined, the fabrication of the tile-type brick (LTT) proceeded, including its physical and mechanical characterization and its geopolymerization behavior, to then analyze its application as a coating material in architectural envelopes. This phase was carried out using BIM tools (Archicad 24) and the EcoDesigner simulation software, following the process established in the ANSI/ASHRAE Standard 55, referred to as “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.” This included analyzing indoor thermal environmental factors such as temperature, thermal radiation, humidity, wind speed, occupant activity, and clothing.

The new material used as cladding on the facades of Loja was evaluated in a case study on social housing, using a conventional construction system. The simulation, conducted with Climate Consultant 6.0, showed a reduction in heating demand (Heating Degree Days, HDD) by 26.7% and in cooling demand (Cooling Degree Days, CDD) by 15.7%. These results highlight the thermal efficiency of the material and suggest the potential for future research on its use, recycling, and application in construction.

**Keywords: geopolymerization, brick waste, thermal efficiency**

# Resumen

El ladrillo es el segundo material más utilizado en la construcción y este tiende a transformarse rápidamente en escombros debido a su uso en construcciones, demoliciones, incluso por incumplimiento de requisitos técnicos básicos, lo que lo convierte en un material de descarte. En el caso de Ecuador no se ha industrializado en mayor medida su producción por lo que, las propiedades que estos presentan son altamente variables y deficientes. En el caso particular de la ciudad de Loja – Ecuador, la mayoría de los ladrillos provienen de fábricas artesanales de las proximidades de la urbe. Con esta referencia, la presente investigación; tiene como objetivo generar una propuesta de material sostenible para la construcción; mediante procesos de geopolimerización, usando residuos de ladrillos de descarte, provenientes del sobrante de las ladrilleras artesanales donde se fabrica este tipo de material y que han sido analizadas en este estudio.

Para el proceso de geopolimerización se utilizó como activador alcalino, el hidróxido de sodio. Los productos geopoliméricos fueron sometidos a diferentes contenidos de solución (CS), concentraciones molares (M) y temperaturas diferentes, hasta llegar con la fórmula que permita tener el mejor comportamiento; tanto en el proceso de geopolimerización, como de resistencia del material, para luego continuar con la medición de otras variables relacionadas a la aplicación práctica en envolventes de edificaciones y determinar un posible uso para el mejoramiento de las aportaciones térmicas de este material aplicado constructivamente.

Además, aplicando el método brasileño para la determinación del factor de optimización FO[1]; se concluye que, el mejor resultado de las 240 combinaciones desarrolladas la de mejor comportamiento es aquella que tiene: 12.5 M, 26% CS,

150°C<sup>1</sup>. Cumplido este primer objetivo, se continúa en la determinación de sus propiedades físico – mecánicas y químico – mineralógicas, de su composición y se compara con la normativa más apegada existente para este tipo de materiales, concluyendo que, para el caso de la resistencia a la compresión, este cumple; y, para el caso de la resistencia a la flexión, el valor obtenido es un 15% inferior al que requiere la normativa.

Una vez determinada la mezcla óptima, se procede con la fabricación del ladrillo tipo tejuela (LTT), y su caracterización física, mecánica y de su comportamiento de geopolimerización, para luego analizar su aplicación como material de revestimiento en envolventes arquitectónicas. Esta fase se la realiza, aplicando herramientas BIM (Archicad 24) y el software de simulación EcoDesigner, mediante el proceso establecido en la norma ANSI/ASHRAE Estándar 55, referido a “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, en el que se consideran los factores ambientales térmicos interiores, mediante el análisis de las variables de temperatura, radiación térmica, humedad y velocidad del viento, actividad y vestimenta de sus ocupantes.

El nuevo material utilizado como revestimiento en las fachadas de Loja ha sido evaluado en un caso de estudio sobre vivienda de interés social, utilizando un sistema constructivo convencional. La simulación, realizada con Climate Consultant 6.0, mostró una reducción en la demanda de calefacción HDD (Heating Degree Days) del 26.7% y en la demanda de refrigeración CDD (Cooling Degree Days) del 15.7%. Estos resultados destacan la eficiencia térmica del material y sugieren la

---

<sup>1</sup> Aunque la mezcla tenga buen comportamiento de resistencia del material, este primer acercamiento permitirá establecer el punto de inicio para poder disminuir sus costes, y fabricarlo a nivel industrial.

posibilidad de futuras investigaciones sobre su uso, reciclaje y aplicación en la construcción.

***Palabras claves:*** geopolimerización, residuo de ladrillos, eficiencia térmica

# Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i> .....	<i>iii</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>iv</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>vi</i>
1. <i>Introducción</i> .....	1
1.1. <i>Objetivos de la investigación</i> .....	4
1.1.1. <i>Objetivo General</i> .....	4
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4
2. <i>Estado de la cuestión</i> .....	7
2.1. <i>Geopolímeros</i> .....	7
2.1.1. <i>Proceso de geopolimerización</i> .....	13
2.1.2. <i>Estructura química de los geopolímeros</i> .....	14
2.1.3. <i>Propiedades generales de los geopolímeros</i> .....	15
2.1.4. <i>Aplicaciones de los geopolímeros</i> .....	16
2.2. <i>Fuente de aluminosilicatos</i> .....	16
2.3. <i>Solución alcalina activadora</i> .....	18
2.3.1. <i>Hidróxido de Sodio (NaOH)</i> .....	18
2.4. <i>Residuos de ladrillo</i> .....	19
2.5. <i>Aplicaciones de los residuos de ladrillos</i> .....	20
2.5.1. <i>Residuos de ladrillo como remplazo parcial del cemento</i> .....	20
2.5.2. <i>Residuos de ladrillo como agregado</i> .....	22
2.5.3. <i>Discusión de las contribuciones y efectos de los residuos de ladrillo</i> .....	22
2.6. <i>Innovación, construcción sostenible y ladrillos geopoliméricos</i> .....	22
3. <i>Materiales y métodos</i> .....	24
3.1. <i>Metodología utilizada y planificación de la investigación</i> .....	24
3.2. <i>Caracterización de la materia prima y determinación de la combinación óptima para prototipo</i> .....	25
3.2.1. <i>Selección del área de estudio</i> .....	25
3.2.2. <i>Ubicación de las fábricas de producción artesanal de ladrillo</i> .....	25
3.3. <i>Metodología experimental</i> .....	27
3.3.1. <i>Exploración y extracción de materia prima</i> .....	31
3.3.2. <i>Caracterización de la materia prima</i> .....	37
3.3.3. <i>Diseño experimental de la combinación óptima</i> .....	59
3.3.4. <i>Elaboración de discos de ensayo</i> .....	62

3.3.5.	<i>Comprensión diametral y factor de optimización en discos de ensayo</i> .....	65
3.3.6.	<i>Efecto de la temperatura de curado y concentración de solución</i> .....	68
3.3.7.	<i>Efecto de la concentración molar en diferentes temperaturas</i> .....	72
3.4.	<i>Selección de la mezcla óptima</i> .....	74
4.	<i>Resultados</i> .....	75
4.1.	<i>Aplicación del material geopolimérico en nuevos materiales constructivos</i>	75
	75	
4.1.1.	<i>Elaboración de prototipos</i> .....	75
4.1.2.	<i>Dimensiones del ladrillo tipo tejuela</i> .....	75
4.2.	<i>Caracterización de los ladrillos geopolimerizados tipo tejuela</i> .....	76
4.2.1.	<i>Caracterización físico - mecánica del ladrillo geopolimerizado tipo tejuela.</i>	76
4.2.2.	<i>Caracterización químico - mineralógica del LTT</i> .....	84
4.2.3.	<i>Verificación del Proceso de Geopolimerización mediante SEM</i> .....	88
4.2.4.	<i>Variables para modelación de especímenes</i> .....	96
4.2.5.	<i>Validación en modelo de compresión</i> .....	97
4.2.6.	<i>Validación en modelo de flexión simple</i> .....	99
4.2.7.	<i>Caracterización térmica del ladrillo tipo tejuela</i> .....	100
5.	<i>Discusión</i> .....	106
5.1.	<i>Simulación energética con uso de ladrillo tipo tejuela LTT en fachadas</i>	106
5.1.1.	<i>Determinación de zona climática</i> .....	108
5.1.2.	<i>Plataformas web y programas complementarios</i> .....	110
5.1.3.	<i>Análisis del clima exterior</i> .....	110
5.1.4.	<i>Análisis del caso de aplicación</i> .....	115
5.1.5.	<i>Simulación por ordenador</i> .....	119
5.1.6.	<i>Modelado 3d</i> .....	125
5.1.7.	<i>Configuración simulación</i> .....	126
5.1.8.	<i>Requerimientos de la envolvente de la edificación</i> .....	129
5.1.9.	<i>Verificación Cumplimiento NEC-HS_EE</i> .....	129
5.1.10.	<i>Paquetes constructivos y propiedades térmicas</i> .....	131
5.1.11.	<i>Sensación térmica de los usuarios</i> .....	132
5.1.12.	<i>Análisis del confort higrotérmico</i> .....	132
5.1.13.	<i>Aplicación</i> .....	134
5.1.14.	<i>Simulación térmica “Propuesta Vivienda Tipo I”</i> .....	136
5.1.15.	<i>Verificación Cumplimiento NEC:</i> .....	137
5.1.16.	<i>Impacto del revestimiento con ladrillos geopolimerizados en el rendimiento energético de la edificación analizada.</i> .....	140

5.1.17. Análisis de los beneficios energéticos de los ladrillos geopolimerizados tipo tejuela LTT.....	141
5.2. Análisis de eflorescencias de LTT .....	142
5.3. Análisis de resultado de lixiviado de ladrillo.....	144
5.4. Análisis de sostenibilidad basado en la composición y fabricación .....	146
5.4.1. Análisis de Costos de Materiales .....	147
6. Conclusiones .....	149
7. Recomendaciones.....	153
8. Futuras investigaciones.....	157
Anexos .....	163

# Lista de figuras

<b>Figura 1.</b>	<i>Etapas de la investigación</i>	6
<b>Figura 2.</b>	<i>Estado del arte de geopolimerización</i>	13
<b>Figura 3.</b>	<i>Modelo conceptual de geopolimerización</i>	14
<b>Figura 4.</b>	<i>Tipos de geopolímeros</i>	15
<b>Figura 5.</b>	<i>Microestructura geopolimérica</i>	17
<b>Figura 6.</b>	<i>Mapa de ubicación de los productores PC001 y PC002 – PM001 y PM002</i>	26
<b>Figura 7.</b>	<i>Metodología experimental</i>	30
<b>Figura 8.</b>	<i>Residuos de ladrillos</i>	31
<b>Figura 9.</b>	<i>Hidróxido de sodio</i>	32
<b>Figura 10.</b>	<i>Molde de prototipo</i>	33
<b>Figura 11.</b>	<i>Trituradora de mandíbulas BB100</i>	34
<b>Figura 12.</b>	<i>Prensa hidráulica</i>	34
<b>Figura 13.</b>	<i>Estufa de secado SLN180</i>	35
<b>Figura 14.</b>	<i>Equipo Shimadzu</i>	36
<b>Figura 15.</b>	<i>Equipo de densidades</i>	36
<b>Figura 16.</b>	<i>Color</i>	38
<b>Figura 17.</b>	<i>Sensación al tacto</i>	39
<b>Figura 18.</b>	<i>Consistencia en estado seco</i>	40
<b>Figura 19.</b>	<i>Textura</i>	42
<b>Figura 20.</b>	<i>Hidrometría</i>	43
<b>Figura 21.</b>	<i>Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PC001. Catamayo</i>	44
<b>Figura 22.</b>	<i>Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PC002. Catamayo</i>	45
<b>Figura 23.</b>	<i>Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PM001. Malacatos</i>	46
<b>Figura 24.</b>	<i>Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PM002. Malacatos</i>	47
<b>Figura 25.</b>	<i>Límite líquido: a) PC001, b) PC002, c) PM001 y d) PM002.</i>	49
<b>Figura 26.</b>	<i>Peso específico</i>	51
<b>Figura 27.</b>	<i>Estimación de carbonatos</i>	52
<b>Figura 28.</b>	<i>Estimación de materia orgánica</i>	53
<b>Figura 29.</b>	<i>Fluorescencia de rayos X</i>	54
<b>Figura 30.</b>	<i>FRX</i>	55
<b>Figura 31.</b>	<i>Difracción de rayos X: PC001</i>	57
<b>Figura 32.</b>	<i>Difracción de rayos X: PC002</i>	57
<b>Figura 33.</b>	<i>Difracción de rayos X: PM001</i>	58
<b>Figura 34.</b>	<i>Difracción de rayos X:PM002</i>	58
<b>Figura 35.</b>	<i>VARIABLES del proceso</i>	59
<b>Figura 36.</b>	<i>Discos con presiones inferiores a 17792.89N</i>	61
<b>Figura 37.</b>	<i>Elaboración de activador alcalino</i>	63

<b>Figura 38.</b> <i>Combinación suelo-solución</i> _____	63
<b>Figura 39.</b> <i>Elaboración de discos</i> _____	64
<b>Figura 40.</b> <i>Curado de discos</i> _____	64
<b>Figura 41.</b> <i>Ensayo brasileño de compresión diametral</i> _____	65
<b>Figura 42.</b> <i>Compresión diametral</i> _____	68
<b>Figura 43.</b> <i>Concentración de solución 22%</i> _____	69
<b>Figura 44.</b> <i>Concentración de solución 24%</i> _____	70
<b>Figura 45.</b> <i>Concentración de solución 26%</i> _____	71
<b>Figura 46.</b> <i>Fisuras generadas por exceso de temperatura de curado</i> _____	72
<b>Figura 47.</b> <i>Efecto de la concentración molar: a) 90 C y b) 200 C</i> _____	72
<b>Figura 48.</b> <i>Efecto de la concentración molar: a) 120°C, b) 150°C y c) 180°C</i> _____	73
<b>Figura 49.</b> <i>Proceso para la elaboración de prototipos</i> _____	75
<b>Figura 50.</b> <i>Dimensiones del prototipo de ladrillo tipo tejuela</i> _____	76
<b>Figura 51.</b> <i>Inmersión de prototipos por 24 horas</i> _____	77
<b>Figura 52.</b> <i>Determinación de la densidad y porcentaje de absorción de prototipos de materiales a base de residuos de ladrillos.</i> _____	78
<b>Figura 53.</b> <i>Ensayo de compresión</i> _____	80
<b>Figura 54.</b> <i>Resultados de resistencia a compresión</i> _____	81
<b>Figura 55.</b> <i>Ensayo a flexión</i> _____	82
<b>Figura 56.</b> <i>Resultado de resistencia a la flexión simple a los 7 días</i> _____	83
<b>Figura 57.</b> <i>Componentes químicos de los prototipos</i> _____	84
<b>Figura 58.</b> <i>Resultados ensayo DRX</i> _____	85
<b>Figura 59.</b> <i>Difractograma de rayos X (XRD), comparación de dos muestras residuos de ladrillo y ladrillo geopolimerizado</i> _____	86
<b>Figura 60.</b> <i>Análisis morfológico y químico elemental de la muestra de arcilla (A1) mediante SEM y EDS en el Punto de análisis 1</i> _____	91
<b>Figura 61.</b> <i>Análisis morfológico y químico elemental de la muestra de arcilla (A1) mediante SEM y EDS en el Punto de análisis 2</i> _____	92
<b>Figura 62.</b> <i>Mapeo de elementos de la muestra de arcilla (A1) mediante EDS en la zona de análisis A1</i>	94
<b>Figura 63.</b> <i>Análisis elemental a lo largo de una línea de escaneo en la muestra de arcilla (A1) mediante EDS</i> _____	95
<b>Figura 64.</b> <i>Esfuerzo deformación experimental vs FEM, Ensayo de compresión</i> _____	98
<b>Figura 65.</b> <i>Esfuerzo deformación experimental vs FEM, Ensayo a flexión en LTT</i> _____	99
<b>Figura 66.</b> <i>Determinación de medidas de probetas para ensayos de transferencia de calor</i> ____	101
<b>Figura 67.</b> <i>Instalación de fuente de calor calorímetro para ensayo</i> _____	101
<b>Figura 68.</b> <i>Colocación de placa para ensayo de forma vertical en el centro de la caja</i> _____	102
<b>Figura 69.</b> <i>Encendido de emisor y sellado de caja (calorímetro) a) encendido de foco en recinto emisor b) colocación de tapa y sellado de calorímetro</i> _____	102
<b>Figura 70.</b> <i>Colocación de sensores de termocupla para toma de datos</i> _____	103

<b>Figura 71.</b>	<i>Gráfica de transferencia de calor</i>	104
<b>Figura 72.</b>	<i>Probetas utilizadas en ensayos de transferencia de calor</i>	105
<b>Figura 73.</b>	<i>Fases para simulación del comportamiento térmico del material recompuesto</i>	106
<b>Figura 74.</b>	<i>Emplazamiento Ciudad Victoria</i>	107
<b>Figura 75.</b>	<i>Ciudad Victoria. Ciudad de Loja - Ecuador</i>	107
<b>Figura 76.</b>	<i>Obtención de datos a partir de Climate One Building</i>	108
<b>Figura 77.</b>	<i>Mapa de zonas climáticas en el Ecuador</i>	109
<b>Figura 78.</b>	<i>Temperatura de bulbo seco del aire por días y horas</i>	111
<b>Figura 79.</b>	<i>Radiación global horizontal por días y horas</i>	112
<b>Figura 80.</b>	<i>Radiación difusa vertical por días y horas</i>	112
<b>Figura 81.</b>	<i>Radiación directa normal por días y horas</i>	113
<b>Figura 82.</b>	<i>Humedad relativa por días y horas</i>	113
<b>Figura 83.</b>	<i>Velocidad del viento por días y horas</i>	114
<b>Figura 84.</b>	<i>Dirección del viento</i>	114
<b>Figura 85.</b>	<i>Planta Única – Elevación; Tipología I</i>	116
<b>Figura 86.</b>	<i>Comparación de diversas herramientas de simulación</i>	120
<b>Figura 87.</b>	<i>Configuración Ecodesinger</i>	122
<b>Figura 88.</b>	<i>Materiales de construcción</i>	123
<b>Figura 89.</b>	<i>Perfiles de operación de vivienda</i>	125
<b>Figura 90.</b>	<i>Bloques Térmicos Vivienda Tipo I</i>	125
<b>Figura 91.</b>	<i>Evaluación del Rendimiento Energético Vivienda Tipo I</i>	126
<b>Figura 92.</b>	<i>Detalle Unión Pared - Piso Tipología I</i>	128
<b>Figura 93.</b>	<i>Detalle Unión Pared - Cubierta Tipología I</i>	128
<b>Figura 94.</b>	<i>Requisitos Envolvente Zona Climática 3</i>	129
<b>Figura 95.</b>	<i>Requisitos de Envolvente Zona Climática 3</i>	133
<b>Figura 96.</b>	<i>Evaluación del Rendimiento Energético Propuesta- Vivienda tipo I</i>	136
<b>Figura 97.</b>	<i>Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Sala-Cocina, considerando mejoras en la cubierta y piso flotante</i>	138
<b>Figura 98.</b>	<i>Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Dormitorios, considerando mejoras en la cubierta y piso</i>	138
<b>Figura 99.</b>	<i>Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Sala-Cocina</i>	139
<b>Figura 100.</b>	<i>Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Dormitorios</i>	139
<b>Figura 101.</b>	<i>a.) fotografía prototipo LTT con eflorescencias b.) fotografía prototipo LTT cubierto con polidemetil siloxano</i>	143
<b>Figura 102.</b>	<i>Informe de resultados de análisis de metales pesados en lixiviado de ladrillo</i>	145

# Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b>	<i>Propiedades de los geopolímeros</i>	16
<b>Tabla 2.</b>	<i>Razón atómica Si - Al y su posible aplicación</i>	16
<b>Tabla 3.</b>	<i>Características de ubicación de las fábricas productoras</i>	25
<b>Tabla 4.</b>	<i>Propiedades del hidróxido de sodio</i>	32
<b>Tabla 5.</b>	<i>Características de trituradora de mandíbulas BB100</i>	34
<b>Tabla 6.</b>	<i>Características de estufa de secado SLN180</i>	35
<b>Tabla 7.</b>	<i>Características de la máquina a compresión y flexión</i>	35
<b>Tabla 8.</b>	<i>Caracterización por control de atributos</i>	37
<b>Tabla 9.</b>	<i>Sensación al tacto</i>	39
<b>Tabla 10.</b>	<i>Consistencia en estado seco</i>	40
<b>Tabla 11.</b>	<i>Textura</i>	41
<b>Tabla 12.</b>	<i>Caracterización físico – mecánica</i>	42
<b>Tabla 13.</b>	<i>Caracterización química – mineralógica</i>	51
<b>Tabla 14.</b>	<i>Estimación de carbonatos</i>	52
<b>Tabla 15.</b>	<i>Estimación de materia orgánica</i>	53
<b>Tabla 16.</b>	<i>Fluorescencia de rayos X</i>	54
<b>Tabla 17.</b>	<i>Dosificación de molaridad</i>	60
<b>Tabla 18.</b>	<i>Contenido de solución en la combinación suelo-solución</i>	60
<b>Tabla 19.</b>	<i>Resultados del ensayo de compresión diametral</i>	66
<b>Tabla 20.</b>	<i>Resumen del ensayo de densidad y porcentaje de absorción</i>	78
<b>Tabla 21.</b>	<i>Resistencia a la compresión simple mínima de diferentes normativas</i>	81
<b>Tabla 22.</b>	<i>Resistencia a la flexión simple mínima de diferentes normativas</i>	83
<b>Tabla 23.</b>	<i>Resumen del ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX)</i>	84
<b>Tabla 24.</b>	<i>Resumen del ensayo de difracción de rayos X (DRX)</i>	85
<b>Tabla 25.</b>	<i>Tabla de imágenes de arcilla A1, a diversas magnificaciones en microscopía de barrido electrónico.</i>	89
<b>Tabla 26.</b>	<i>Propiedades del ladrillo tejuela para modelación FEM</i>	97
<b>Tabla 27.</b>	<i>Validación del modelo a compresión</i>	98
<b>Tabla 28.</b>	<i>Validación del modelo a flexión</i>	99
<b>Tabla 29.</b>	<i>Resultados de ensayo de transferencia de calor</i>	104
<b>Tabla 30.</b>	<i>Referencia para zonificación climática NEC-HS-EE</i>	109
<b>Tabla 31.</b>	<i>Cuadro resumen del clima de la ciudad de Loja</i>	114
<b>Tabla 32.</b>	<i>Tipología viviendas</i>	116
<b>Tabla 33.</b>	<i>Tipología I</i>	116
<b>Tabla 34.</b>	<i>Paquetes Constructivos. Nivel de infiltración</i>	117
<b>Tabla 35.</b>	<i>Materialidad vivienda tipo I, vivienda de un piso</i>	118
<b>Tabla 36.</b>	<i>Componentes constructivos vivienda tipo I</i>	124

<b>Tabla 37.</b>	<i>Perfiles de Operación Vivienda Tipo I</i>	125
<b>Tabla 38.</b>	<i>Zonas Habitables Vivienda Tipología I</i>	130
<b>Tabla 39.</b>	<i>Paquete Constructivo Vivienda Tipo I</i>	131
<b>Tabla 40.</b>	<i>Porcentaje de Superficie Acristalada - Muro Neto Vivienda Tipo I</i>	132
<b>Tabla 41.</b>	<i>Sensación térmica de los usuarios</i>	132
<b>Tabla 42.</b>	<i>Análisis higrotérmico. Resultados</i>	133
<b>Tabla 43.</b>	<i>Valores de cumplimiento para envolvente de la edificación según normativa NEC-HS-EE</i>	133
<b>Tabla 44.</b>	<i>Materialidad Propuesta - Vivienda tipo I</i>	134
<b>Tabla 45.</b>	<i>Registro de temperaturas actual - propuesta tipología I</i>	136
<b>Tabla 46.</b>	<i>Verificación Cumplimiento NEC Propuesta Tipología I</i>	137
<b>Tabla 47.</b>	<i>Comparativa de parámetros energéticos y emisiones</i>	140
<b>Tabla 48.</b>	<i>Fases minerales (compuestos químicos) detectados en la muestra</i>	143
<b>Tabla 49.</b>	<i>Tabla resumen evaluación muestras óptimas de materiales en base a su factor de optimización</i>	158
<b>Tabla 50.</b>	<i>Requisitos de envolvente para la zona climática 3</i>	164
<b>Tabla 51.</b>	<i>Guía para el cálculo del factor mínimo R</i>	167
<b>Tabla 52.</b>	<i>Propiedades térmicas de los materiales a partir de la revisión literaria</i>	168
<b>Tabla 53.</b>	<i>Parámetros de Resistencia y Optimización en Compuestos de Ceniza de Café, Ceniza de Arroz y Cemento Bajo Diferentes Condiciones</i>	202

# Abreviaturas y Acrónimos

**HDD** - Heating Degree Days (Grados Día de Calefacción)

**CE** – Economía Circular

**CDD** - Cooling Degree Days (Grados Día de Refrigeración)

**RL** - Residuos de Ladrillo

**LTT** - Ladrillo Tipo Tejuela

**NaOH** - Hidróxido de Sodio

**BIM** - Building Information Modeling (Modelado de Información de Construcción)

**ANSI** - American National Standards Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares)

**ASHRAE** - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado)

**NEC** - Norma Ecuatoriana de la Construcción

**SE** - Espesor del material

**SR** - Transferencia de calor de referencia

**TE** - Transferencia de calor en el tiempo especificado

**LL** - Límite Líquido

**LP** - Límite Plástico

**Q** - Transferencia total de calor

**Q'** - Índice de transferencia de calor

**$\Delta t$**  - Intervalo de tiempo

**SEM** - Scanning Electron Microscope (Microscopio Electrónico de Barrido)

**EDS** - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X)

**SRI** - Solar Reflectance Index (Índice de Reflectancia Solar)

**SHGC** - Solar Heat Gain Coefficient (Coeficiente de Ganancia de Calor Solar)

**ASTM** - American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales)

**DRX** - Difracción de Rayos X

**FRX** - Fluorescencia de Rayos X

# 1.Introducción

La presente investigación busca analizar cómo prácticas locales pueden ofrecer soluciones globales, especialmente considerando que los residuos de construcción son una importante fuente de contaminación y el alto consumo energético en la producción de materiales de construcción actuales. En referencia a los residuos de ladrillo (RL), en China se estima que anualmente se generan 400 millones de toneladas por año<sup>2</sup> [2], en Estados Unidos (2015) se produjeron 11.39 millones de toneladas<sup>3</sup> [3], mientras que, en Ecuador, los residuos de la construcción alcanzan valores de 72 mil toneladas (2013); sin existir una clasificación adecuada de estos [4].

Esta clase de desecho presenta un gran potencial para ser reciclado y reutilizado como material de construcción, siendo una alternativa amigable con el ambiente a través de un manejo sostenible y reduciendo el uso de recursos naturales<sup>4</sup> en la fabricación de materiales [5]. Estos procesos ya se han venido desarrollando a nivel global, por lo que en la presente investigación se pretenderá llegar a determinar si el material local cumple con los requisitos previos para ser activados alcalinamente, determinar las mejores combinaciones y estimar sus aportaciones y comportamiento en la aplicación de este material.

---

2 Esta cifra ha aumentado drásticamente, pasando de 0.470 mil millones de toneladas en 2006 a 3.037 mil millones de toneladas en 2020. Se prevé que esta cifra supere los 4 mil millones de toneladas para 2026.

3 En los Estados Unidos, la cantidad de residuos de construcción y demolición alcanzó los 145 millones de toneladas en 2018, con más del 75% de estos residuos terminando en vertederos. Los materiales de construcción, como el concreto y el asfalto, representaron el 85% de los residuos totales de construcción y demolición.

4 Como dato de referencia, para la elaboración de ladrillos, en las proximidades del cantón Catamayo, cercano a la ciudad de Loja en Ecuador, se estima un uso de 20 m<sup>3</sup> de madera combustible para la producción de 10.000 ladrillos

Por otro lado, la fuente de aluminosilicatos para la conformación de geopolímeros que presentan los residuos de ladrillos por su composición química lo definen como un material inorgánico con propiedades de tipo cerámico; que pueden ser producidos a temperatura ambiente o temperaturas ligeramente altas [6], que es precisamente en donde existe la aportación que se pretende dar en esta investigación y su aporte al ambiente, disminuyendo la emisión de CO<sub>2</sub>. Todo este proceso busca una activación de aluminosilicatos, que dependen de la policondensación del material puzolánico que normalmente se da, con una solución alcalina en una matriz que presenta sílice y alúmina [7].

Además, los geopolímeros son comúnmente utilizados como materiales para la elaboración de concreto, fabricación de morteros de alta resistencia y en la formulación de materiales cerámicos [5].

En Ecuador, especialmente en Loja, la fabricación de ladrillos no se ha industrializado, afectando sus propiedades. Mayormente se utilizan ladrillos artesanales de Catamayo y Malacatos, cerca de 40 km de Loja. Además, partiendo del hecho que la resistencia a compresión de los ladrillos producidos en Catamayo y Malacatos, no cumplen con los requisitos mínimos establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC [8] revisado en [9], el presente caso de investigación se podría estimar como una alternativa de solución viable, para mejorar las propiedades de este material.

Esta investigación evalúa la viabilidad de fabricar ladrillos utilizando residuos triturados de ladrillos cocidos a bajas temperaturas mediante geopolimerización. Se examinarán las propiedades físicas (densidad, porosidad, permeabilidad, manchas y eflorescencias) y mecánicas (flexión, compresión, rigidez), así como las características térmicas del material. El estudio incluirá una simulación

computacional para predecir el rendimiento térmico del material en revestimientos de edificaciones, mejorando el confort adaptativo en Loja. Los resultados se compararán con los indicadores Heating Degree Days (HDD) y Cooling Degree Days (CDD), que para Loja son 588 y 2339, respectivamente.

## 1.1. Objetivos de la investigación

### 1.1.1. Objetivo General

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un material de construcción sostenible a través de la geopolimerización, utilizando residuos de ladrillo. Busca asegurar que el material cumpla con las Normas Ecuatorianas de la Construcción (NEC) para su uso en envolventes arquitectónicas, evaluando su contribución a las prestaciones constructivas, arquitectónicas y ambientales de las edificaciones.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- a. Estudiar las propiedades físicas: densidad, porosidad, permeabilidad, absorción capilar, lixiviación, determinación de manchas y eflorescencias; mecánicas: flexión, compresión, rigidez de material; y térmicas, de ladrillos fabricados a base de residuos triturados finos de ladrillos cocidos a bajas temperaturas mediante la activación de procesos geopoliméricos.
- b. Optimizar técnicamente el uso de las mezclas para que permitan obtener el proceso de geopolimerización, con la finalidad de obtener una optimización del material.
- c. Estudiar las características físicas, mecánicas y térmicas de los prototipos para que puedan ser aplicados en el ámbito constructivo.

Para lograr el objetivo general, la metodología que se aplicó en este proyecto está basada en las siguientes etapas:

**Primera etapa:** 1A. Exploración y extracción de materia prima. En esta parte del proceso se ubicó los productores de ladrillos principalmente utilizados en la construcción en la ciudad de Loja. Utilizando el método de muestreo aleatorio, se

seleccionaron cuatro fábricas y aplicando lo establecido en la NTE INEN 0292 2015 [10] se procedió a recolectar las unidades de mampostería.

Los ladrillos fueron sometidos a procesos de trituración para constituir los residuos que se producirían normalmente en la construcción y demolición.

**Segunda etapa:** 2A. Caracterización de la materia prima. Se procede al trabajo de laboratorio que consiste en una caracterización de la materia prima mediante ensayos físicos, químicos y mineralógicos.

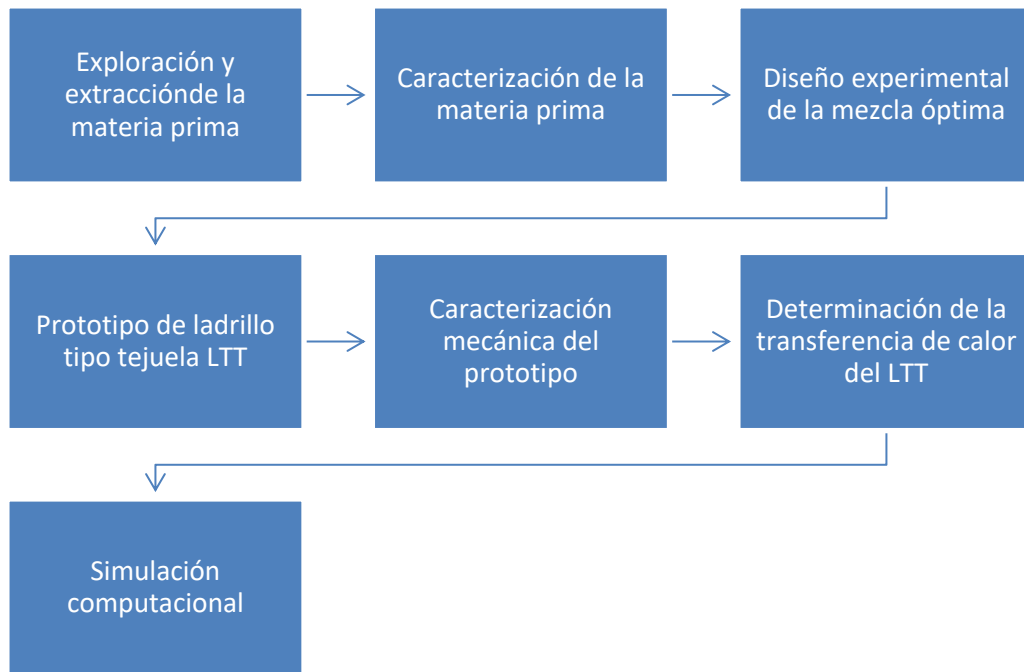
**Tercera etapa:** 3A. Diseño experimental de la mezcla óptima. En esta etapa se elabora discos para evaluar la capacidad máxima de carga que puede soportar una combinación antes de fallar; mediante el ensayo de compresión diametral. Este ensayo permite determinar el factor de optimización (FO), parámetro que determinará la combinación óptima, para ser aplicado en el prototipo.

**Cuarta etapa:** 4A. Prototipo ladrillo tipo tejuela (LTT), en esta etapa se usará esta combinación óptima para la manufactura de unidades de mampostería y su evaluación correspondiente a su caracterización.

**Quinta etapa:** 5A. Caracterización mecánica del prototipo

**Sexta etapa:** 6A. Determinación de la transferencia de calor del LTT

**Séptima etapa:** 7A. Simulación computacional, para pronosticar el comportamiento del prototipo en su aplicación constructiva.



**Figura 1.** Etapas de la investigación

## 2.Estado de la cuestión

### 2.1. Geopolímeros<sup>5</sup>

En el contexto del estado del arte de los geopolímeros, el estudio de Seymour et al [11] denominado "Reactive ceramic aggregates in mortars from ancient water infrastructure serving Rome and Pompeii" proporciona información valiosa sobre el uso de agregados cerámicos triturados en morteros romanos antiguos, utilizados en infraestructuras hídricas como cisternas y acueductos. Este estudio revela que estos fragmentos cerámicos actuaban como fuentes de aluminosilicatos reactivos, formando fases de C-A-S-H (calcio-aluminio-silicato-hidratos) que densificaban y rellenaban poros y grietas en el mortero, mejorando así su durabilidad. Los procesos post-puzolánicos identificados, que incluyen la formación de minerales como la estratlingita y la filipsita, contribuyeron a la longevidad de estas estructuras. La práctica romana de utilizar agregados cerámicos puede inspirar el desarrollo de geopolímeros modernos más duraderos y sostenibles, utilizando materiales reciclados para mejorar sus propiedades mecánicas y sostenibilidad ambiental. Este enfoque es particularmente relevante para la investigación actual en geopolímeros, donde la búsqueda de materiales de construcción ecológicos y duraderos es una prioridad.

El trabajo de Davidovits, J. (1991) en Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. Journal of Thermal Analysis<sup>6</sup>, es considerado fundamental en el estudio

---

<sup>5</sup> la investigación actual en la geopolimerización de materiales cerámicos se centra en optimizar las mezclas de reacción, evaluar las propiedades mecánicas y durabilidad de los geopolímeros producidos, y explorar aplicaciones específicas en la construcción y rehabilitación de infraestructuras.

<sup>6</sup> 37, 1633-1656.

de geopolímeros. En él, Davidovits introduce el concepto de geopolimerización, describiendo cómo los aluminosilicatos reaccionan con soluciones alcalinas para formar materiales poliméricos inorgánicos. Esta referencia es esencial para comprender los fundamentos químicos y las aplicaciones potenciales de los geopolímeros, especialmente en lo que respecta a la utilización de materiales cerámicos y otros residuos industriales para producir materiales de construcción sostenibles y de bajo impacto ambiental.

Davidovits en [12] en el apartado 1.3 referencia los álcalis como el hidróxido de sodio y potasio, que se utilizaron originalmente para probar la escoria molida de alto horno llegando a determinar si se fijaría esta, usando cemento Portland (1930).

El científico belga Purdon (1940) descubrió que la adición alcalina producía un nuevo aglutinante de endurecimiento rápido. Los cementos de escoria activados por álcalis (llamados cementos Trief) se utilizaron en la construcción a gran escala en (1950).

La activación habitual requería añadir un 1,5 % de NaCl (cloruro de sodio) y un 1,5 % de NaOH (hidróxido de sodio) a una mezcla de escoria molida al 97%<sup>7</sup>, (1953). En (1957), Victor Glukhovsky, un científico que trabaja en Ucrania en el KICE<sup>8</sup>. desarrolló aglutinantes de escoria activados por álcalis y en las décadas de (1960) y (1970) hizo una importante contribución en la identificación tanto de los hidratos de silicato de calcio como de los hidratos de aluminosilato de calcio y sodio como productos de solidificación. También señaló que las rocas y los minerales de arcilla reaccionan durante el tratamiento con álcalis para formar hidratos de aluminio - silicato de sodio, confirmando el trabajo anterior realizado sobre la reactividad de la

---

<sup>7</sup> EE. UU. Estación de experimentación de vías navegables del ingeniero del ejército

<sup>8</sup> Instituto Kev de Ingeniería Civil de la URSS

arcilla. Glukhovsky llamó a los hormigones producidos con esta tecnología "hormigones de silicato del suelo" (1959) y a los aglutinantes "cementos del suelo" (1967). Más recientemente, los científicos del cemento acuñaron estos productos AAM (materiales activados por álcalis) y también afirmaron que los cementos geopolímeros eran AAM, generando confusión. Los materiales activados por álcalis no son geopolímeros porque no son polímeros, solo hidratos de los tipos N-A-S-H (hidratado de aluminosilicato de sodio) y K-A-S-H (hidratado de aluminosilicato de potasio).

Borchert y Keidel (1949) prepararon hidrosodalita (Na-PS) haciendo reaccionar a la caolinita en una solución concentrada de NaOH, a 100°C.

Howell (1963) obtuvo un tipo de zeolita A, utilizando caolín calcinado (metacaolín) en lugar de caolinita, evitando la formación de hidrosodalita.

En (1972), el equipo ceramista Jean Paul Latapie y Michel Davidovics confirmaron que las baldosas cerámicas resistentes al agua podían fabricarse a temperaturas inferiores a 450°C, es decir, sin cocción. Un componente de la arcilla, la caolinita, reaccionó con sosa cáustica a 150°C. De hecho, la aplicación industrial de esta reacción de caolinita con álcali comenzó en la industria cerámica con Niels Olsen (1934) y más tarde fue redescubierta en 1964 por Berg et al. (1970), un equipo ruso, pero sin ninguna implementación industrial exitosa.

En (1969), Besson, Caillère y Hénin en el Museo Francés de Historia Natural, París, llevó a cabo la síntesis de hidrosodalita a partir de varios filosilicatos (caolinita, montmorillonita, halloyita) a 100°C en solución concentrada de NaOH (Besson et al., 1969).

En (1972), en el laboratorio CORDI en Saint-Quentin, desarrollaron una tecnología basada en esta geosíntesis, que se ha revelado en varias patentes emitidas sobre las aplicaciones de la llamada "Siliface - Proceso" (Davidovits y Legrand, 1974). A una mezcla natural de caolinita/cuarzo (relación de peso 50/50) se añadió y se mezcló NaOH sólido en la proporción de 2 moles o menos de NaOH por 1 mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de aluminio) de la caolinita contenida, y agua (1-1,5 g de agua por 1 g de NaOH)<sup>9</sup>.

El (1979), Davidovits J., patenta un proceso químico en el que, por definición logra sintetizar polímeros inorgánicos que han sido formados por aluminosilicatos, obteniendo un material similar en propiedades mecánicas similares a las de los cerámicos, usando bajas temperaturas.

Por definición, los geopolímeros también se definen por ser materiales aglutinantes y cementicios. Y representan una potencial alternativa para reemplazar al cemento Portland y otros materiales compuestos de alta tecnología [13]

La definición química, para los geopolímeros o polisilicatos, como su nombre lo indica, son un conjunto de silicatos, formados por tetraedros de  $\text{SiO}_4$  (silicato) y  $\text{AlO}_4$  (aluminato) conectados mediante átomos de oxígeno. Y para que ocurra un balance óptimo de cargas negativas, es fundamental la presencia de iones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  o  $\text{Ca}_2^+$  en la materia prima [14].

---

<sup>9</sup> Los gránulos resultantes se presionaron en frío a 15 MPa. Los parámetros termo-endurecibles fueron: temperatura: de 130°C a 180°C; presión hidráulica aplicada: superior a la presión de vapor saturada del agua, para la temperatura seleccionada, es decir, de 10 a 30 bars; tiempo: un minuto por milímetro de espesor a 150°C o 10 minutos para una placa de 10 milímetros de espesor. Del 65 al 75 % del tiempo total se dedica a desgasificar el agua. El tiempo de ajuste es relativamente corto. En ausencia de un dispositivo permeable, es decir, cuando la desgasificación no funciona, ¿la policondensación en hidrosodalita se produce muy rápidamente en un tiempo tan corto como 15 - 20 segundos por grosor milimétrico, a 180°C y 40 kg/cm<sup>2</sup> de presión hidráulica. Sin embargo, debido a la alta presión interna del agua y al peligro de explosión, la prensa debe estar equipada con dispositivos de seguridad (véase más detalles en el capítulo 7). De lo contrario, se recomienda esperar hasta que el artículo se haya enfriado a temperatura ambiente antes de abrir la prensa.

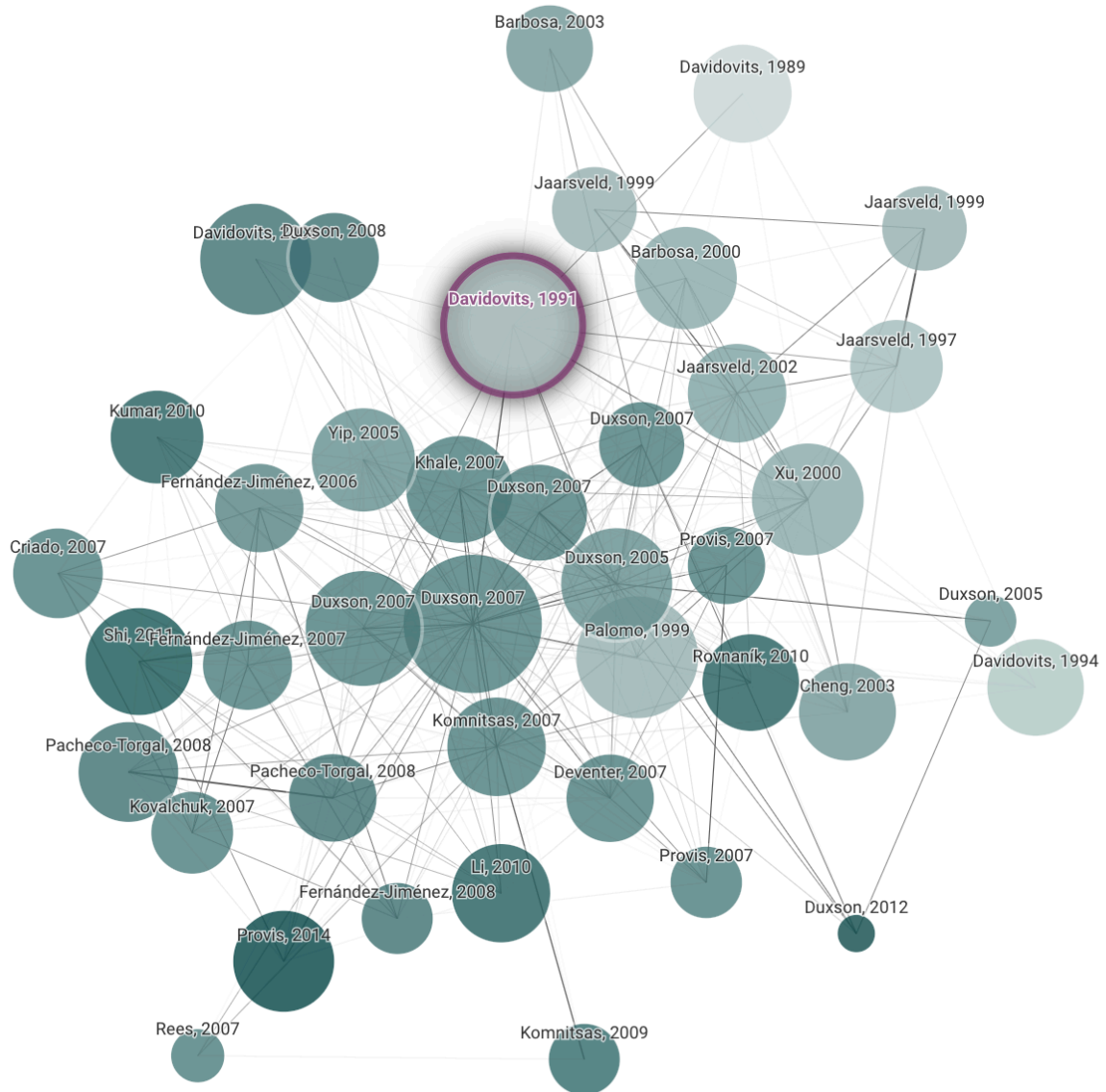
Las materias primas compuestas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de aluminio) y  $\text{SiO}_2$  (óxido de silicio) podrían sintetizarse en geopolímeros, generalmente estos procesos han sido trabajados con base a cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín y otros materiales ricos en aluminosilicatos, que se convierten en elementos altamente reactivos. Además de este tipo de materia prima, existen otros factores que tienen influencia directamente las propiedades de los geopolímeros, los cuales son: razón atómica de silicio / aluminio de la materia prima, naturaleza y concentración del activador alcalino y la temperatura de curado [15].

Los polisilicatos se caracterizan por presentar las siguientes características: alta resistencia al fuego, buen coeficiente de aislamiento térmico, refracción térmica, alta resistencia a la compresión, se utilizan para contención de contaminantes radioactivos y tóxicos, entre muchas otras aplicaciones [16].

Por otro lado, el enfoque en la economía circular (CE) aplicada a los residuos de construcción y demolición (CDW) es fundamental para desarrollar estrategias sostenibles que reduzcan los impactos ambientales y maximicen la reutilización de recursos. De acuerdo con López R. L., en [17] la investigación sobre la economía circular aplicada a los residuos de construcción y demolición (CDW) enfatiza la importancia de estrategias sostenibles que reduzcan los impactos ambientales y promuevan la reutilización de recursos. Este enfoque implica integrar prácticas que abarquen todo el ciclo de vida de los materiales, desde la fase de diseño hasta la demolición, favoreciendo el diseño que facilita el reciclaje y la reutilización y adoptando la deconstrucción selectiva para maximizar la recuperación de materiales. La adopción de políticas y marcos estratégicos efectivos es esencial para fomentar la utilización de materiales reciclados y técnicas de construcción menos generadoras de residuos.

Finalmente, la integración de geopolímeros dentro de un modelo de economía circular en la gestión de residuos de construcción y demolición implica desarrollar materiales de construcción que utilicen desechos reciclados como materias primas, aprovechando su capacidad para incorporar diversos residuos industriales. Esto conlleva a una reducción significativa en la utilización de recursos vírgenes y disminución de residuos destinados a vertederos, promoviendo un ciclo de vida del material más sostenible. La colaboración entre investigadores, la industria de la construcción y la construcción de normativa es crucial para fomentar la adopción y la innovación en aplicaciones de construcción sostenibles basadas en geopolímeros, alineándose con los principios de minimización de residuos y uso eficiente de recursos.

A continuación en la Figura 2. se visualiza una red de citas bibliográficas centradas en el campo de los geopolímeros, con "Davidovits, 1991" como el nodo central y más influyente, reflejando su papel fundamental en la literatura sobre geopolímeros. Los tamaños de los nodos indican la frecuencia de citas, destacando la importancia de ciertos trabajos y autores dentro de la comunidad científica. Este mapa de conexiones demuestra cómo ciertas investigaciones han guiado el desarrollo del conocimiento en esta área especializada.



**Figura 2.** Estado del arte de geopolimerización  
Adaptado de <https://www.connectedpapers.com>

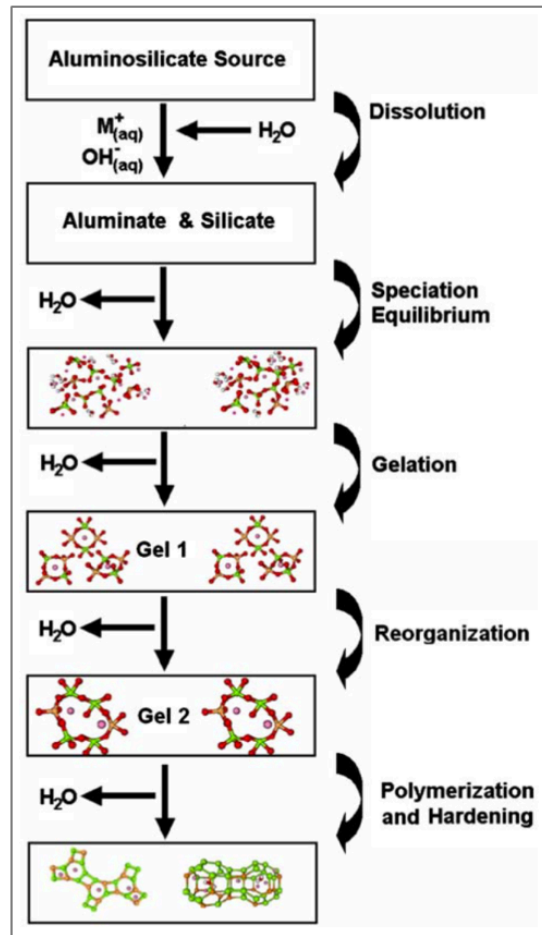
### 2.1.1. Proceso de geopolimerización

Para el proceso de geopolimerización, se requiere que la reacción química de minerales formados en su mayoría por silicio y aluminio, sean disueltos con una solución activadora, proceso al que también podría denominarse como “geosíntesis”.

La alcalinidad de la solución y el hidróxido estimulan la hidrólisis de los átomos de silicio y aluminio a partir de la materia prima de aluminosilicatos, formando

monómeros inorgánicos en la solución que luego se policondensan, transformándose en una estructura rígida [14].

En el documento de Duxson et al. [18] se establece una secuencia simplificada de lo que ocurre en el proceso de geopolimerización, la cual se muestra en la Figura 3.



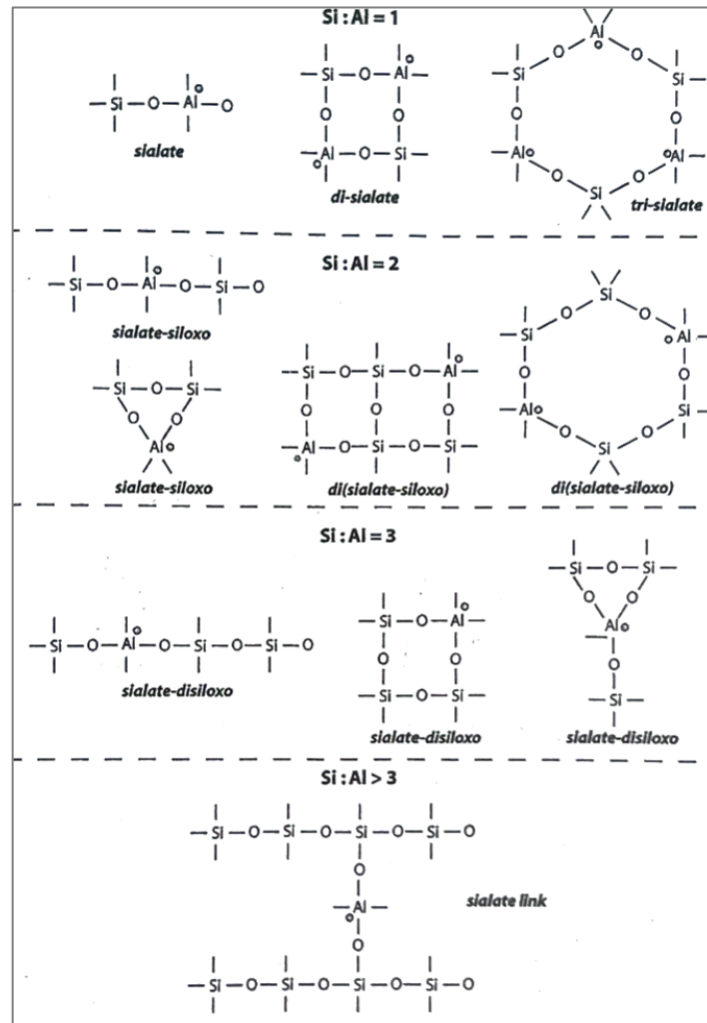
*Figura 3. Modelo conceptual de geopolimerización  
Fuente: Adaptado de Duxson et al. (2007)*

### 2.1.2. Estructura química de los geopolímeros

Los elementos de silicio y aluminio conectados tetraédricamente por el intercambio de átomos oxígenos son los componentes de los polímeros inorgánicos.

La unidad básica de la estructura de los geopolímeros son los monómeros sialatos (O-Si-O-Al-O), y fundamentado en la experiencia, Davidovits estableció que se pueden formar tres tipos de geopolímeros en función de la razón atómica silicio / aluminio de la materia prima, como se muestran en la Figura 4.

Estos son: polisialatos, polisialato - siloxo y polisialato - disiloxo.



**Figura 4.** Tipos de geopolímeros

Fuente: Adaptación de (Davidovits, 2020), pág. 35. 5ta. Edición

### 2.1.3. Propiedades generales de los geopolímeros

En la Tabla 1. , se describen las principales propiedades que presentan los geopolímeros:

**Tabla 1.** Propiedades de los geopolímeros

Propiedades	Descripción
Químicas	Alta resistencia al ataque de ácidos y sulfatos Resistencia al fuego
Físicas	Módulo de Young (2 GPa) Agrietamiento en la etapa de fraguado menor al 0.05% Elevada resistencia temprana después de 24 horas Conductividad al calor (0.2 a 0.4 W/m°C) Calor específico (0.7 a 1.0 J/kg°C) Conductividad eléctrica
Térmicas	Fase exotérmica (<100°C y >300°C) Fase endotérmica (>100°C y <300°C)

Fuente: Adaptado de Davidovits (2020)

#### 2.1.4. Aplicaciones de los geopolímeros

La razón atómica de Si – Al, se constituye en el primer aspecto que permite investigar acerca de las propiedades específicas y las aplicaciones que pueden presentar los geopolímeros.

Se puede resumir algunas de las relaciones con sus distintas aplicaciones de la siguiente forma:

**Tabla 2.** Razón atómica Si - Al y su posible aplicación

Razón	Aplicación
<3:1	Estructura tridimensional muy rígida Aplicaciones generales para uso de cemento y concreto
1:1	Aplicaciones cerámicas y cerámicas refractarias
2:1	Aplicaciones de encapsulación de residuos tóxicos y radiactivos
3:1	Aplicaciones industriales en el rango de 200°C a 600°C
>3:1	Estructura menos rígida y más flexible Aplicaciones poliméricas
35:1	Presentan cadenas 2D Aplicaciones como sellantes o adhesivos

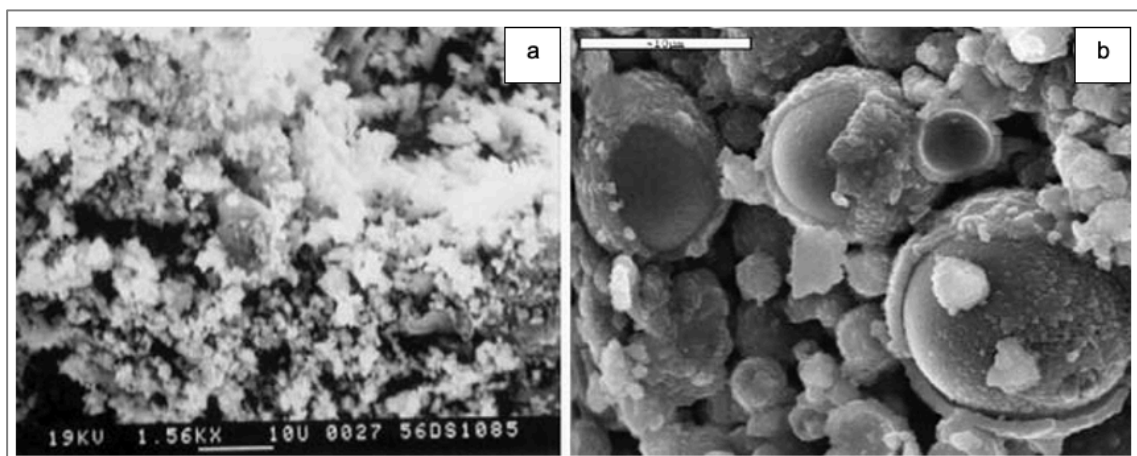
## 2.2. Fuente de aluminosilicatos

La fuente de aluminosilicatos de la cual fueron sintetizados, son los que aportan las características y la estructura de los geopolímeros. Duxson et al, [19] determinó que la materia prima y su procesamiento, son grandes determinantes del

comportamiento, trabajabilidad y de las propiedades físicas y químicas de los productos geopoliméricos.

La similitud de las características macroscópicas de los geopolímeros que provienen de algunas fuentes de aluminosilicatos es muy común; sin embargo, su microestructura y sus diferentes propiedades físicas, mecánicas, químicas y térmicas varían en función de la materia prima de la cual se parte.

Las grandes diferencias microestructurales que presenta un geopolímero sintetizado a partir de un metacaolín y otro a partir de ceniza volante clase F, se pueden observar en la 0; sin embargo, en los dos casos se mantiene su microestructura organizada por los mismos enlaces de silicio y aluminio, y por las mismas fases de gelación. Esto nos permite inferir, que todos los geopolímeros sin importar su materia prima llegan a establecerse de acuerdo con el modelo conceptual de geopolimerización.



**Figura 5.** Microestructura geopolimérica

Fuente: Adaptado de (Duxson et al., 2007) - a) Metacaolín activado con 8 M NaOH y b) Ceniza Volante activado con 8 M NaOH

De lo anterior; para sintetizar un geopolímero, se requieren materias primas compuestas de silicio y aluminio, además de cationes como calcio, magnesio,

sodio, y potasio. La proporción silicio - aluminio es crucial para evaluar su comportamiento, variando según la fuente de aluminosilicatos y su capacidad de activación.

## **2.3. Solución alcalina activadora**

Su función es importante en el proceso de geopolimerización, acelera la disolución de la fuente de aluminosilicatos y permiten luego la formación de una estructura compacta del geopolímero elaborado. Para este efecto es común el uso de soluciones basadas en hidróxido de sodio y silicato de sodio, en diferentes cantidades y molaridades, punto por el cual pueden mejorar sus propiedades mecánicas y químicas [16].

### **2.3.1. Hidróxido de Sodio (NaOH)**

Denominada también como sosa cáustica, su fabricación es artificial a través de la caustificación o la electrólisis, y puede ser altamente corrosiva. Considerada como un sólido blanco cristalino, sin olor e higroscópico, cuando entra en contacto con algún líquido presenta una reacción exotérmica. La caustificación consiste en combinar un compuesto de sodio con otro hidróxido. La electrólisis de una solución acuosa de salmuera o cloruro sódico genera lejía. El proceso industrial se realiza a partir del cloruro sódico fundido, generando cloro gas y sodio metálico. Este último se mezcla con agua y produce hidróxido de sodio e hidrógeno [20].

En el estudio de Xu et al. [21] se postula que la adición de hidróxido de sodio mejora significativamente la disolución de los minerales presentes en la materia prima durante el proceso de geopolimerización, en comparación con otros activadores químicos. Este principio fundamenta la investigación actual, cuyo objetivo es

determinar la proporción óptima de hidróxido de sodio para su aplicación efectiva en el mencionado proceso.

## 2.4. Residuos de ladrillo

En la industria global de la construcción, el ladrillo, solo superado por el concreto en uso, a menudo se convierte rápidamente en escombros por su aplicación o desecho al no cumplir con los estándares técnicos mínimos en sus distintas aplicaciones. Este proceso de descarte depositado en escombrera provoca además un impacto visual y ecológico, negativo al entorno. A continuación, algunos datos que nos permiten tener una idea de cuánto de este material se estaría considerando como material de descarte. En China se estima que anualmente se generan 400 millones de toneladas de residuos de ladrillos (RL) por año [22], en Estados Unidos en el año 2015 se produjeron 11.39 millones de toneladas (EPA, 2020) [23], mientras que en Ecuador los residuos de construcción alcanzaron valores de 72 mil toneladas en el año 2013 sin existir una clasificación de estos (INEC, 2013). Más recientemente, en 2020, se recolectaron 12,613 toneladas de residuos de construcción y demolición (CDW)<sup>10</sup>, destacando la necesidad de mejorar su gestión.

Esta clase de desecho presenta un gran potencial para ser reciclado y reutilizado en varias industrias, siendo una alternativa amigable con el ambiente a través de un manejo sostenible y reduciendo el uso de recursos naturales en la fabricación de materiales para la construcción [22]. El origen y la composición se convierten en

---

<sup>10</sup> Chamba-Coronel, J. C., Solano-Peláez, J. L., & Paucar-Camacho, J. A. (2023). Plan de manejo de residuos de construcción y demolición. Caso de estudio: Planta de asfalto de Loja-Ecuador. *Journal Scientific MQRInvestigar*, 7(3), 1652-1675. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.3.2023.1652-1675>

los dos factores primordiales para considerar las propiedades de los RL, pues de esto dependerá su recomposición.

La investigación subraya la ausencia de un método organizado para la separación de escombros, que pueden incluir contaminantes como metales y vidrio, aumentando la complejidad del reciclaje. Se enfoca en los Residuos de Ladrillo (RL) de fábricas artesanales cerca de Loja, buscando su reutilización en construcciones futuras.

## **2.5. Aplicaciones de los residuos de ladrillos**

Para estructurar la recomposición de los RL, se ofrece una revisión en tres partes. Primero, se examina la influencia de los RL como aglutinante en las propiedades mecánicas de hormigón convencional y geopolimérico, y en la fabricación de ladrillos geopoliméricos. La segunda parte resume los efectos de utilizar los RL como agregados en el concreto convencional. Finalmente, se analizan las contribuciones y efectos de los RL tanto como aglutinante como agregado en el comportamiento del concreto.

### **2.5.1. Residuos de ladrillo como remplazo parcial del cemento**

Partiendo del hecho de que un material generalmente es aceptado como un material puzolánico si la suma  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  es mayor a 70%, y que los RL contienen altos niveles de silicio y aluminio, se puede inferir *a priori* que este elemento puede tener presencia de actividad puzolánica y que puede ser una opción para reemplazar parcialmente al cemento Portland.

La comparación realizada entre la actividad puzolánica entre ceniza volante y los RL, en [23] concluye que los RL presentan una menor actividad puzolánica debido al alto contenido de minerales cristalinos. Otro de los factores que influyen en la

actividad puzolánica de los RL es el tamaño de la partícula, estableciendo que un menor tamaño de partícula aceleraría la actividad puzolánica por aumento de la reactividad. Cuanto más fino es el material, más reactivo [24]

Para Wong C. en [25] se encontró que el reemplazo de hasta un 20% del cemento con polvo de ladrillo, genera un concreto y mortero con una mayor resistencia a la compresión que el convencional. A su vez, determinaron que el incremento del óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) aumenta la resistencia. Y en el caso de reemplazar el cemento en un porcentaje mayor al 30%, la resistencia decaería debido a que los RL poseen una alta porosidad provocando que el cemento se deshidrate muy rápidamente.

Los RL pueden ser usados para la fabricación de concreto geopolimérico y se ha determinado que presentan una mayor resistencia a la compresión que los concretos con cemento convencional [26]

Según Turner et al. [27] en su estudio han determinado que en el proceso de elaboración de concreto geopolimérico se emiten un 80% menos de  $\text{CO}_2$  que en el del cemento Portland, cabe recalcar que este porcentaje puede variar en función del lugar donde se realice el estudio.

Además, en el de documento de Amin et al. [28] determinaron que estas unidades de mampostería caracterizadas por su alta resistencia a la compresión, su durabilidad y su alta resistencia térmica en comparación con los ladrillos comunes, se convierten en posibilidades para aplicaciones de RL, en la fabricación de ladrillos geopoliméricos.

### **2.5.2. Residuos de ladrillo como agregado**

Tal como lo manifiestan Wong et al. [29], las investigaciones sobre el uso de RL como agregados para hormigón han demostrado su potencial, aunque con la advertencia de que estos materiales son intrínsecamente más frágiles y porosos. Consecuentemente, los hormigones producidos con RL ofrecen una resistencia a la compresión; inferior y sufren una contracción más significativa durante el curado en comparación con el hormigón estándar.

### **2.5.3. Discusión de las contribuciones y efectos de los residuos de ladrillo**

El estado del arte permite considerar a los RL como una fuente de aluminosilicatos válidos para procesos de geopolimerización, ya sea para concreto geopolimérico o de ladrillos geopoliméricos, esto haría notar su factibilidad como elemento aglutinante, en reemplazo parcial del cemento.

## **2.6. Innovación, construcción sostenible y ladrillos geopoliméricos**

Según, (Camino & Müller, 1994<sup>11</sup>) mediante una recopilación bibliográfica y determinación metodológica por indicadores, establece que; el concepto de sostenibilidad se expresa en que es la gestión y preservación adecuada de los recursos naturales y la búsqueda de nuevos sistemas que no comprometan las necesidades de las generaciones presentes y futuras.

---

<sup>11</sup> Tomado de [https://books.google.com.ec/books?id=fiQOQAAlAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=fiQOQAAlAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false); el 2 de julio de 2022

La acumulación de Residuos de Ladrillo (RL) en vertederos genera impactos visuales y ambientales adversos. En Ecuador, la fabricación de ladrillos, además de degradar y agotar los recursos naturales, conlleva un alto consumo energético, especialmente durante la cocción. Esto subraya la urgencia de desarrollar nuevas técnicas de producción que minimicen el uso de recursos naturales y la contaminación, asegurando así la sostenibilidad para futuras generaciones.

A través de la investigación y desarrollo, la utilización de RL para fabricar ladrillos geopoliméricos se presenta como una práctica metodológica sostenible. Esta técnica beneficia el medio ambiente al reciclar desechos de construcción y disminuir la energía necesaria para la producción, resultando en ladrillos que respetan la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) y pueden ser usados en revestimientos arquitectónicos. El estudio sugiere posibilidades futuras para el empleo de materiales verdaderamente sostenibles, con un menor impacto energético en su fabricación.

## **3. Materiales y métodos**

### **3.1. Metodología utilizada y planificación de la investigación**

Uno de los temas que han sido poco explorados en ámbitos investigativos ha sido el relacionado con la reutilización o reciclaje de materiales para ser insertos nuevamente en el proceso de la industria de la construcción y su posible aplicación.

El presente trabajo investigativo pretende explorar esas nuevas oportunidades partiendo de un concepto de desarrollo sostenible y economía circular para tratar de mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>, en el ambiente.

La investigación se centra en desarrollar nuevos métodos de configuración de materiales a través de la geopolimerización, utilizando estudios anteriores como referencia. Parte de la caracterización de residuos de ladrillo en Loja, Ecuador, con el fin de hallar la mezcla ideal de materiales. Los ensayos, realizados en la Universidad Técnica Particular de Loja, buscan reutilizar polvo de ladrillo en la creación de ladrillos tipo tejuela (LTT) para exteriores, evaluando su funcionalidad y sus efectos energéticos en construcciones.

Finalmente, debido a sus características de tipo natural, dado el material ocupado para la recomposición mediante activación alcalina, y su comportamiento en cuanto la producción de eflorescencias durante el proceso de ejecución se realizan los estudios de DRX y FRX, del material expuesto a la intemperie, para establecer procesos de impermeabilización y descarte de elementos nocivos a la salud,

mitigados en gran parte en el uso y aplicación a envolventes exteriores de edificaciones.

## 3.2. Caracterización de la materia prima y determinación de la combinación óptima para prototipo

### 3.2.1. Selección del área de estudio

Se han seleccionado Malacatos y Catamayo como las dos localidades de estudio para el análisis de Residuos de Ladrillo (RL), provenientes de fábricas artesanales, que son esenciales para la construcción en Loja, Ecuador. La elección aleatoria de estas fábricas permite una comprensión amplia de la procedencia de los RL y su impacto en la manufactura artesanal de ladrillos.

### 3.2.2. Ubicación de las fábricas de producción artesanal de ladrillo

*Tabla 3. Características de ubicación de las fábricas productoras*

	Catamayo		Malacatos	
	PC001	PC002	PM001	PM002
<b>Coordenadas</b>	17M 681378 m E, 9557894 m S	17M 681648 m E, 9557932 m S	17M 692434 m E, 9534104 m S	17M 691814 m E, 9533290 m S
<b>Barrio</b>	La Vega		Trinidad	
<b>Temperatura media anual (°C)</b>	25,0		19,9	
<b>Temperatura máxima absoluta (°C)</b>	34,3		20,0	
<b>Temperatura mínima absoluta (°C)</b>	13,5		11,0	
<b>Precipitación media anual (mm/año)</b>	401,9		669,1	
<b>Vientos (m/s)</b>	3,0		3,0	
<b>Distancia Loja - fábrica (km)</b>	35,0	35,0	35,0	34,0

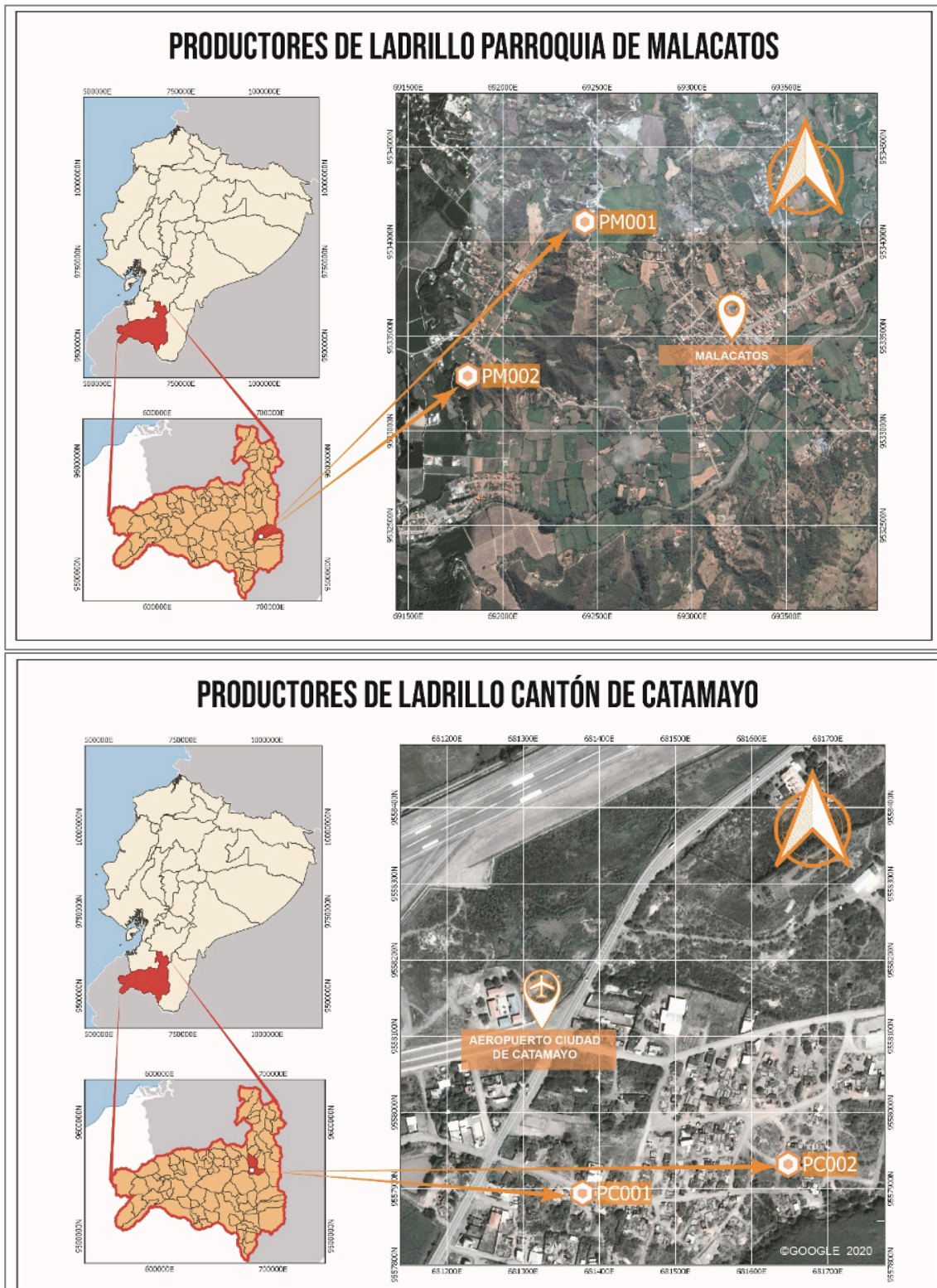


Figura 6. Mapa de ubicación de los productores PC001 y PC002 – PM001 y PM002

### 3.3. Metodología experimental

Para la primera parte de la investigación, se realizó un estudio de carácter experimental aplicado a la materia prima, que comprende una etapa de campo y una etapa de laboratorio. En el trabajo de campo, se ejecutó la exploración y obtención de la materia prima. Y el trabajo de laboratorio se lo efectuó en las siguientes fases:

- Caracterización de materia prima,
- Diseño experimental de la mezcla óptima.

Lo que refiere al trabajo de campo; consistió en la ubicación de los productores de ladrillos más utilizados en la construcción en la ciudad de Loja – Ecuador. Utilizando el método de muestreo aleatorio, se seleccionó cuatro fábricas y aplicando lo establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana: NTE INEN 0292,2015<sup>12</sup> se procedió a recolectar las unidades de mampostería. Los ladrillos escogidos fueron triturados y cuyo primer proceso fue manual, usando herramientas como: combo, martillo, cincel, etc., para luego en un segundo proceso en laboratorio usando el equipo denominado trituradora de Retsch, se consiguen partículas menores a 4 mm, o tamiz #10, con lo que se obtiene el primer proceso de obtención de materia prima.

La etapa de laboratorio comenzó con la primera fase (a) caracterización de la materia prima, cuya finalidad es conocer los atributos y las propiedades: físicas, químicas y mineralógicas del suelo. Esta actividad permitió caracterizar la base de los componentes que permitirán pronosticar el comportamiento de la materia prima en el proceso de geopolimerización.

---

<sup>12</sup> Tomado de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/n-te-inen-292-1.pdf> el 05/07/2022

Para el diseño experimental de la mezcla óptima (b), se determinan las variables que influyen en el proceso de estabilización del suelo aplicando geopolimerización.

Estas son:

- Molaridad de la solución alcalina,
- Contenido de solución alcalina,
- Carga o fuerza de estabilización; y,
- Temperatura de curado.

La **molaridad** de solución alcalina es el contenido de moles de hidróxido de sodio en la solución. Las molaridades estudiadas son: 5M, 7.5M, 10M y 12.5M.

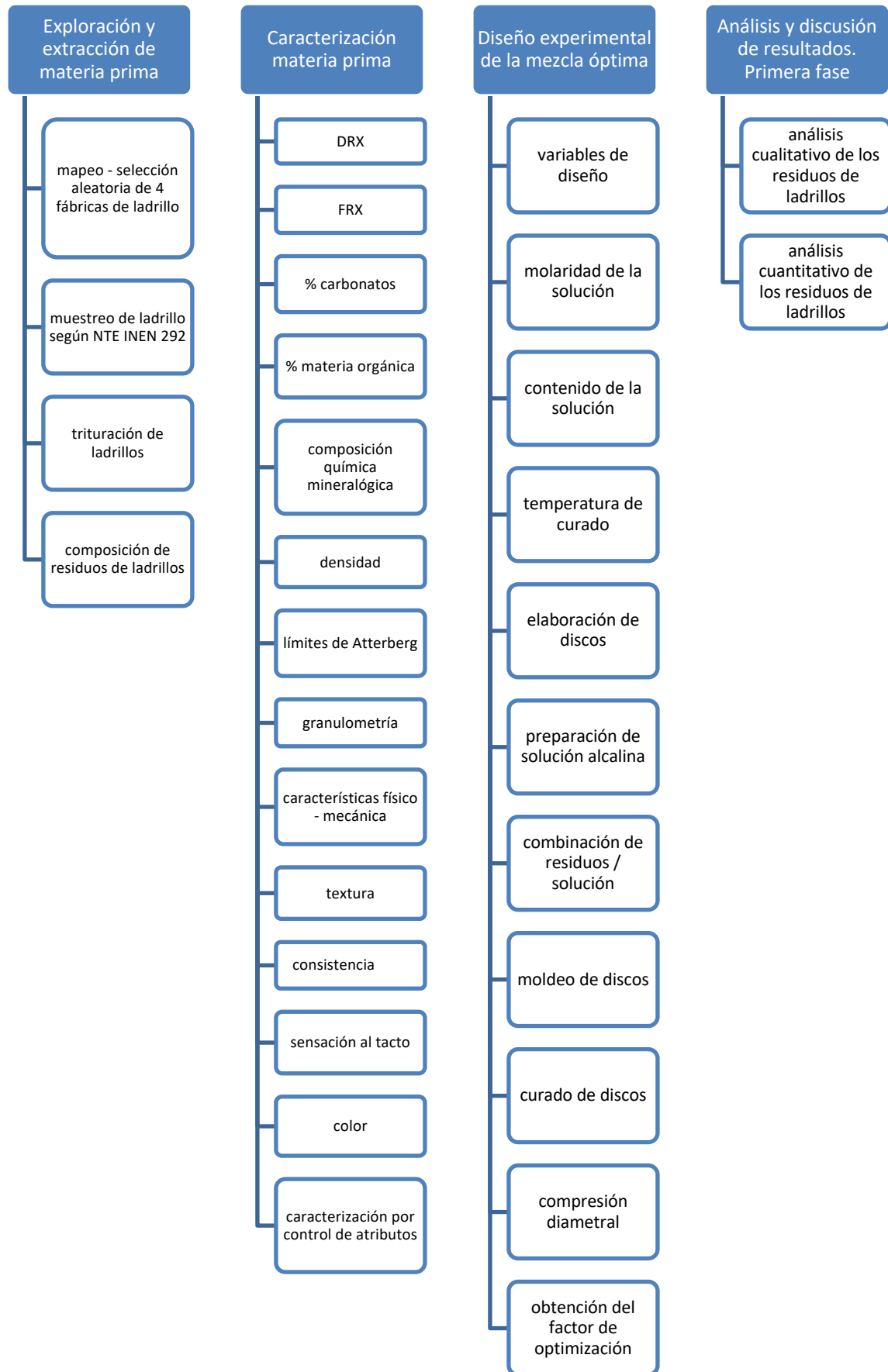
El contenido de **solución alcalina** es el porcentaje que representa la solución de un 100% de combinación residuo - solución. Los contenidos estudiados son: 22%, 24% y 26%.

La **carga o fuerza de estabilización** fue de 17792.89 N (4000 lb), valor que se mantuvo constante para la ejecución de todo el estudio.

Las **temperaturas de curado** fueron aplicadas durante 16 horas en la “estufa de secado”. Las temperaturas consideradas fueron: 90°C, 120°C, 150°C, 180°C y 200°C.

Se realizaron 60 combinaciones, creando cuatro probetas por cada una con dimensiones de 7 cm de diámetro y 2 cm de espesor. Las probetas se fabricaron usando una mezcla homogénea de residuos de cuatro fábricas de ladrillos. Esta fase concluyó con las probetas sometidas a ensayos de compresión diametral para determinar el factor de optimización (FO), crucial para seleccionar la combinación óptima.

Para finalizar esta fase, las probetas fueron sometidas al ensayo de compresión diametral, para la obtención del factor de optimización (FO). El mismo que sería el componente esencial para la correcta selección de la combinación óptima.



**Figura 7. Metodología experimental**

### 3.3.1. Exploración y extracción de materia prima

#### 3.3.1.1. Materiales

A continuación, se describen cada uno de los materiales y equipo utilizados en el proceso de experimentación.

##### *a. Residuos de ladrillos*

De acuerdo con lo citado por Wong et al. [30] para realizar el proceso de geopolimerización se puede emplear este material puzolánico por presentar principalmente en su composición química  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Estos son fuentes de silicio y aluminio, fundamentales para la formación de los tetraedros de oxígeno de silicio y aluminio. El radio de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en los residuos de ladrillos es muy cercano a  $2^{13}$ , con lo cual se puede formar geopolímeros con buenas propiedades bajo las condiciones adecuadas.



**Figura 8.** Residuos de ladrillos

---

<sup>13</sup> La función de distribución radial nos da la densidad de átomos en función de la distancia del átomo considerado. Moreno J.A., 2000, Barcelona, Análisis de óxidos de silicio y estructuras multicapa para aplicaciones microelectrónicas.

### b. Hidróxido de sodio

En la geopolimerización, la solución activadora clave se elabora con hidróxido de sodio, utilizado también en industrias como la petrolera, papelera, y en la producción de celofán, plásticos y jabones.

Las principales propiedades que presentan el hidróxido de sodio son las descritas en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Propiedades del hidróxido de sodio

Propiedades	Descripción
Apariencia, olor y estado físico	Sólido blanco inodoro en forma de escamas
Gravedad específica (agua=1)	2.13/25°C
Peso en 1000 ml de agua (g)	40
%Pureza	≥97.0%
Punto de ebullición (°C)	1390
Punto de fusión (°C)	318
Viscosidad (cp)	4 a 350°C
pH	14 (solución 5%)
Solubilidad	Agua, alcohol y glicerol

*Nota. Adaptado de Fisher Scientific*



**Figura 9.** Hidróxido de sodio

*Nota. a) Envase de hidróxido de sodio y b) Hidróxido de sodio*

### c. Agua Destilada

Para elaborar la solución alcalina con el hidróxido se usó agua destilada, la cual se genera mediante un proceso donde el agua se hierve hasta convertirse en vapor,

dejando atrás impurezas y minerales. Este vapor se dirige a un condensador, donde se enfría y se convierte nuevamente en líquido. El agua condensada, ahora libre de contaminantes asegura alta pureza.

***d. Molde de prototipo***

Para el proceso de moldeado de la mezcla se utilizó el molde con las siguientes características, largo de 11 cm, ancho 5 cm y altura de 2 cm.



***Figura 10. Molde de prototipo***

**3.3.1.2. Equipos**

A continuación, se describen cada uno de los equipos que se utilizaron a lo largo del proceso de experimentación.

***a. Trituradora***

Para el proceso de homogenización de los residuos de los ladrillos se empleó la unidad de trituración de mandíbulas Retsch BB 100, que presenta las características detalladas en la Tabla 5.



**Figura 11.** Trituradora de mandíbulas BB100

**Tabla 5.** Características de trituradora de mandíbulas BB100

Propiedades	Descripción
Marca	Retsch
Aplicación	Trituración previa y gruesa
Principio de molienda	Presión ejercida en la muestra
Tipo de material	Semiduro, duro, frágil, tenaz
Ejemplos de Aplicación	Minerales, materiales de construcción, Clinker, cuarzo, aleaciones
Granulometría inicial	< 50 mm
Granulometría final	< 4 mm
Potencia de motriz	0,75 kW
Peso neto	137 kg

*Nota. Adaptado de Retsch*

**b. Prensa hidráulica**

Para el proceso de estabilización mecánica del suelo se utilizó la prensa hidráulica con capacidad máxima de 26689.33 N (6000 lb).



**Figura 12.** Prensa hidráulica

### c. Estufa de secado

Para el proceso de curado de los especímenes se empleó la estufa de secado SLN 180, que presenta las propiedades descritas en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Características de estufa de secado SLN180

Propiedades	Descripción
Marca	Pol-Eko Apartura
Temperatura	5°C sobre temperatura ambiente...+300°C
Potencia nominal	2800 W
Peso neto	94 kg

*Nota. Adaptado de Pol-Eko Apartura*



**Figura 13.** Estufa de secado SLN180

### d. Equipo de compresión y flexión

Para la realización del ensayo de compresión y flexión se empleó la máquina Shimadzu, que presenta las propiedades descritas en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Características de la máquina a compresión y flexión

Propiedades	Descripción
Marca	Shimadzu
Modelo	Concrete2000knx
Serie	I331155JO345
Potencia nominal	250v, 50Hz / 200-220, 60Hz



**Figura 14.** Equipo Shimadzu

**e. Equipo de densidades**

Para la realización del ensayo de densidades y porcentaje de absorción se empleó el equipo mostrado en la Figura 15. , consta de una balanza hidrostática, con registro de peso sumergido y el consiguiente volumen aparente. Aparte se mide el peso seco y se aplica las fórmulas usuales. O, similar. Volumen aparente en  $\text{cm}^3$ : peso seco menos peso sumergido (g) dividido por el peso específico del agua ( $1\text{g}/\text{cm}^3$ ). La densidad aparente se calcula: peso seco (g) dividido por volumen aparente ( $\text{cm}^3$ ).



**Figura 15.** Equipo de densidades

### 3.3.2. Caracterización de la materia prima

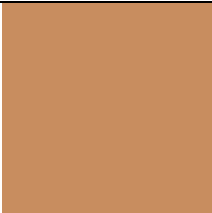
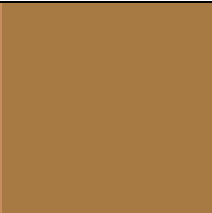
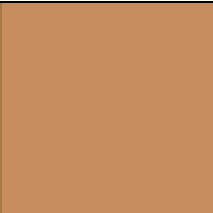
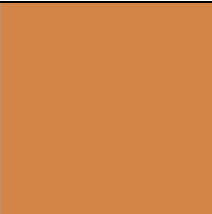
Según se señala en el documento de NRCS Soils Staff [31]<sup>14</sup>, los compuestos necesarios para que los residuos funcionen como una fuente precursora para la geosíntesis, químicamente es el óxido de hierro y óxido de aluminio, coincidente además con el color amarillo rojizo en general.

La sensación al tacto percibida en los residuos permitió su identificación como arenas por su baja capacidad de conservación y almacenamiento de agua.

La consistencia que se percibió en los residuos determinó que son suelos con un muy bajo grado o nulo de cohesión.

La textura percibida en los residuos fue arenosa, lo que significa que el suelo tiende a permanecer suelto y granular en estado seco y húmedo. Además, permitió determinar que el tamaño de sus partículas estaría comprendido entre  $50 \mu\text{m} < \phi < 200 \mu\text{m}$ . A continuación, en la Tabla 8. se detallan los resultados de los ensayos realizados para la caracterización por control de atributos.

**Tabla 8.** Caracterización por control de atributos

Propiedad	PC001	PC002	PM001	PM002
<b>COLOR</b>				
	7.5 YR 4/7	10 5 YR 4/6	7.5 YR 4/7	7.5 YR 6/7
<b>SENSACIÓN AL TACTO</b>	Arena	Arena	Arena	Arena
<b>CONSISTENCIA</b>	Suelta	Suelta	Suelta	Suelta
<b>TEXTURA</b>	Arenoso	Arenoso	Arenoso	Arenoso

<sup>14</sup> Revisado en

[https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf), el 05/07/2022

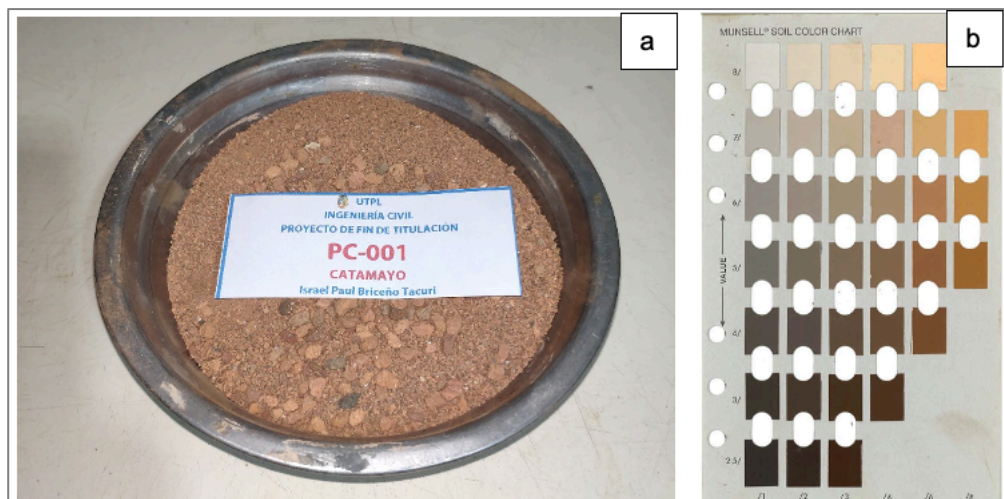
### 3.3.2.1. Color

Se efectuó esta identificación con el catálogo de colores para suelo de Munsell en [32], para obtener un nombre que pueda ser fácilmente reconocido internacionalmente. Este sistema clasifica los colores del suelo por su matiz, valor y croma.

El matiz se define en las relaciones de las siguientes abreviaciones: R para rojo, Y para amarillo, B para azul y P para morado.

El valor indica la luminosidad del color del suelo. Para su notación se usa números que van desde el 0 al 10. Como, por ejemplo: 5YR se encuentra en la mitad del matiz amarillo y rojo, y se extiende desde 10R (cero YR, completamente rojo) a 10YR (cero Y, completamente amarillo).

El croma indica la intensidad del color del suelo. Para su notación se usa números que empiezan en 0 para grises neutrales, y se va incrementando en intervalos iguales a un máximo de 20, valor que es inusual en suelos. Para suelos completamente acromáticos (grises puros, blanco y negro) que no tienen matiz ni croma se usa la N (neutral).



**Figura 16.** Color

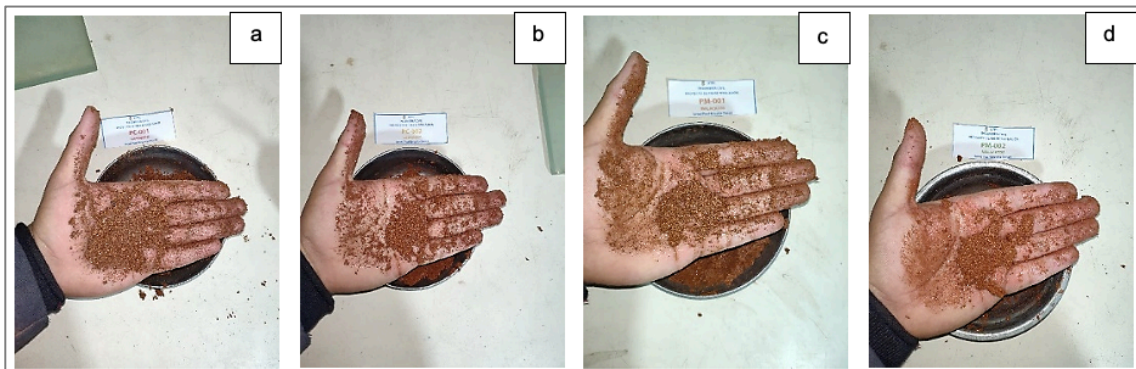
### 3.3.2.2. Sensación al tacto

El procedimiento desarrollado se basó en el documento de Thien [33]<sup>15</sup>, el cual permite indagar la capacidad de conservación y almacenamiento de agua que presenta el suelo, en función de la textura y el tamaño de partículas, para el que se ubica una muestra representativa del suelo en un recipiente, se añade agua con un gotero hasta conseguir una consistencia del suelo plástica y moldeable. Tomando de inmediato esta masilla de suelo en la palma de la mano se procede a presionarlo cerrando la mano. Seguido se observa el comportamiento del suelo y lo clasifica según la Tabla 9.

**Tabla 9.** Sensación al tacto

Tipo de suelo	Rollo
Arena	No forma rollo.
Limo	Casi no forma rollo.
Arcilla	Forma rollo.

*Nota. Adaptado de Thien (1979)*



**Figura 17.** Sensación al tacto

*Nota. a) PC001, b) PC002, c) PM001 y d) PM002*

<sup>15</sup> Revisado en [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/home/?cid=nrcs142p2\\_054311](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/home/?cid=nrcs142p2_054311), el 05/07/2022

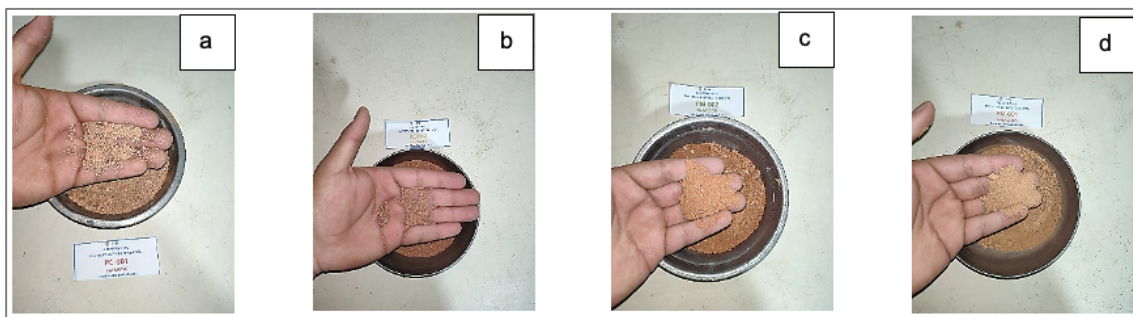
### 3.3.2.3. Consistencia

El procedimiento desarrollado se basó en el documento de NRCS Soils Staff [31]<sup>16</sup>, el cual permite comparar los atributos del suelo expresados según el grado y tipo de cohesión; y de su resistencia a la deformación. Esto se logra, ubicando una muestra representativa del suelo seco en un recipiente. Luego se aplica presión con la mano hasta lograr que el suelo pierda su estructura inicial, como se exhibe en la 0Para finalizar observar el comportamiento del suelo y clasificarlo según la Tabla 10.

**Tabla 10.** Consistencia en estado seco

Consistencia	Características
Suelto	Sin cohesión, no se puede tomar un fragmento sin que se desmorone.
Frágil	Casi no tiene cohesión y es frágil; se rompe con una muy leve presión y se transforma en polvo o partículas.
Levemente firme	Leve resistencia a la presión; se rompe con la presión del pulgar y el dedo índice.
Firme	Moderada resistencia a la presión; se puede romper con las manos sin mucha dificultad, pero apenas se rompe con la presión del pulgar y el dedo índice.
Muy Firme	Muy resistente a la presión; se puede romper con las manos con dificultad, no se rompe con la presión del pulgar y dedo índice.
Extremadamente firme	Extremadamente resistente a la presión; no se puede romper con las manos.

*Nota. Adaptado de NRCS Soils Staff (1951)*










**Figura 18.** Consistencia en estado seco

<sup>16</sup> Revisado en [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveyman1951file1.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveyman1951file1.pdf) , el 05/07/2022

### 3.3.2.4. Textura

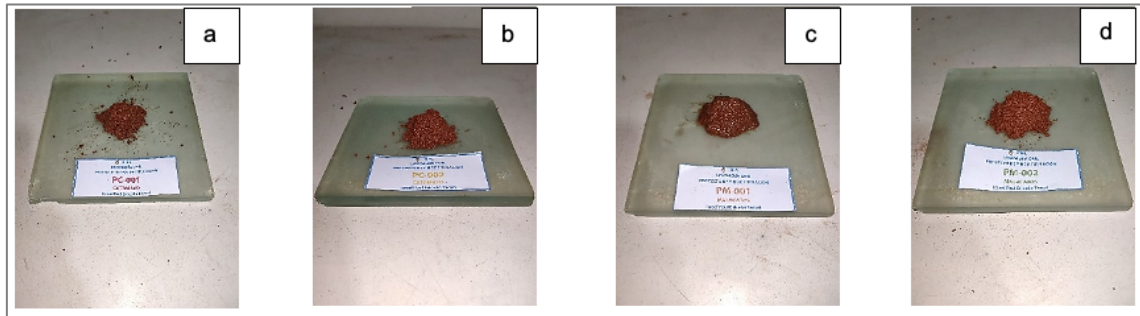
El objetivo será determinar la granulometría del suelo y la presencia de arcilla, limo y arena mediante el procedimiento desarrollado en NRCS Soils Staff [31]<sup>17</sup>. Esto se logra, ubicando una muestra representativa del suelo en un recipiente. Luego se añade agua con un gotero hasta conseguir una consistencia del suelo plástica y moldeable. En caso de que el suelo esté muy seco agregar más agua. Y si está muy húmedo adicionar porciones pequeñas de suelo seco. Para finalizar observar el comportamiento del suelo y clasificarlo según la Tabla 11. , y como se exhibe en la Figura 19.

**Tabla 11. Textura**

Textura	Características	Presentación
Arenoso ( $50\ \mu\text{m} < \phi < 200\ \mu\text{m}$ )	El suelo permanece suelto y granular. Se puede formar una pirámide, pero se desmorona fácilmente.	
Franco Arenoso	El suelo contiene arena e ínfimas cantidades de limo y arcilla, que le dan un poco de cohesión. Se puede formar una bola que no se desmorona.	
Franco ( $2\ \mu\text{m} < \phi < 50\ \mu\text{m}$ )	El suelo contiene una mezcla de arena, limo y arcilla. Se puede formar un rollo pequeño y corto.	
Franco limoso	El suelo contiene gran cantidad de limos, e ínfimas cantidades de arena y arcilla. Se puede formar un rollo de 6 pulgadas que se rompe al doblarlo.	
Franco arcilloso	El suelo contiene gran cantidad de arcilla, e ínfimas cantidades de arena y limos. Se puede formar un rollo, y doblarlo en U, sin romperse.	
Arcilloso limoso	El suelo contiene una mezcla de arcilla y limo. Se puede formar un rollo, y doblarlo como un anillo con algunas grietas.	
Arcilloso ( $\phi < 2\ \mu\text{m}$ )	El suelo contiene principalmente arcilla. Se puede formar un rollo, y doblarlo como un anillo sin presencia de grietas.	

*Nota. Adaptado de NRCS Soils Staff (1951)*

<sup>17</sup> Revisado en [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf) , el 05/07/2022



**Figura 19.** Textura

Nota. a) PC001, b) PC002, c) PM001 y d) PM002

### 3.3.2.5. Caracterización físico – mecánica de la materia prima.

De acuerdo con los ensayos realizados para la caracterización físico-mecánica de la materia prima se observan los resultados en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Caracterización físico – mecánica

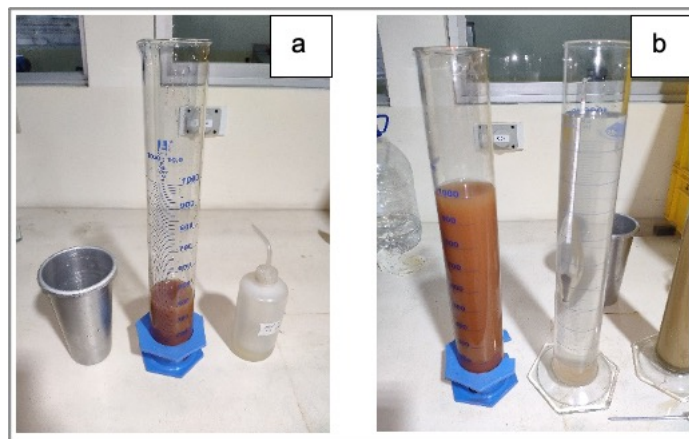
Propiedad	PC001	PC002	PM001	PM002
<b>GRANULOMETRÍA</b>				
%Pasa N°4	98,55	62,73	78,16	83,56
%Pasa N°40	34,75	22,48	26,23	25,96
%Pasa N°200	11,14	8,52	13,80	11,88
Módulo de finura	1,56	1,97	1,82	1,79
Clasificación SUCS	SP-SC	SW-SC	SC	SW-SC
HIDROMETRÍA(d50)	0.03754 mm	0.03340 mm	0.01739 mm	0.02713 mm
LÍMITES DE ATTERBERG	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico
PESO ESPECÍFICO (gr/cm <sup>3</sup> )	2,50	2,42	2,30	2,41

#### a. Granulometría. Análisis granulométrico

Se refiere a una técnica de laboratorio para analizar sedimentológicamente un suelo para determinar el tamaño de las diferentes partículas que constituyen una unidad de suelo. Las propiedades del suelo están íntimamente relacionadas con el tamaño de sus partículas, así como también por la forma y la textura de los granos. El

procedimiento<sup>18</sup> está basado en la normativa ASTM D422 2007 [34]<sup>19</sup>, la cual permite conocer la distribución de los tamaños de partículas de suelos que pasan por el tamiz de 74  $\mu\text{m}$  (N°200).


La hidrometría, permitió determinar que el tamaño de partícula media de los residuos se encuentra en un rango de  $17.39 \mu\text{m} < \phi < 37.54 \mu\text{m}$ . Los cuales son comparables con los tamaños de partícula media encontrados en los residuos de ladrillos que estudiaron [35]



**Figura 20.** Hidrometría

<sup>18</sup> El proceso inicia ajustando el punto cero y el menisco según la norma. Se pesan 50 g de suelo secado (110°C, 24 h), tamizado a 74  $\mu\text{m}$ , y se colocan en un recipiente de porcelana. Se disuelven 10 g de hexametáfosfato de sodio en 250 ml de agua destilada y se mezclan con el suelo, reposando 16 horas. La mezcla se transfiere a un vaso de dispersión y se dispersa por un minuto. Luego, se vierte en una probeta de 1000 ml y se homogeniza girándola 180° por un minuto. Con la probeta nivelada, se introduce el hidrómetro y se toman lecturas junto con la temperatura a intervalos desde 1/4 minuto hasta 1440 minutos. Finalmente, se realizan los cálculos según la norma.

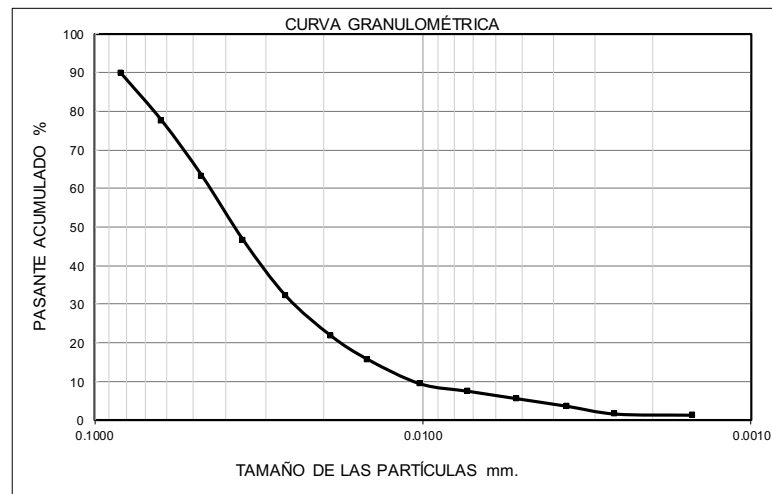
<sup>19</sup> Revisado en <https://civillabs.kashanu.ac.ir/file/download/page/1593845138-d-422-63-r02-rdqymg-.pdf>, el 06/07/2022

 <b>UTPL</b> <small>UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA</small>	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL		
	<b>GRANULOMETRÍA</b>		
<b>Tema:</b>	Estabilización de suelos usando geopolimerización con aplicación a materiales de construcción		
<b>Ubicación:</b>	Parroquia Catamayo		
<b>Muestra:</b>	PC001	Cantón: Catamayo	Provincia: Loja
<b>Norma:</b>	ASHTOT88		
<b>Realizado por:</b>	Israel Paul Briceño Tacuri		

**HIDROMETRÍA**

Peso del suelo	Gravedad Específica	Corrección por menisco	Corrección por cero	Constante
50.04 g	2.49	1	7	1.03

Tiempo	Tiempo (min)	Lectura	Temp °C	Lec. L+CM	Lec. CT	Lec. PC	% Finos Suspensión	L (cm)	K	D(mm)
0:00:00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0:00:15	0.25	50	17.60	51	50.62	43.62	89.84	7.90	0.0148	0.0829
0:00:30	0.50	44	17.60	45	44.62	37.62	77.48	8.90	0.0148	0.0622
0:01:00	1.00	37	17.60	38	37.62	30.62	63.07	10.10	0.0148	0.0469
0:02:00	2.00	29	17.60	30	29.62	22.62	46.59	11.40	0.0148	0.0352
0:04:00	4.00	22	17.50	23	22.6	15.6	32.13	12.50	0.0148	0.0261
0:08:00	8.00	17	17.50	18	17.6	10.6	21.83	13.30	0.0148	0.0190
0:14:00	14.00	14	17.50	15	14.6	7.6	15.65	13.80	0.0148	0.0147
0:30:00	30.00	11	17.40	12	11.58	4.58	9.43	14.30	0.0148	0.0102
1:00:00	60.00	10	17.60	11	10.62	3.62	7.46	14.50	0.0148	0.0073
2:00:00	120.00	9	17.90	10	9.68	2.68	5.52	14.70	0.0147	0.0051
4:00:00	240.00	8	18.20	9	8.74	1.74	3.58	14.80	0.0146	0.0036
8:00:00	480.00	7	18.30	8	7.76	0.76	1.57	15.00	0.0146	0.0026
0:00:00	1440.00	7	17.60	8	7.62	0.62	1.28	15.00	0.0148	0.0015



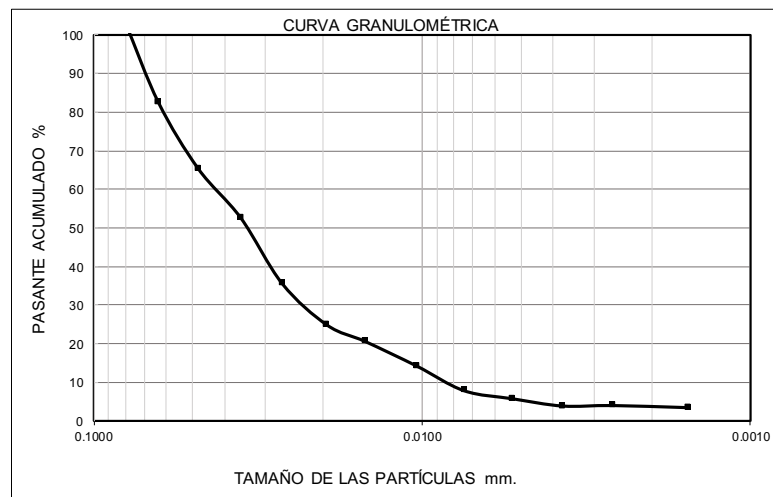
**Figura 21.** Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PC001. Catamayo

 <b>UTPL</b> <small>UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA</small>	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL		
	<b>GRANULOMETRÍA</b>		
<b>Tema:</b>	Estabilización de suelos usando geopolimerización con aplicación a materiales de construcción		
<b>Ubicación:</b>	Parroquia Catamayo		
<b>Muestra:</b>	PC002	Cantón: Catamayo	Provincia: Loja
<b>Norma:</b>	ASHTOT88		
<b>Realizado por:</b>	Israel Paul Briceño Tacuri		

**HIDROMETRÍA**

Peso del suelo	Gravedad Específica	Corrección por menisco	Corrección por cero	Constante
50.00 g	2.41	1	7	1.07

Tiempo	Tiempo (min)	Lectura	Temp °C	Lec. L+CM	Lec. CT	Lec. PC	% Finos Suspensión	L (cm)	K	D(mm)
0:00:00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0:00:15	0.25	55	18.00	56	55.70	48.70	103.83	7.10	0.0151	0.0806
0:00:30	0.50	45	18.00	46	45.70	38.70	82.51	8.80	0.0151	0.0634
0:01:00	1.00	37	18.00	38	37.70	30.70	65.45	10.10	0.0151	0.0481
0:02:00	2.00	31	18.00	32	31.70	24.70	52.66	11.10	0.0151	0.0356
0:04:00	4.00	23	18.00	24	23.70	16.70	35.60	12.40	0.0151	0.0266
0:08:00	8.00	18	17.90	19	18.68	11.68	24.90	13.20	0.0151	0.0194
0:14:00	14.00	16	17.90	17	16.68	9.68	20.64	13.50	0.0151	0.0149
0:30:00	30.00	13	17.90	14	13.68	6.68	14.24	14.00	0.0151	0.0103
1:00:00	60.00	10	18.00	11	10.70	3.70	7.89	14.50	0.0151	0.0074
2:00:00	120.00	9	18.10	10	9.72	2.72	5.80	14.70	0.0151	0.0053
4:00:00	240.00	8	18.70	9	8.84	1.84	3.92	14.80	0.0150	0.0037
8:00:00	480.00	8	19.00	9	8.90	1.90	4.05	14.80	0.0149	0.0026
0:00:00	1440.00	8	17.70	9	8.64	1.64	3.50	14.80	0.0152	0.0015



**Figura 22.** Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PC002. Catamayo

	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL		
	<b>GRANULOMETRÍA</b>		
<b>Tema:</b>	Estabilización de suelos usando geopolimerización con aplicación a materiales de construcción		
<b>Ubicación:</b>	Parroquia Malacatos		
<b>Muestra:</b>	PM001	Cantón: Loja	Provincia: Loja
<b>Norma:</b>	ASHTOT88		
<b>Realizado por:</b>	Israel Paul Briceño Tacuri		

**HIDROMETRÍA**

Peso del suelo	Gravedad Específica	Corrección por menisco	Corrección por cero	Constante
50.00 g	2.49	1	7	1.03

Tiempo	Tiempo (min)	Lectura	Temp °C	Lec. L+CM	Lec. CT	Lec. PC	% Finos Suspensión	L (cm)	K	D(mm)
0:00:00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0:00:15	0.25	55	18.00	56	55.70	48.70	100.38	7.10	0.0147	0.0782
0:00:30	0.50	53	18.00	54	53.70	46.70	96.26	7.40	0.0147	0.0565
0:01:00	1.00	48	18.00	49	48.70	41.70	85.96	8.30	0.0147	0.0423
0:02:00	2.00	42	18.00	43	42.70	35.70	73.59	9.20	0.0147	0.0315
0:04:00	4.00	36	18.00	37	36.70	29.70	61.22	10.20	0.0147	0.0234
0:08:00	8.00	30	18.00	31	30.70	23.70	48.85	11.20	0.0147	0.0174
0:14:00	14.00	27	18.00	28	27.70	20.70	42.67	11.70	0.0147	0.0134
0:30:00	30.00	20	18.20	21	20.72	13.72	28.28	12.90	0.0146	0.0096
1:00:00	60.00	15	18.20	16	15.72	8.72	17.97	13.70	0.0146	0.0070
2:00:00	120.00	11	18.70	12	11.77	4.77	9.83	14.30	0.0145	0.0050
4:00:00	240.00	10	18.90	11	10.79	3.79	7.81	14.50	0.0145	0.0036
8:00:00	480.00	9	18.80	10	9.78	2.78	5.73	14.70	0.0145	0.0025
0:00:00	1440.00	8	17.50	9	8.60	1.60	3.30	14.80	0.0148	0.0015

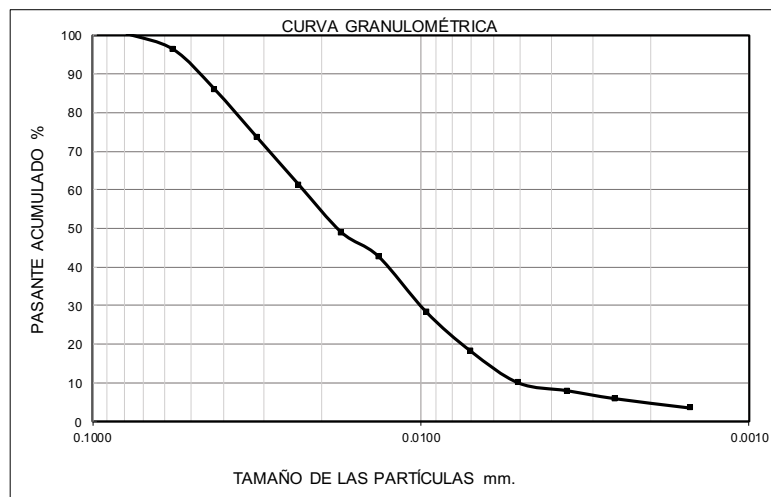



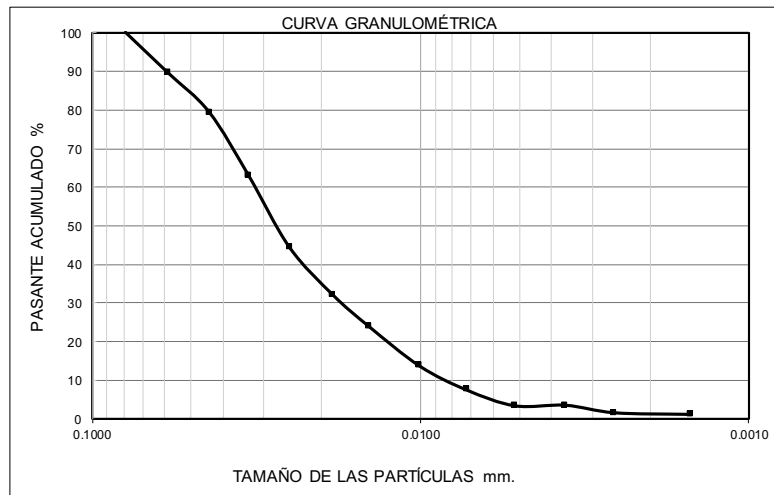
Figura 23. Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PM001. Malacatos

 <b>UTPL</b> <small>UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA</small>	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL		
	<b>GRANULOMETRÍA</b>		
<b>Tema:</b>	Estabilización de suelos usando geopolimerización con aplicación a materiales de construcción		
<b>Ubicación:</b>	Parroquia Malacatos		
<b>Muestra:</b>	PM002	Cantón: Loja	Provincia: Loja
<b>Norma:</b>	ASHTOT88		
<b>Realizado por:</b>	Israel Paul Briceño Tacuri		

**HIDROMETRÍA**

Peso del suelo	Gravedad Específica	Corrección por menisco	Corrección por cero	Constante
50.04 g	2.49	1	7	1.03

Tiempo	Tiempo (min)	Lectura	Temp °C	Lec. L+CM	Lec. CT	Lec. PC	% Finos Suspensión	L (cm)	K	D(mm)
0:00:00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0:00:15	0.25	55	17.30	56	55.56	48.56	100.02	7.10	0.0148	0.0789
0:00:30	0.50	50	17.30	51	50.56	43.56	89.72	7.90	0.0148	0.0589
0:01:00	1.00	45	17.30	46	45.56	38.56	79.42	8.80	0.0148	0.0439
0:02:00	2.00	37	17.30	38	37.56	30.56	62.94	10.10	0.0148	0.0333
0:04:00	4.00	28	17.50	29	28.60	21.60	44.49	11.50	0.0148	0.0250
0:08:00	8.00	22	17.50	23	22.60	15.60	32.13	12.50	0.0148	0.0185
0:14:00	14.00	18	17.60	19	18.62	11.62	23.93	13.20	0.0148	0.0143
0:30:00	30.00	13	17.80	14	13.66	6.66	13.72	14.00	0.0147	0.0101
1:00:00	60.00	10	17.80	11	10.66	3.66	7.54	14.50	0.0147	0.0072
2:00:00	120.00	8	17.90	9	8.68	1.68	3.46	14.80	0.0147	0.0052
4:00:00	240.00	8	18.50	9	8.75	1.75	3.60	14.80	0.0146	0.0036
8:00:00	480.00	7	19.00	8	7.80	0.80	1.65	15.00	0.0145	0.0026
0:00:00	1440.00	7	17.50	8	7.60	0.60	1.24	15.00	0.0148	0.0015



**Figura 24.** Análisis granulométrico e hidrometría de suelos muestra PM002. Malacatos

El análisis de granulometría por hidrometría de las muestras de las Parroquias Catamayo y Malacatos revela que ambos suelos contienen una alta proporción inicial de partículas finas, con una disminución significativa en el porcentaje de finos en suspensión a lo largo del tiempo. Las curvas granulométricas y los diámetros de partículas indican patrones de sedimentación similares, sugiriendo que ambos suelos son adecuados para técnicas de estabilización mediante geopolimerización.

#### ***b. Límites de Atterberg***

Para determinar el límite plástico, límite líquido y el índice de plasticidad de un suelo, el procedimiento se basó en la ASTM D4318-17e1 [36]<sup>20</sup>.

El **límite plástico** (LP) es la frontera convencional entre los estados semisólido y plástico que permite la formación de cilindros de suelo de 3,2 mm (1/8") de diámetro. Para elaborar los cilindros, se rueda el suelo con la palma de la mano en una superficie lisa (vidrio esmerilado), evitando en lo posible que se desmoronen.

El **límite líquido** (LL) es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo, en cual el suelo pasa de su estado plástico al líquido. La muestra de suelo húmedo se coloca en una cuchara de bronce. Se divide la muestra en dos mediante un divisor normalizado y se golpea la cuchara contra una base mediante una manivela como se muestra en la 0Las porciones de suelo húmedo tienden a unirse por cada golpe y si el surco comprendido entre las dos porciones es 1/2". después de 25 golpes, la humedad del suelo corresponde al límite líquido. El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y límite plástico.

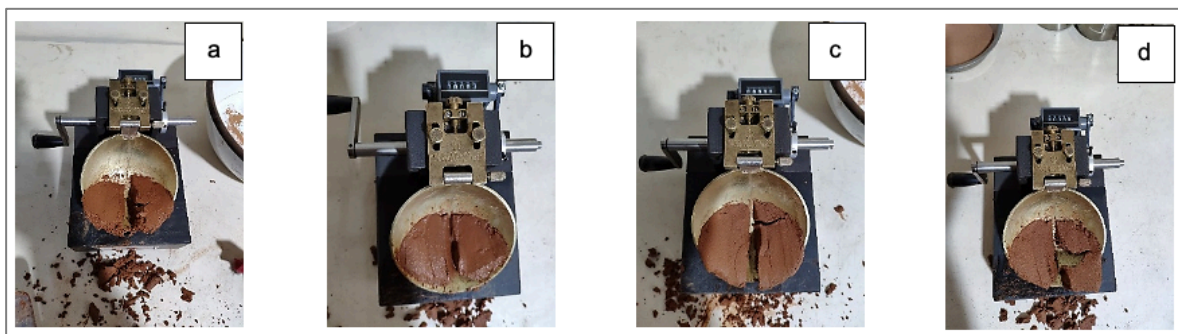
El suelo no plástico es aquel que por su gran cantidad de arenas e ínfimas cantidades de limo y arcilla no posee cohesión. Y cuando es sometido a este

---

<sup>20</sup> Revisado en <https://www.astm.org/d4318-17e01.html>, el 07/07/2022

ensayo no va a permitir formar los rollos para el límite plástico, y va a fraccionarse con tan solo pasar el acanalador o se va a unir con tres golpes como máximo en el límite plástico.

Los límites de Atterberg determinaron que los residuos no presentan plasticidad, con lo que se puede indagar que están compuestos por gran cantidad de arenas e ínfimas cantidades de limo y arcilla. Corroborando los resultados obtenidos en la caracterización por control de atributos.



**Figura 25.** Límite líquido: a) PC001, b) PC002, c) PM001 y d) PM002.

### **c. Peso específico**

El procedimiento desarrollado se basó en la norma ASTM D854-14 [37]<sup>21</sup>, la cual permite obtener el peso específico del suelo. La relación entre el peso específico de un volumen determinado de sólidos a una temperatura, y el peso en el aire de dicho volumen de agua destilada, a igual temperatura, es lo que conocemos como peso específico del suelo o gravedad específica del suelo.

El proceso consistió en pesar 500 g de suelo seco a 110°C por 24 horas pasante del tamiz de 2 mm (N°10) y colocarlos en un recipiente. Luego se satura el suelo, llenando el recipiente con agua y se deja reposar durante 24 horas.

<sup>21</sup> Revisado en <https://www.astm.org/d0854-14.html>, el 07/07/2022

Se decanta el exceso de agua, evitando la pérdida de finos. Y se esparce la muestra en una superficie plana, expuesta a una ligera corriente de aire y removiendo frecuentemente para asegurar un secado homogéneo.

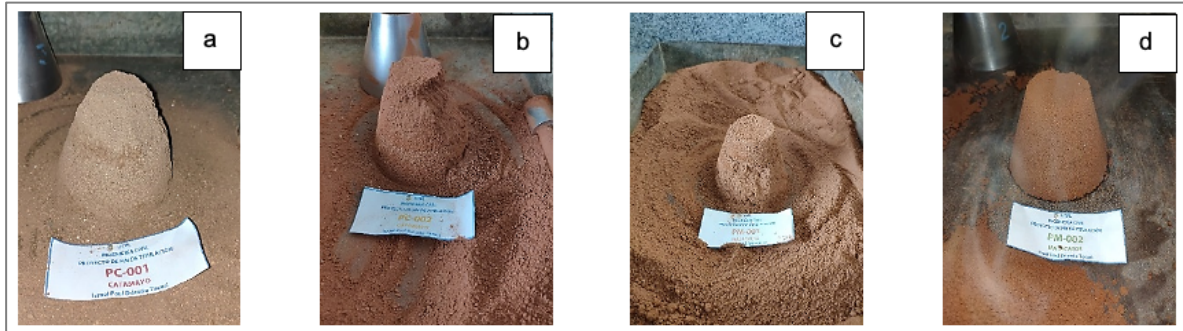
Se realizan los ensayos de humedad superficial, en una superficie lisa y no absorbente en el que se coloca una porción de suelo parcialmente seco dentro de un molde de acero en forma de cono, y se lo apisona con veinticinco golpes seccionados hasta que se desborde.

Se procede a remover el cono; y, si el suelo no conserva la forma del molde y presenta ligeros desplomes habrá alcanzado la condición superficialmente seca como se muestra en la 0. En caso de que conserve la forma del molde intacta se debe continuar secando el suelo, hasta alcanzar la condición superficialmente seca.

Se pesa el picnómetro y se procede a determinar la masa total del picnómetro y el agua. Luego se llena parcialmente el picnómetro con agua, e introduce 500 g del suelo superficialmente seco y se continúa llenando el picnómetro con agua hasta un 90% de capacidad.

Se agita el picnómetro durante 20 minutos para eliminar las burbujas de aire. Se ajusta la temperatura del picnómetro y su contenido a  $23.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ ; por inmersión parcial en agua. Se pesa el picnómetro y se procede a determinar la masa total del picnómetro, el suelo y el agua.

Se extrae el suelo del picnómetro, se lo coloca en un recipiente y se seca durante 16 horas a  $110^{\circ}\text{C}$ . Luego se determina la masa del suelo seco. Para finalizar se realiza los cálculos según lo especificado en la norma.



**Figura 26.** Peso específico

Nota. a) PC001, b) PC002, c) PM001 y d) PM002.

#### **d. Densidad aparente**

La densidad aparente de los residuos se encuentra en un rango de 2.30-2.50 gr/cm<sup>3</sup>, lo que lo clasifica dentro del grupo de suelos minerales [38]

#### **3.3.2.6. Caracterización química – mineralógica de la materia prima.**

De acuerdo con los ensayos realizados para la caracterización química-mineralógica de la materia prima se evidencian los resultados en la Tabla 13.

En el ensayo de estimación de materia orgánica, los residuos no presentaron materia orgánica debido a que no se identificó ninguna reacción al ácido clorhídrico.

En el ensayo de estimación de carbonatos los residuos no presentaron carbonatos debido a que no se identificó ninguna reacción al peróxido de sodio.

**Tabla 13.** Caracterización química – mineralógica

Propiedad	PC001	PC002	PM001	PM002
<b>ESTIMACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA</b>	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
<b>ESTIMACIÓN DE CARBONATOS</b>	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta

#### **a. Estimación de carbonatos**

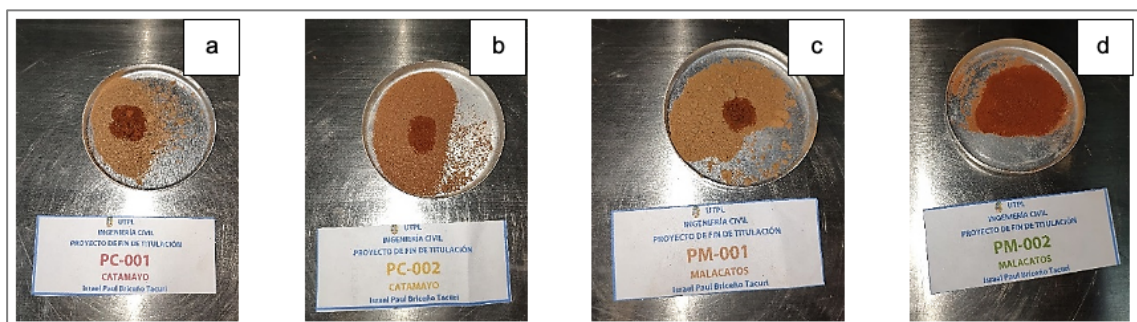
El procedimiento desarrollado se fundamentó en la referencia de NRCS Soils Staff [31]<sup>22</sup> la cual permite identificar la presencia de carbonatos en el suelo, usando ácido clorhídrico al 10%. Para este proceso se ubica una muestra representativa del suelo seco en un recipiente. Luego se añade ácido clorhídrico al 10% con un gotero. Se evalúa la reacción de efervescencia del suelo con la referencia planteada en la Tabla 14. , como se observa en la 0

Además, es importante señalar que, para determinar los límites exactos de la efervescencia del suelo se puede ejecutar un estudio detallado en el laboratorio para estimaciones de carbonatos.

**Tabla 14. Estimación de carbonatos**

Tipo de efervescencia	Descripción
No presenta	No se identifica ninguna reacción.
Ligera	Se identifica una reacción ligera.
Fuerte	Se identifica una reacción fuerte.
Violenta	Se identifica una reacción violenta, es necesario usar equipos anticendidos.

*Nota. Adaptado de NRCS Soils Staff (1951)*



**Figura 27. Estimación de carbonatos**

*Nota. a) PC001, b) PC002, c) PM001 y d) PM002*

### **b. Presencia de materia orgánica**

22

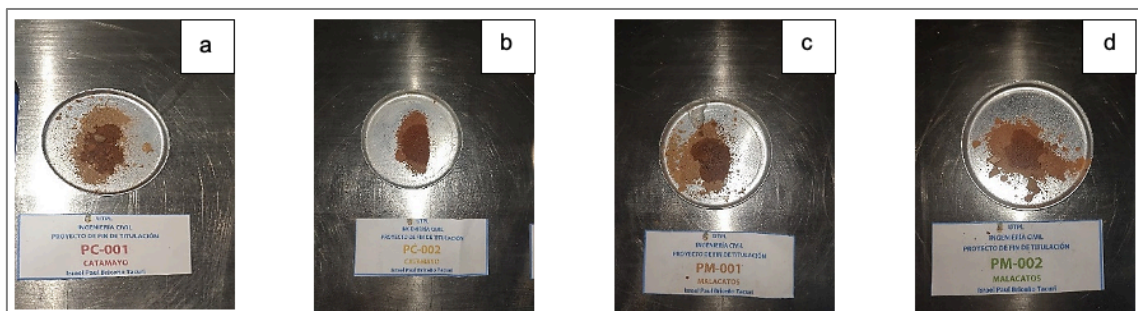
[https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf) , el 05/07/2022

El procedimiento desarrollado se fundamentó en NRCS Soils Staff [31]<sup>23</sup>, para identificar la presencia de materia orgánica en el suelo, esta presencia puede modificar las características del suelo en varias maneras, como es el caso de las plantas y animales en descomposición que aceleran el desgaste de los minerales en el suelo. El color de los suelos también se verá afectados, haciéndolos más claros en algunos casos y en otros intensifican el cromatismo. Para este proceso se usa peróxido de sodio al 30%, ubicando una muestra representativa del suelo seco en un recipiente. Luego se añade el peróxido de sodio al 30% con un gotero y se evalúa la reacción de efervescencia del suelo con la Tabla 15. , como se presenta en la Figura 28.

**Tabla 15.** Estimación de materia orgánica

Tipo de efervescencia	Descripción
No presenta	No se identifica ninguna reacción.
Ligera	Se identifica una reacción ligera.
Fuerte	Se identifica una reacción fuerte.
Violenta	Se identifica una reacción violenta, es necesario usar equipos antincendios.

*Nota. Adaptado de NRCS Soils Staff (1951)*



**Figura 28.** Estimación de materia orgánica

*Nota. a) PC001, b) PC002, c) PM001 y d) PM002*

### c. Fluorescencia de rayos X (FRX)

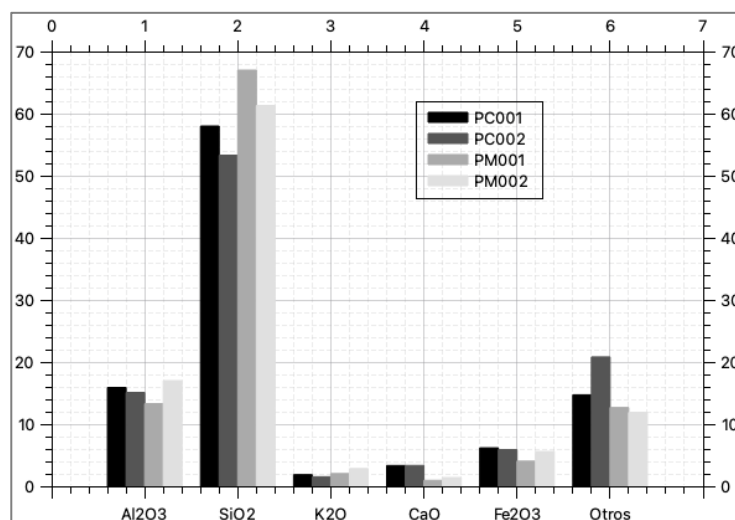
El FRX<sup>24</sup> es una técnica de espectrometría en emisión de rayos X, que permite identificar los elementos químicos presentes en un suelo, a su vez permite estabilizar la presencia de un elemento determinado mediante el método de medición y análisis de datos<sup>25</sup>. El principio de esta técnica se basa en la detección de la fluorescencia X emitida durante el ensayo realizado a la muestra<sup>26</sup>.

La fluorescencia de rayos X permite determinar la composición química de los RL.

En la Figura 29. ; y, Tabla 16. , se exhiben los resultados obtenidos.

**Tabla 16. Fluorescencia de rayos X**

Muestra	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	K <sub>2</sub> O %	CaO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Otros %	Total %	Σ Óxidos >70%
PC001	15.90	58.00	1.86	3.34	6.18	14.72	100.0	80.08
PC002	15.10	53.30	1.53	3.35	5.90	20.82	100.0	74.30
PM001	13.30	67.00	2.04	0.95	4.04	12.67	100.0	84.34
PM002	17.00	61.30	2.84	1.39	5.59	11.88	100.0	83.89



**Figura 29. Fluorescencia de rayos X**

<sup>24</sup> El proceso comienza triturando la muestra con una trituradora eléctrica de mandíbulas y luego se homogeniza esparciéndola en una superficie plástica y levantando sus esquinas unas 15 veces. Después, se divide la muestra en secciones, seleccionando una porción de cada una para un nuevo recipiente. Esta nueva muestra se pulveriza usando un molino de anillos RETSCH RS 200 a 700 rpm durante 3 minutos. Finalmente, se analizan 10 gramos de la muestra pulverizada con un equipo de fluorescencia de rayos X BRUKER S1 TRACER para obtener los resultados.

<sup>25</sup>

Revisado

en

[http://www.sbai.uniroma1.it/~giovanni.gigante/Materiale\\_didattico/La%20Fluorescenza%20dei%20raggi%20x.pdf](http://www.sbai.uniroma1.it/~giovanni.gigante/Materiale_didattico/La%20Fluorescenza%20dei%20raggi%20x.pdf), 16/07/2022

<sup>26</sup> Revisado en <https://hal-univ-tlse2.archives-ouvertes.fr/hal-02017682/document>, 16/07/2022

En los resultados obtenidos, la suma de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , en los RL es mayor a 70% por lo cual se los puede clasificar como un material puzolánico e idóneo para ser una fuente de aluminosilicatos para procesos de geopolimerización [25]. Además, se encuentran compuestos por óxidos de potasio y calcio que son beneficiosos para el proceso de geosíntesis.

Según el documento de Rodríguez et al.<sup>27</sup>, el incremento en la cantidad de silicatos solubles y concentración del ion alcalino, a través del aumento en las relaciones  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$  respectivamente, afecta negativamente el comportamiento mecánico de los materiales geopoliméricos. Para el caso de los residuos PC001, PC002 y PM002 se encuentran dentro de los rangos óptimos: 3-3.8, que permitirían resistencias mecánicas muy altas en los productos geopoliméricos [39]. Y en el caso del residuo PM001 presenta una relación  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  de 5.15, que no permitirían el desarrollo completo de la resistencia en los geopolímeros.



**Figura 30. FRX**

#### **d. Difracción de rayos X**

<sup>27</sup> Rodríguez, Erich, & Bernal, Susan, & Mejía de Gutiérrez, Ruby, & Gordillo, Marisol (2009). Efecto de los módulos  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un meta caolín. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (49),30-41.[fecha de Consulta 12 de Julio de 2022]. ISSN: 0120-6230. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43019324003>

El análisis químico de difracción de rayos X (DRX) es un proceso de dispersión de RX de los átomos que constituyen al suelo irradiado. Los rayos inciden una longitud de onda fija, y cada plano de átomos produce un pico de difracción en un ángulo específico. Cada pico es producido por una familia de planos atómicos, de una especie mineral identificada, permitiendo identificar y cuantificar las diferentes especies minerales de los suelos [40]

Para este caso, se tritura la muestra usando una trituradora eléctrica de mandíbula<sup>28</sup>, homogenizada la muestra (levantando las esquinas de la superficie plástica alrededor de 15 veces). Se la cuartea en varias secciones. Se toma una parte de cada sección y se coloca en un nuevo recipiente. Se vuelve a pulverizar la nueva muestra con la ayuda de una pulverizadora con molino de anillos<sup>29</sup>. Se recomienda usar un programa que conste con una velocidad de 700 revoluciones por minuto, en un periodo de tiempo de 3 minutos.

Se colocan 10 gramos de la muestra pulverizada en discos, y se analiza en el difractómetro<sup>30</sup>, por un periodo de 40 minutos. Se carga el espectro cristalino obtenido, para la búsqueda de los respectivos minerales.

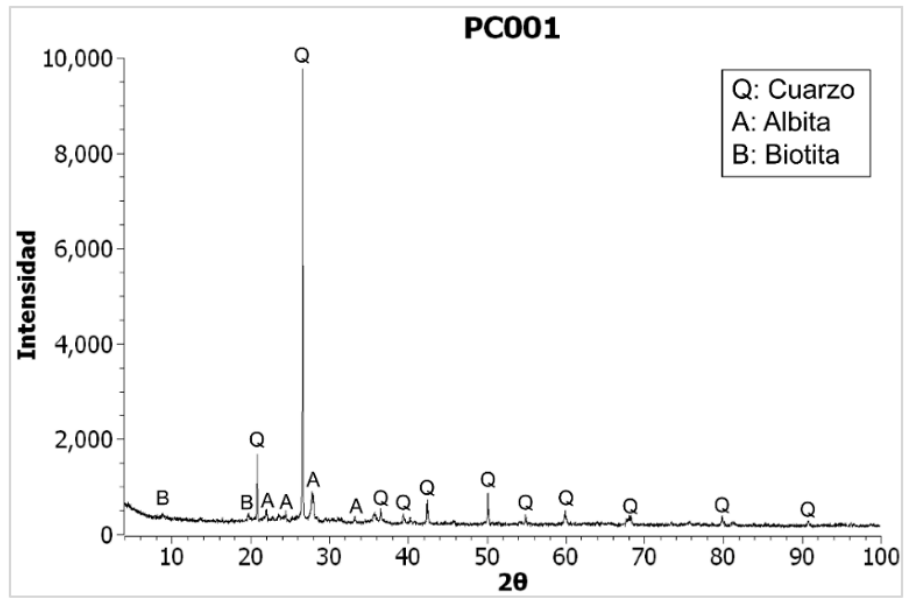
En las Figuras 31, 32, 33 y 34; se presenta el resultado del DRX de las muestras PC001, PC002, PM001 y PM002 respectivamente.

---

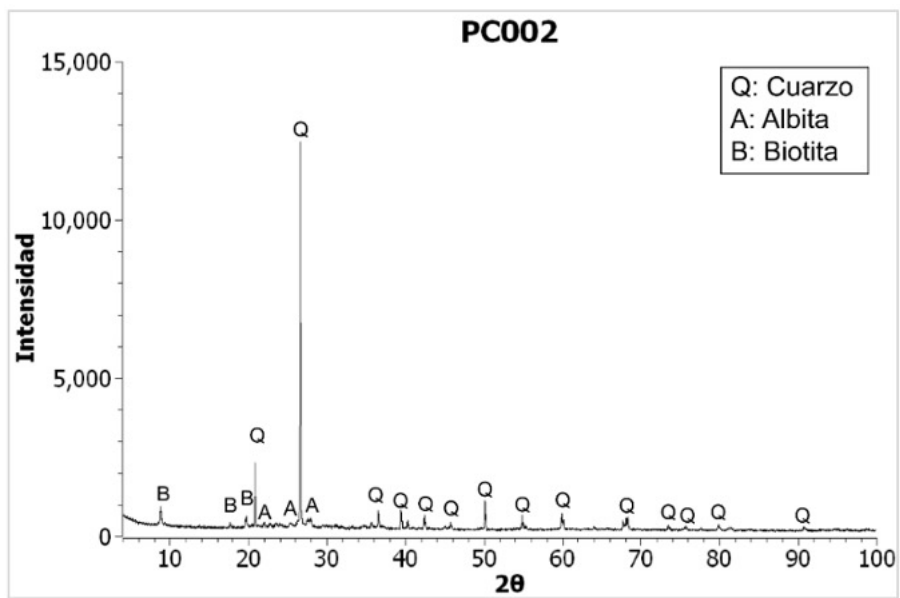
<sup>28</sup> Retsch BB100

<sup>29</sup> Retsch RS 200

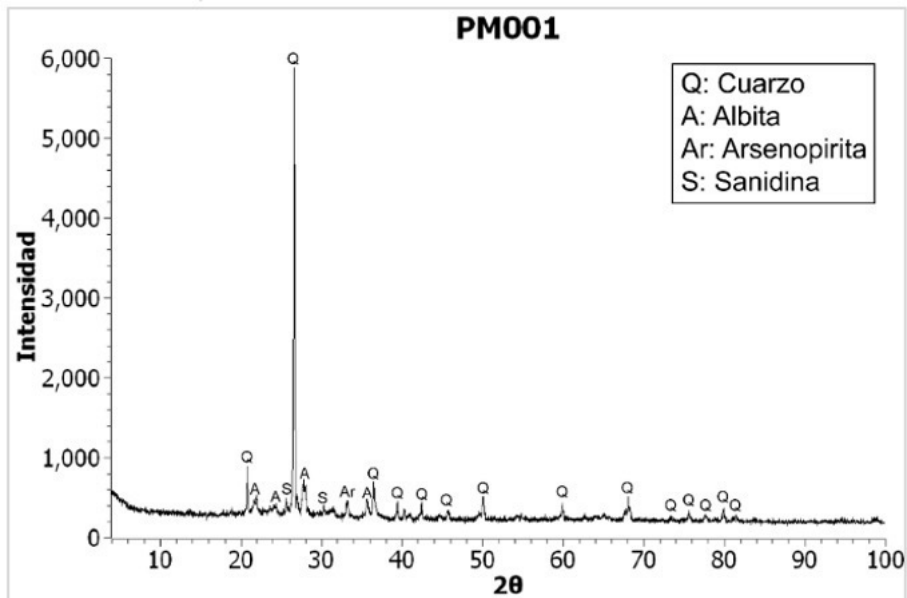
<sup>30</sup> D8-ADVANCE



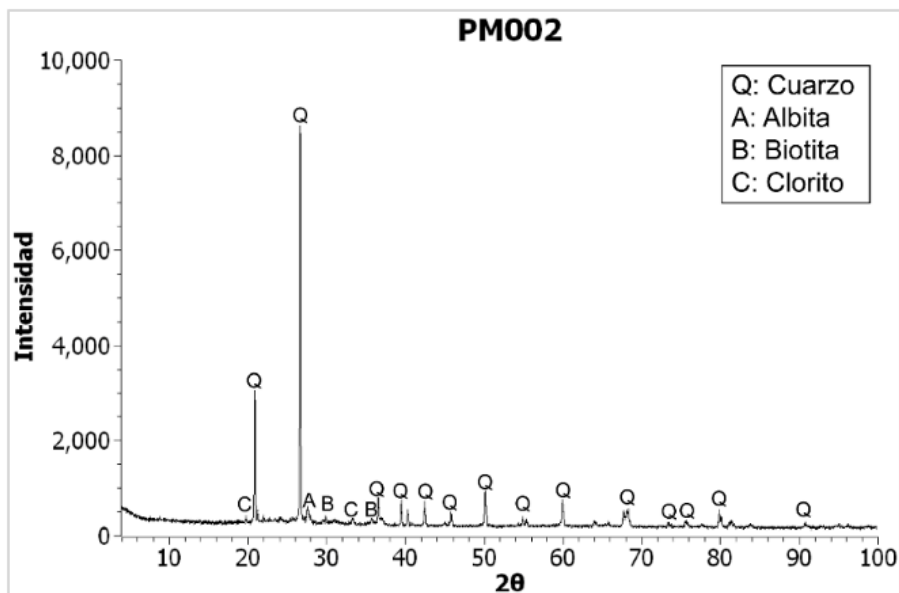
**Figura 31.** Difracción de rayos X: PC001



**Figura 32.** Difracción de rayos X: PC002



**Figura 33.** Difracción de rayos X: PM001



**Figura 34.** Difracción de rayos X: PM002

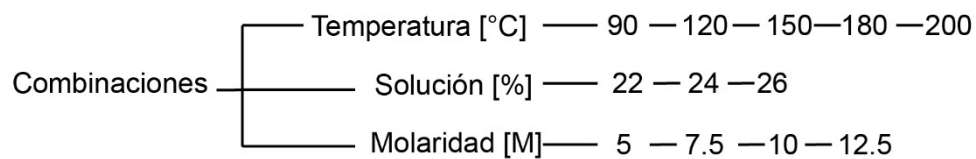
De acuerdo con los resultados del ensayo mineralógico, el cuarzo, albita, biotita, arsenopirita y clorita, son los minerales que se encontraron en los RL, destacándose el cuarzo, que presentó los picos más altos desde 20° hasta los 30°, y fue el mineral con más presencia en los DRX. Por lo tanto, los RL están

compuestos por materiales cristalinos que contienen una gran cantidad de óxido de silicio.

### 3.3.3. Diseño experimental de la combinación óptima

#### 3.3.3.1. Selección de variables del proceso

La molaridad de la solución alcalina, el contenido de la solución alcalina, la presión de estabilización y la temperatura de curado son las variables que influyen en el proceso de estabilización del suelo aplicando geopolimerización. [41]<sup>31</sup>.



**Figura 35.** Variables del proceso

Con las variables identificadas se realizaron 60 combinaciones, elaborando 4 probetas por combinación, con las siguientes dimensiones: 7 cm de diámetro y 2 cm de espesor. Todas fueron sometidas a 39.23 N. Luego de lo cual, a las probetas se les realizó el ensayo de compresión diametral (Brazilian Test) [1], para la obtención del factor de optimización (FO). Componente esencial para la correcta selección de la combinación óptima. Las combinaciones están representadas en la Figura 35.

El FO permitirá la determinación de la mezcla óptima, y se procede luego a establecer con esta mezcla óptima el comportamiento particular de la mezcla, para su aplicación y caracterización ya en el prototipo.

<sup>31</sup> Revisado en <https://patentimages.storage.googleapis.com/0f/04/15/6d0adff52824ce/US20150016895A1.pdf>, el 09/07/2022

### 3.3.3.2. Molaridad de la solución alcalina

Es el contenido de moles de hidróxido de sodio en la solución, que para el caso de esta investigación las analizadas son: 5M, 7.5M, 10M y 12.5M.

Para la elaboración de la solución se deberá considerar el contenido de moles (M) disuelto en 1000 (ml) de agua destilada, considerando el peso molecular del NaOH<sup>32</sup>.

Para esta investigación se utilizó vasos de precipitado de 250 (ml) y 100 (ml). En la Tabla 17. se presenta las dosificaciones usadas para cada vaso de precipitación.

**Tabla 17.** Dosificación de molaridad

Capacidad de Vaso de Precipitado	Molaridad	Cantidad de NaOH en 1000(ml)	Cantidad de NaOH en 100(ml)
A(ml)	B(M)	C (g)	D (g)
250	12.5	500	125
	10	400	100
	7.5	300	75
	5	200	50
100	12.5	500	50
	10	400	40
	7.5	300	30
	5	200	20

### 3.3.3.3. Contenido de solución y presión de moldeado

Se considera el porcentaje que representa la solución de un 100% de combinación suelo y solución. Los contenidos estudiados son: 22%, 24% y, 26%.

**Tabla 18.** Contenido de solución en la combinación suelo-solución

Contenido de solución (%)	Contenido de suelo (%)	Contenido suelo-solución (%)
22	78	100
24	76	100
26	74	100

<sup>32</sup> Para conocer la cantidad de NaOH que se necesita disolver para la solución alcalina, deberemos calcularlo multiplicando los 12.5 M x 40 g/mol (peso molecular), considerando disolverlo en 1000 ml de agua destilada.

En 4 probetas cilíndricas de 7 cm de diámetro y 2 cm de espesor, se les aplicó distintas cargas de estabilización con la prensa hidráulica con una misma combinación suelo-solución-temperatura. Identificando, que la presión que permite un correcto desmolde sin fracturas fue aquella a 17792.89 N (4000 lb), por lo que para la ejecución de todo el estudio se usó esta presión. Ya que a 4448.22 N (1000 lb), 8896.44 N (2000 lb) y 13344.66 N (3000 lb), el disco no soportaba ni su propio peso, y se desmoronaba fácilmente como se evidencia en la Figura 36. , llegando a necesitar aproximadamente 500g de suelo – solución, de esta cantidad al menos 411 g deben ser solo de suelo, y en función de esta constante se realizó los cálculos usando la Tabla 18. <sup>33</sup>.



**Figura 36.** Discos con presiones inferiores a 17792.89N

<sup>33</sup> Para preparar una combinación suelo-solución elaborando 4 probetas de 7 cm de diámetro y 2 cm de espesor, la cual va a ser sometido a 39.2266N de presión de moldeado. El contenido de solución es del 22%. Se conoce que la cantidad de suelo debe ser de 411 gramos para la fabricación de los 4 especímenes. ¿Cómo calcular la cantidad de solución necesaria?

$$\frac{78\%(C.Suelo)}{22\%(C.Solución)} = \frac{411(g \text{ de suelo})}{X(g \text{ de solución})}$$

$$X = \frac{411 \times 22\%}{78\%}$$

$$X = 115,92(g \text{ de solución})$$

### **3.3.3.4. Temperatura de curado**

La temperatura de curado; es un factor primordial para completar la geopolimerización. Las temperaturas de 90°C, 120°C, 150°C, 180°C y 200°C fueron aplicadas durante 8 horas en la estufa de secado<sup>34</sup>. Y luego pasaron por un periodo de 7 días a temperatura ambiente, evitando el choque térmico, antes de ser ensayadas a compresión diametral.

La elección de las temperaturas, se basan en una investigación de activación alcalina realizada previamente en la ciudad de Loja. En este estudio se usó como materia prima el relave de mina proveniente de minas ubicadas en la provincia de Zamora. Las temperaturas que fueron empleadas son: 90°C, 120°C, 150°C y 180°C[42]<sup>35</sup>.

### **3.3.4. Elaboración de discos de ensayo**

#### **3.3.4.1. Preparación de activador alcalino**

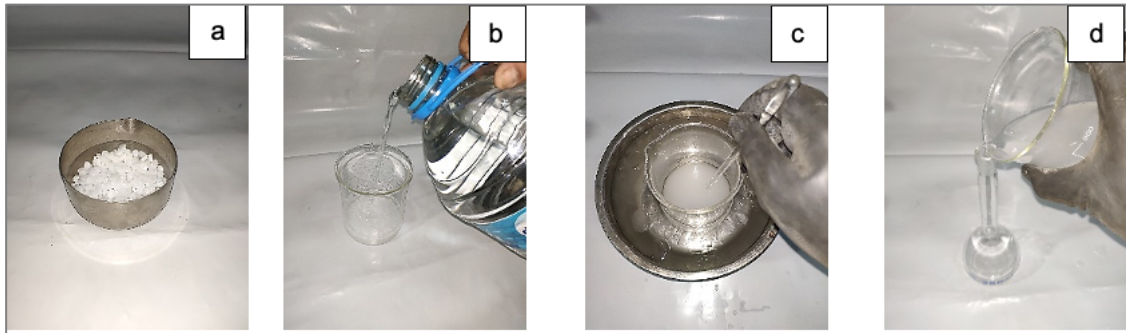
Para este proceso se ocupa: vaso de precipitado, agitador de vidrio, recipiente que contenga al vaso de precipitado, balón volumétrico, balanza, y considerando las medidas de protección necesarias dado que el (HS) puede ser corrosivo.

El proceso de basó en estimar la cantidad de solución en gramos que se necesita para la combinación, basándose en los datos de la Tabla 17. ; ya que, con el peso exacto más la cantidad de agua destilada, y considerando el desprendimiento de calor, producto de la reacción química ayudados de hielo para bajar la temperatura, se mezcla de forma óptima y se deja reposar la solución por unas 6 horas en un lugar donde oscuro.

---

<sup>34</sup> SLN180

<sup>35</sup> Revisado en, <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/15897>, el 09/07/2022



**Figura 37.** Elaboración de activador alcalino

### 3.3.4.2. Elaboración de mezcla de suelo y activador alcalino

Ocupando recipientes, fundas con sello hermético, pipeta, vaso de precipitado, cucharón de laboratorio y balanza, se pesa la cantidad requerida de suelo y se coloca en un recipiente. Tomando en cuenta la cantidad necesaria de solución en un vaso de precipitado como se observa en la 0 se añade la solución al recipiente y luego se coloca el suelo, estimando una combinación homogénea, dejando reposar la mezcla durante unas 16 horas en fundas herméticas.

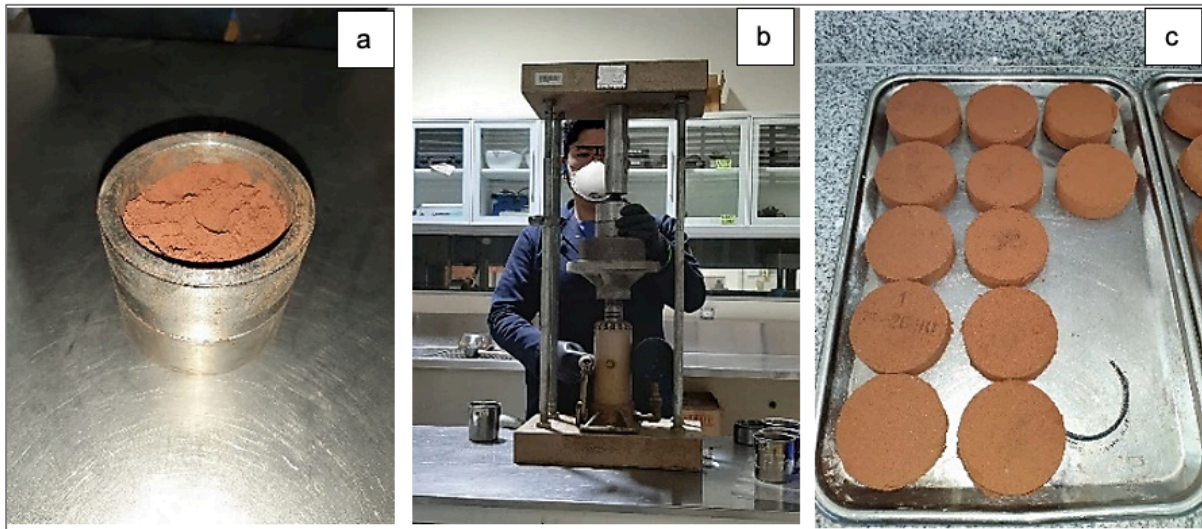


**Figura 38.** Combinación suelo-solución

### 3.3.4.3. Moldeo de discos

Se pesan 125 gramos de la combinación suelo-solución en un recipiente, se colocan en un molde de acero, y con la ayuda de la prensa hidráulica se ejecutan

39.23 N de presión, para luego dejar reposar los discos a temperatura ambiente durante 24 horas.



*Figura 39. Elaboración de discos*

#### 3.3.4.4. Curado de discos

Una vez fabricados los discos, se programa en la estufa de secado, 8 horas de curado a la temperatura requerida. Se extraen los discos y se deja reposar durante 7 días a temperatura ambiente en bandejas de metal, antes de proceder a ensayarlos.



*Figura 40. Curado de discos*

### 3.3.5. Compresión diametral y factor de optimización en discos de ensayo

Esta prueba estará basada en la técnica definida como “brazilian disc test” (ensayo brasileño de compresión diametral), introducido de acuerdo con la literatura como un sustituto de la prueba de tracción directa en materiales frágiles [43]

Esta técnica consiste en someter a un disco isotrópico a un ensayo de compresión con dos placas rígidas en la superficie de contacto. En la Figura 41. se enfoca las variables que se deben considerar para el cálculo del esfuerzo de tensión; resistencia de tracción indirecta ( $\sigma_{ti}$ ). Cabe recalcar que este cálculo se fundamenta en la teoría de Hertz con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{ti} = \frac{P}{\pi R t} = \frac{2P}{\pi D t}$$

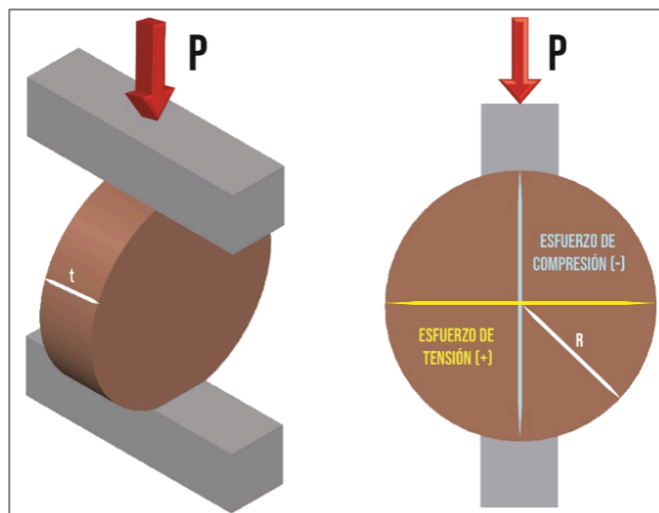
Donde:

R: es el radio de la probeta cilíndrica

D: es el diámetro de la probeta cilíndrica

t: es el espesor de la probeta cilíndrica

P: es la carga aplicada a la probeta cilíndrica



**Figura 41.** Ensayo brasileño de compresión diametral

La carga fue aplicada a una velocidad de 1,5 mm/min<sup>36</sup> hasta generar la fractura (grieta) del disco. En la Figura 42. , se presentan algunas fases del ensayo de compresión diametral. Después de la obtención del esfuerzo de tensión máximo se procede a calcular el factor de optimización, en base a [44], con la siguiente fórmula:

$$FO = \frac{\sigma_{cd_{m\acute{a}x}}}{W}$$

Donde:

**FO**: es el factor de optimización.

$\sigma_{cd_{m\acute{a}x}}$ : es el esfuerzo de tensión máximo de la probeta cilíndrica.

**W**: es el peso de la probeta cilíndrica.

El factor de optimización; FO, permite indagar la eficiencia general de la estructural de la probeta cilíndrica. Y así determinar las mejores combinaciones desde el punto de vista estructural.

En la Tabla 19. se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión diametral y el factor de optimización obtenido de las diferentes combinaciones estudiadas.

**Tabla 19.** Resultados del ensayo de compresión diametral

---

<sup>36</sup> Para la ejecución de este procedimiento se usó el equipo denominado SHIMADZU CONCRETO 2000X

Molaridad (M)	Combinación		$\sigma_{cd}$ (MPa)	FO (MPa/kg)
	C. Solución (%)	Temperatura (°C)		
5	22	90	0.2069	2.2862
		120	0.3644	3.5037
		150	0.2529	2.4180
		180	0.3399	3.2291
		200	0.2006	1.9556
5	24	90	0.2460	2.8137
		120	0.4142	4.0385
		150	0.5055	4.9638
		180	0.3964	3.9511
		200	0.2512	2.4960
5	26	90	0.2764	3.2796
		120	0.6103	6.0972
		150	0.6192	6.1889
		180	0.7192	7.1545
		200	0.4711	4.7745
7.5	22	90	0.3536	3.2785
		120	0.2173	2.0731
		150	0.3889	3.6794
		180	0.3009	2.8761
		200	0.2876	2.8072
7.5	24	90	0.4197	3.9463
		120	0.4004	3.8944
		150	0.4998	4.8051
		180	0.4466	4.3493
		200	0.3074	3.0530
7.5	26	90	0.6491	6.2002
		120	0.7396	7.3213
		150	0.5729	5.5014
		180	0.7384	7.3386
		200	0.5635	5.5952
10	22	90	0.7314	6.7764
		120	0.4636	4.3543
		150	0.6290	5.8050
		180	0.4922	4.6480
		200	0.3986	3.7566
10	24	90	0.7547	6.9369
		120	0.5773	5.5320
		150	0.7316	6.8044
		180	0.6755	6.5402
		200	0.7077	6.7789
10	26	90	0.7743	7.3540
		120	0.7271	7.1333
		150	0.5650	7.6284
		180	0.7387	7.2100
		200	0.9534	9.2651
12.5	22	90	0.5111	5.0020
		120	0.7131	6.5716
		150	0.9266	8.4813
		180	0.7421	6.9634
		200	0.5405	5.0780
12.5	24	90	0.6673	6.0008
		120	0.7830	7.3440
		150	1.4596	13.4896
		180	1.1951	11.3417
		200	0.7086	6.7391
12.5	26	90	0.6597	6.0803
		120	0.8574	8.3005
		150	1.5911	14.8431
		180	1.1374	12.3618
		200	0.7637	7.4350



*Figura 42. Compresión diametral*

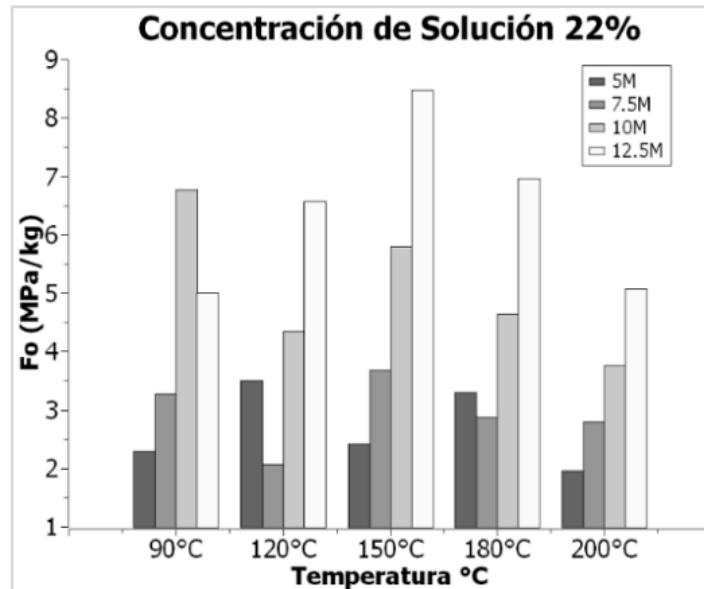
### **3.3.6. Efecto de la temperatura de curado y concentración de solución**

Considerando el efecto de la temperatura de curado en el factor de optimización (FO), frente al contenido de solución en las distintas concentraciones molares

*a. Con una concentración de solución del 22%, como se indica en la Figura 43. , se puede observar lo siguiente:*

- Para una molaridad de 5, se puede apreciar una mayor magnitud del FO: 3.5 MPa/kg y 3.29 MPa/kg en las temperaturas de curado de 120°C y 180°C respectivamente, en comparación a las demás temperaturas.
- Para una molaridad de 7.5, se puede apreciar una mayor magnitud del FO: 3.28 MPa/kg y 3.68 MPa/kg en las temperaturas de curado de 90°C y 150°C respectivamente, en comparación a las demás temperaturas.
- Para una molaridad de 10, se puede apreciar una mayor magnitud del FO: 6.77 MPa/kg y 5.81 MPa/kg en la temperatura de curado de 90°C y 150°C respectivamente, en comparación a las demás temperaturas.

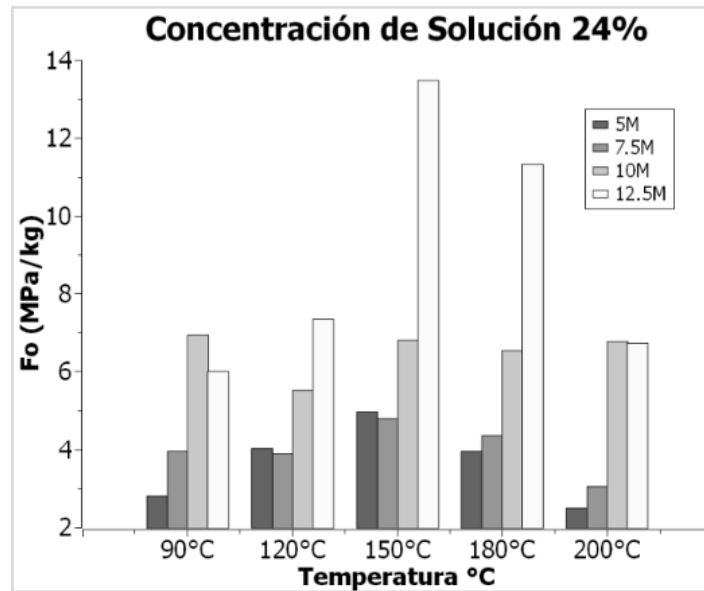
- Para una molaridad de 12.5, se puede apreciar que el aumento del FO es directamente proporcional al aumento de la temperatura hasta los 150°C en el cual presenta un pico de 8.48 MPa/kg, seguido por el decrecimiento del FO directamente proporcional al incremento de la temperatura de curado.



**Figura 43.** Concentración de solución 22%

**b. Con una concentración de solución del 24%, como se presenta en la Figura 44. , se puede observar lo siguiente:**

- Para una molaridad de 5, 7.5 y 12.5, se puede apreciar un aumento del FO directamente proporcional al aumento de la temperatura hasta los 150°C en el cual presenta los siguientes picos: 4.96 MPa/kg, 4.80 MPa/kg, y 13.49 MPa/kg respectivamente, seguido por el decrecimiento del FO directamente proporcional al incremento la temperatura de curado.
- Para una molaridad de 10, se puede apreciar una mayor magnitud del FO:6.94 MPa/kg y 6.80 MPa/kg en las temperaturas de curado de 90°C y 150°C respectivamente, en comparación a las demás temperaturas.

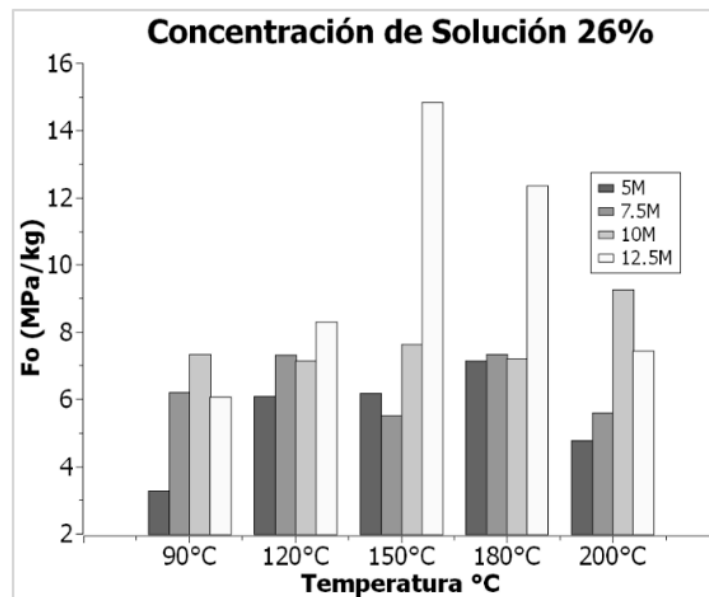


**Figura 44.** Concentración de solución 24%

**c. Con una concentración de solución del 26%, como se enseña en la Figura 45., se puede observar lo siguiente:**

- Para una molaridad de 5, se puede apreciar que el aumento del FO directamente proporcional al aumento de la temperatura hasta los 180°C en el cual presenta un pico de 7.15 MPa/kg, seguido por el decrecimiento del FO directamente proporcional al incremento la temperatura de curado.
- Para una molaridad de 7.5, se puede apreciar una mayor magnitud del FO: 7.32 MPa/kg y 7.34 MPa/kg en las temperaturas de curado de 120°C y 180°C respectivamente, en comparación a las demás temperaturas.
- Para una molaridad de 10, se puede apreciar una mayor magnitud del FO: 9.27 MPa/kg en las temperaturas de curado de 200°C, en comparación a las demás temperaturas.
- Para una molaridad de 12.5, se puede apreciar un aumento del FO directamente proporcional al aumento de la temperatura hasta los 150°C en

el cual presenta un pico de 14.84 MPa/kg, seguido por el decrecimiento del FO directamente proporcional al aumento la temperatura de curado.



**Figura 45.** Concentración de solución 26%

De acuerdo con el análisis realizado, el comportamiento térmico más común de los discos indica que existen dos rangos de temperatura. En el primer rango (90°C - 150°C) el FO es directamente proporcional a la temperatura de curado y en el segundo rango (150°C - 200°C) el FO es inversamente proporcional a la temperatura de curado.

De lo anterior, el análisis permite inferir que el aumento excesivo de la temperatura afecta de forma negativa en las propiedades mecánicas del material. En la Figura 46. , se puede observar las fisuras generadas bajo una temperatura de curado de 200°C.

Por lo expuesto, se determinó que la temperatura óptima de curado es 150°C, siendo esta en la que se obtuvo las magnitudes de FO más altas y además representó el límite térmico a partir del cual empiezan a disminuir las propiedades mecánicas del material.



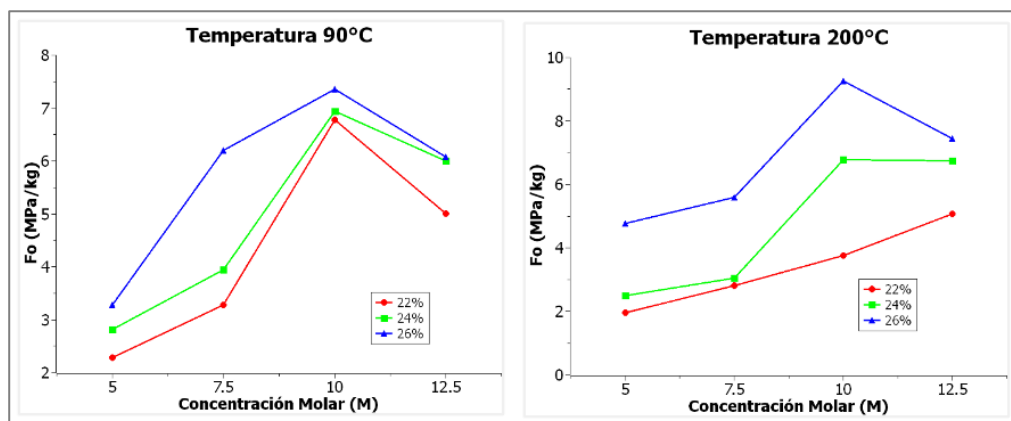
**Figura 46.** Fisuras generadas por exceso de temperatura de curado

### 3.3.7. Efecto de la concentración molar en diferentes temperaturas

En base al análisis de la selección de las variables de diseño, para la elaboración de los discos, se realizó un análisis del efecto de la concentración molar en el FO, frente al contenido de solución en las distintas temperaturas de curado.

Con una temperatura de curado de 90°C y 200°C, como se exhibe en la Figura 47. se puede observar lo siguiente:

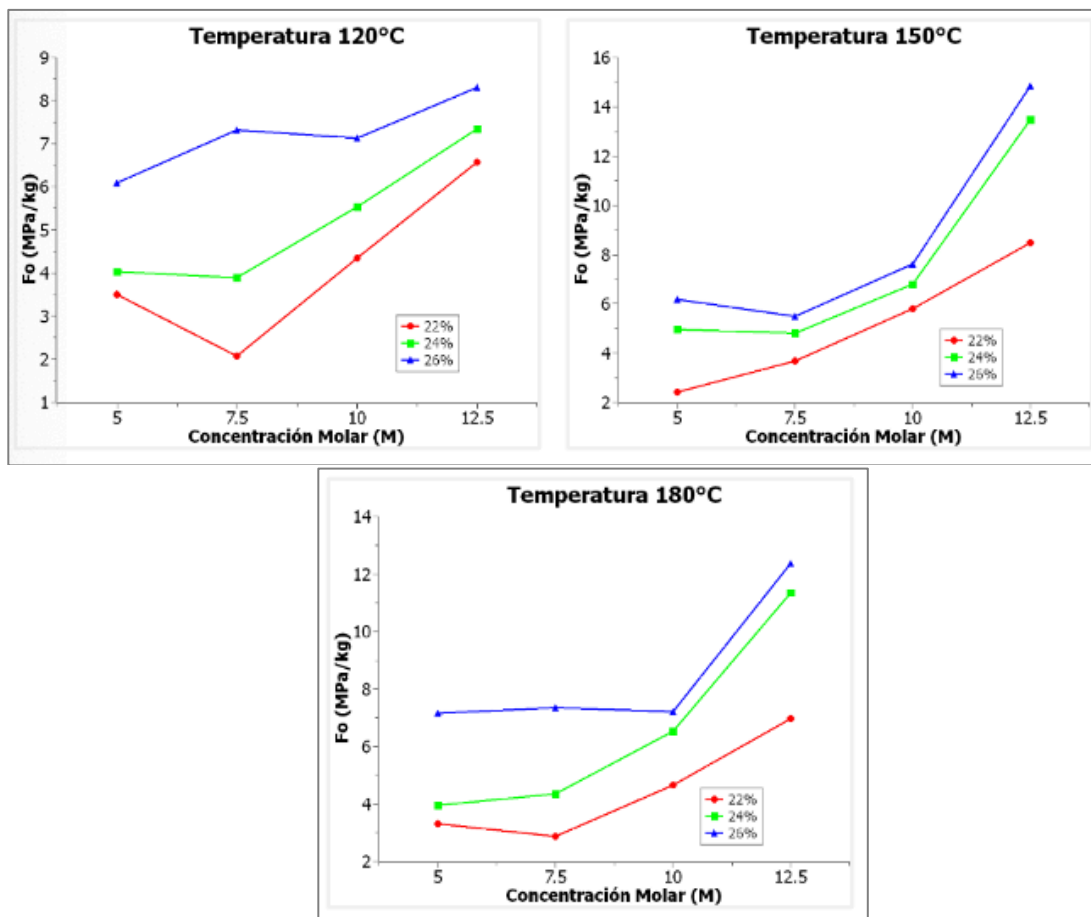
El FO tiende a incrementarse en la misma proporción que aumenta la concentración molar hasta 10 M, luego de esta molaridad decrece el FO.



**Figura 47.** Efecto de la concentración molar: a) 90 C y b) 200 C

Con una temperatura de curado de 120°C, 150°C y 180°C, como se muestra en la Figura 48. , se puede observar lo siguiente:

El FO tiende a incrementarse en la misma proporción que aumenta la concentración molar.



**Figura 48.** Efecto de la concentración molar: a) 120°C, b) 150°C y c) 180°C

De acuerdo con el análisis realizado, el comportamiento que presentan los discos al aumentar la concentración molar tiende a incrementar el FO. Esto sucede porque al ser la molaridad alta las partículas de la fuente de aluminosilicatos reaccionan rápidamente y en su totalidad, permitiendo que la etapa de disolución sea efectiva, constituyéndose en la base para completar un óptimo proceso de geopolimerización. Además, se puede observar que el contenido de solución afecta

directamente al FO. En medida que aumenta el contenido de solución, también se incrementa el FO.

En las temperaturas de 90°C y 200°C ocurre un decrecimiento en la concentración molar de 12.5M, esto podría suceder por lo siguiente:

- La temperatura de 90°C con una concentración alta de 12.5M, no permite el desarrollo completo del proceso de endurecimiento y geopolimerización por la baja temperatura.
- La temperatura de 200°C con una concentración alta de 12.5M, afecta de forma negativa en las propiedades mecánicas del material por la alta temperatura.

### **3.4. Selección de la mezcla óptima**

Una vez que se ha trabajado con las variables señaladas, se establece que, la temperatura óptima fue 150°C, por lo que el contenido de solución y concentración molar que permiten un mejor comportamiento mecánico a esa temperatura de curado es de 26% y 12.5M.

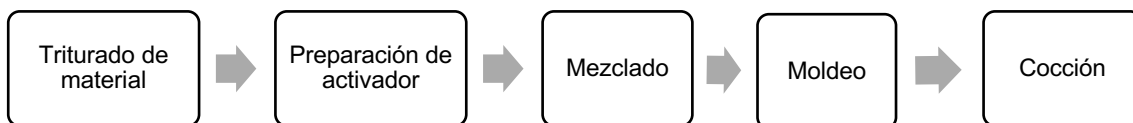
La mezcla óptima por tanto será de: **12.5M - 26%CS - 150°C**, con lo que a partir de esta mezcla se procederá con la construcción de los prototipos.

## 4. Resultados

### 4.1. Aplicación del material geopolimérico en nuevos materiales constructivos

#### 4.1.1. Elaboración de prototipos

Una vez se ha llegado a determinar, la mezcla óptima, la misma será aplicada ladrillos tipo tejuela **LTT** geopolimerizados; a partir del material de desecho de las fábricas artesanales, este segundo proceso de fabricación inicia con el triturado de los residuos (ladrillos) y culminando en la cocción de estas nuevas unidades a bajas temperaturas. En la Figura 49. , se esquematiza el proceso a realizar para la elaboración de las fachaletas o ladrillo tejuela.



*Figura 49. Proceso para la elaboración de prototipos*

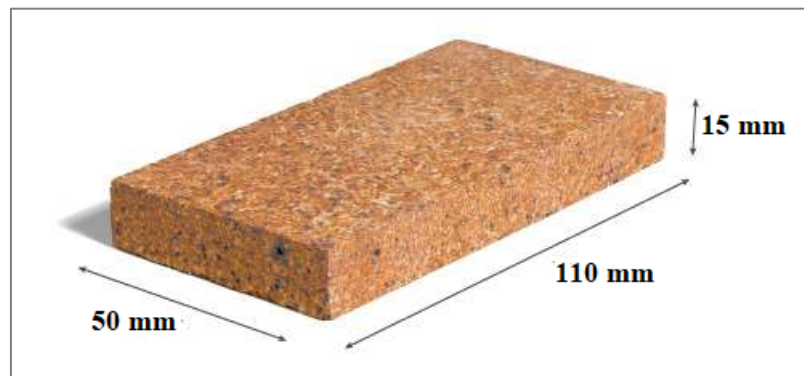
#### 4.1.2. Dimensiones del ladrillo tipo tejuela

Siguiendo la normativa NTE INEN-ISO 12678-1 y bajo las recomendaciones de la normativa española UNE-EN 772 para ladrillos geopoliméricos [45], el tamaño del prototipo del ladrillo tipo tejuela se lo definió con las siguientes dimensiones:

Largo: 110 mm.

Ancho: 50 mm.

Espesor: 15 mm.



*Figura 50. Dimensiones del prototipo de ladrillo tipo tejuela*

## **4.2. Caracterización de los ladrillos geopolimerizados tipo tejuela**

Una vez construidos los LTT, estos deberán ser caracterizados física, mecánica y térmicamente, para su aplicación en edificaciones.

### **4.2.1. Caracterización físico - mecánica del ladrillo geopolimerizado tipo tejuela**

Para la caracterización físico-mecánica se deberá establecer la densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción, resistencia a la compresión, y resistencia a la flexión simple.

#### **4.2.1.1. Densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción**

Consideramos la densidad como la relación entre el peso seco de la muestra y el volumen de esta. El procedimiento para el desarrollo de este ensayo se basó en la normativa NTE INEN 573 (2015)<sup>37</sup>. Para iniciar el procedimiento; se colocó los prototipos dentro de un horno para secado, a una temperatura de 110°C, luego se

---

<sup>37</sup> Revisado en <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/573.pdf>, el 16/07/2022

registró el peso y las dimensiones de cada uno, finalmente mediante la ecuación 1, se determinó la densidad aparente, aplicando la siguiente fórmula:

$$Densidad = \frac{W_s}{V} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$W_s$  (g): Peso de la muestra seca

$V$  (m<sup>3</sup>): Volumen del espécimen



**Figura 51.** Inmersión de prototipos por 24 horas

Para la absorción, el procedimiento desarrollado se basó en la normativa NTE INEN 296 (2014)<sup>38</sup>. Para iniciar se dejó secar los prototipos a una temperatura de 110°C hasta obtener un peso constante, se registró el peso y luego se sumergieron en una fuente con agua durante 24h. Una vez cumplido el tiempo, se obtuvo el peso saturado y se calculó el porcentaje de absorción mediante la ecuación 2.



$$Abs(\%) = 100 \times \frac{W_{sat} - W_s}{W_s} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

$W_s$  (g): Peso de la muestra seca

$W_{sat}$  (g): Peso de la muestra saturada

<sup>38</sup> Revisado en [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_296.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_296.pdf) , el 16/07/2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA													
		La Universidad Católica de Loja											
		FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL											
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES													
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE PROTOTIPOS													
Realizado por:		Eddy Medina											
Proyecto:		Diseño y evaluación de prototipos de materiales a base de residuos de ladrillos											
Ubicación:		UTPL - Loja - Loja - Ecuador											
Modo de ensayo:		Manual											
Referencias normativas:		NTE INEN 690, ASTM D2216											
No. de ensayo	Peso muestra seca al horno (gr)	Peso en el aire de la muestra superficialmente seca (gr)	Peso aparente en el agua de la muestra saturada (gr)	Dimensiones			Densidad relativa (gravedad específica) (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad relativa (gravedad específica) (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad (SH) kg/m <sup>3</sup>	Densidad (SSS) kg/m <sup>3</sup>	Densidad aparente (SSS) kg/m <sup>3</sup>	Absorción %
				Altura	Ancho	Largo							
1		158,64	77,73	1,55	4,95	10,88	1,58	1,96	2,54	1578,91	1955,8	2537,74	23,870
2	123,30	155,40	70,75	1,59	5,00	10,97	1,46	1,84	2,35	1452,94	1831,2	2340,47	26,034
Promedio							1,52	1,90	2,45	1515,93	1893,50	2439,11	24,95
Simbolos y fórmulas	Prec+mh.	Prec+mss.	Prec+ms.	h	e	L	SH	SH	SSS	SH	SSS	SSS	%

**Figura 52.** Determinación de la densidad y porcentaje de absorción de prototipos de materiales a base de residuos de ladrillos.

A continuación, se precisan los resultados de: densidad y porcentaje de absorción, del ladrillo tipo tejuela:

**Tabla 20.** Resumen del ensayo de densidad y porcentaje de absorción

Mezcla	Densidad Relativa Seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porcentaje de Absorción %
Geopolimerización	1515.9	2439.1	24.95

Analizando con la normativa INEN-297; la mezcla cumple el porcentaje de absorción de 25%, que recomienda la norma para un ladrillo macizo cocido tipo C; pues, la mezcla alcanza el porcentaje de la norma.

#### 4.2.1.2. Cálculo la porosidad del ladrillo geopolimerizado<sup>39</sup>

Realizado por:	Jandry Guarinda Avila
Ensayado por:	Ing. Diego Mata
Fecha de ensayo:	16/5/24
Proyecto:	-
Referencias normativas	Astm d 297 astm d792 iso 1183 iso 2781

No.	Cód.	Datos de probeta		Probeta				Empuje		Agua		Densidad		Porosidad (%)		
		Dimensión (cm)		Volumen	W al aire libre		W sumergido		Individual	Promedio	Volumne (ml)		Real		Aparente	
		Área	altura	cm <sup>3</sup>	kg	N	kg	N	N	N	Individual	Promedio	kg/m <sup>3</sup>		kg/m <sup>3</sup>	
1	TS01	55,00	1,60	88,00	0,14	1,41	0,08	0,06	1,35	1,35	400,00	400,00	1640,45	861,82	0,86	47,46

Para calcular la porosidad ( $\phi$ ) del material, primero se determina el volumen ( $V$ ) restando el peso del material sumergido ( $W_{\text{sumergido}}$ ) del peso del material saturado ( $W_{\text{saturado}}$ ), resultando en un volumen de 1330 cm<sup>3</sup>. La densidad real ( $\rho_r$ ) se calcula dividiendo el peso del material seco al aire libre ( $W_{\text{aire}}$ ) por su volumen, obteniendo 1590.91 kg/m<sup>3</sup>. Luego, la densidad aparente ( $\rho_a$ ) se determina dividiendo el peso del material saturado ( $W_{\text{saturado}}$ ) por su volumen, resultando en 1602.27 kg/m<sup>3</sup>. Finalmente, la porosidad da como resultado en un 47.46%<sup>40</sup>.

$$^{39} V = W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}$$

$$V = 1.41 \text{ kg} - 0.08 \text{ kg} = 1.33 \text{ kg}$$

$$V = 1.33 \text{ kg} \times (1000 \text{ cm}^3 / 1 \text{ kg}) = 1330 \text{ cm}^3$$

A continuación, se calcula la densidad real ( $\rho_r$ ) dividiendo el peso del material seco al aire libre ( $W_{\text{aire}}$ ) por su volumen:

$$\rho_r = W_{\text{aire}} / V$$

$$\rho_r = (0.14 \text{ kg} / 0.088 \text{ m}^3) \times 1000 = 1590.91 \text{ kg/m}^3$$

La densidad aparente ( $\rho_a$ ) se calcula dividiendo el peso del material saturado ( $W_{\text{saturado}}$ ) por su volumen:

$$\rho_a = W_{\text{saturado}} / V$$

$$\rho_a = (1.41 \text{ kg} / 0.088 \text{ m}^3) \times 1000 = 1602.27 \text{ kg/m}^3$$

Finalmente, la porosidad ( $\phi$ ) se determina utilizando la relación entre la densidad aparente y la densidad real:

$$\phi = (1 - (\rho_a / \rho_r)) \times 100$$

$$\phi = (1 - (861.82 / 1640.45)) \times 100$$

$$\phi = (1 - 0.5255) \times 100$$

$$\phi = 47.45\%$$

Por lo tanto, la porosidad del material es del 47.45%.

<sup>40</sup> A futuro, de acuerdo con los análisis, estos ladrillos podrían considerarse ideales para aplicaciones donde el aislamiento sea más importante que la capacidad de carga.

#### 4.2.1.3. Resistencia a la compresión

El procedimiento para el ensayo de resistencia a la compresión se basó en la normativa NTE INEN 294 (1977)<sup>41</sup>. Se tomó el peso y las dimensiones de cada prototipo, luego se colocó cada uno en la máquina de compresión simple<sup>42</sup>, y se ejerció de manera uniforme una carga gradual con una velocidad constante hasta que falle el prototipo, se registró la carga de falla y mediante la ecuación 3, se obtuvo la resistencia a compresión.

$$\sigma_s = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

P(N): Carga de rotura

A(m<sup>2</sup>): área de la sección



**Figura 53.** *Ensayo de compresión*

Al igual que la normativa INEN-297, la normativa española y la del Instituto Auroville Earth, posee diferentes categorías de ladrillos en base a su resistencia máxima a la compresión simple, estos valores se muestran en la Tabla 21.

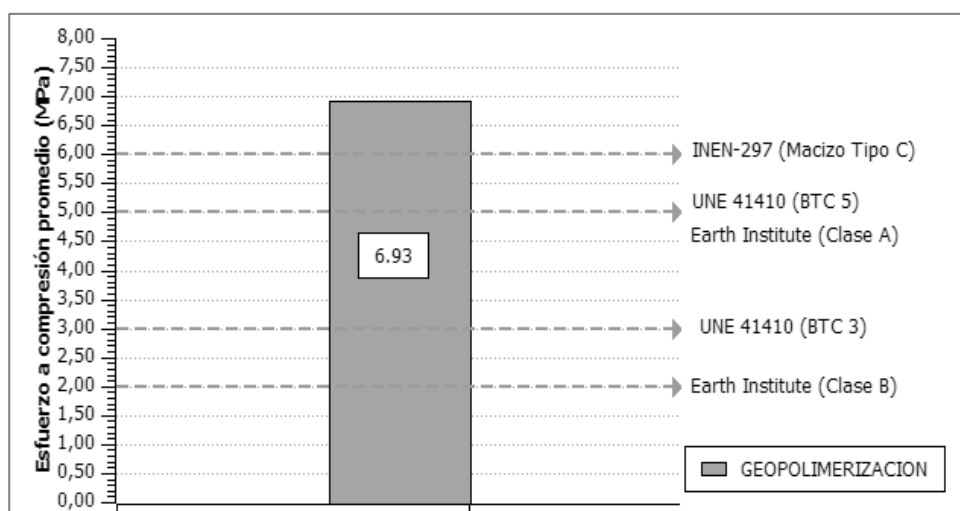
<sup>41</sup> Revisado en <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/297.pdf>, el 16/07/2022

<sup>42</sup> ACCU-TEK

**Tabla 21.** Resistencia a la compresión simple mínima de diferentes normativas

Normativa	Categoría	Resistencia Mínima a la Compresión simple MPa
Norma Española UNE 41410	BTC 1	1.3
	BTC 3	3
	BTC 5	5
Auroville Earth Institute	Clase A	5
	Clase B	2
INEN-297 (Ladrillo Cocido)	Macizo Tipo A.	20
	Macizo Tipo B.	14
	Macizo Tipo C.	6

Nota. Adaptado de UNE 41410, (2008)

**Figura 54.** Resultados de resistencia a compresión

Analizando con la normativa INEN-297; la mezcla de geopolimerización, cumple con los requisitos para un ladrillo macizo tipo C, excediendo este valor de 6 MPa en 15.5%; y, por otra parte, para la normativa española UNE 41410 (BTC 5) y el Earth Institute (Clase A) la mezcla cumple con los requisitos, superando al valor de la normativa de 5 MPa en un 38.6%, tal como se ve en la Figura 54.

#### 4.2.1.4. Resistencia a la flexión simple

El procedimiento para el ensayo a flexión; se basó en la normativa NTE INEN 2554 (2011)<sup>43</sup>. Al igual que el ensayo a compresión, se tomó el peso y las dimensiones respectivas; a cada uno de los prototipos, luego se colocó en la maquina respectiva teniendo en cuenta los apoyos: uno en la parte superior y dos apoyos en la parte inferior, como se muestras en la Figura 55.



*Figura 55. Ensayo a flexión*

Una vez colocada y centrada la pieza se aplica una carga gradual a una velocidad constante hasta llegar a la rotura, se registró los datos y se procedió al cálculo del módulo de rotura mediante la ecuación 4, en el que se considera que el módulo de rotura es el cociente entre el momento flector máximo y el módulo resistente. El momento máximo es  $PL/4$  y el módulo resistente es 2 veces la inercia/altura de la sección

$$R = \frac{3 PL}{2 bd^2}$$

<sup>43</sup> Revisado en <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2554.pdf>, el 16/07/2022

Donde:

R(MPa): Módulo de rotura

P(N): carga aplicada

L (mm): Longitud libre

b(mm): ancho promedio de la pieza

d(mm): altura promedio de la pieza

La Tabla 22. , muestra los valores de resistencia a flexión para ladrillos de suelo cemento en diferentes normativas y de ladrillos cocidos de la normativa ecuatoriana INEN 297, siendo el referente para poder establecer los comparativos, dado que no existe normativa específica para ladrillo tejuela.

**Tabla 22.** Resistencia a la flexión simple mínima de diferentes normativas

Normativa	Categoría	Resistencia Mínima a la Flexión simple MPa
INEN-297 (Ladrillo Cocido)	Macizo Tipo A	4
	Macizo Tipo B	3
	Macizo Tipo C	2

*Nota. Adaptado de UNE 41410, (2008)*

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA													
La Universidad Católica de Loja													
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL													
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES													
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES CON CARGA EN LOS TERCIOS													
Realizado por:	Eddy Medina												Hoja
Ensayado por:	Eddy Medina												
Fecha de ensayo:	01-07-21												
Proyecto:	Diseño de prototipos mediante geopolimerización.												
Equipo:	SHIMADZU X2000												
Modo de ensayo:	Carga axial a velocidad controlada												
Referencias normat	ASTM C 78, NTE INEN 2554:2011												
No.	Fecha de muestreo	Procedencia	Edad (días)	Dimensión (mm)			Separación de apoyos (mm)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Carga Real (KN)	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )		Resistencia Mpa	
				Ancho	Altura	Largo				Módulo de rotura	Promedio	Módulo de rotura	Promedio
1	30-06-21	12.5M-26CS-150°C	7	49,90	16,10	109,57	44,78	1,57	0,47	24,73	19,75	2,43	1,94
2				49,90	16,50	109,50	44,75	1,59	0,29	14,77		1,45	

**Figura 56.** Resultado de resistencia a la flexión simple a los 7 días

Si comparamos, los prototipos con la normativa INEN-297, la mezcla no alcanza a cumplir con los requisitos para un ladrillo macizo cocido tipo C, quedando un 3.15% por debajo de la normativa. Ahora bien, es importante considerar que al no existir

normativa para ladrillo tejuela, la comparativa se ha realizado con normativa de ladrillo tipo macizo, infiriendo que, este prototipo propuesto estaría cumpliendo con los requisitos básicos para poder aplicar envolventes arquitectónicas.

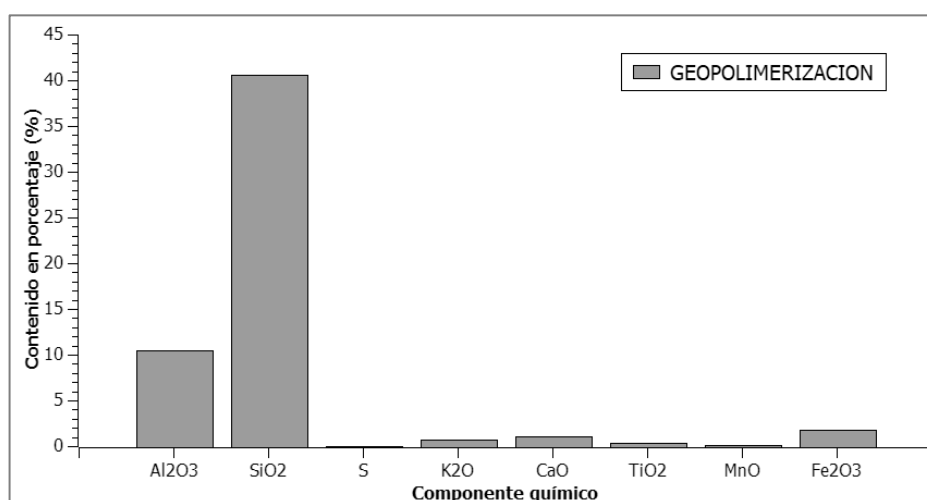
## 4.2.2. Caracterización químico - mineralógica del LTT

### 4.2.2.1. Ensayos de fluorescencia de rayos X (FRX) en probetas

En la Tabla 23. se muestran los principales componentes químicos, de los ladrillos tipo tejuela LTT.

**Tabla 23.** Resumen del ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX)

Componente	Geop. %
*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.5
*SiO <sub>2</sub>	40.6
CaO	1.13
*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.77
K <sub>2</sub> O	0.74
Otros	0.40



**Figura 57.** Componentes químicos de los prototipos

De acuerdo con los resultados obtenidos, la suma de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en los LTT es mayor a 50%<sup>44</sup>, por lo cual se los puede clasificar como un material

<sup>44</sup> \*Σ=52.87

puzolánico idóneo para ser una fuente de aluminosilicatos para procesos de geopolimerización [5]. Además, en su composición química se encuentran óxidos de potasio y calcio que son beneficiosos para el proceso de geo-síntesis.

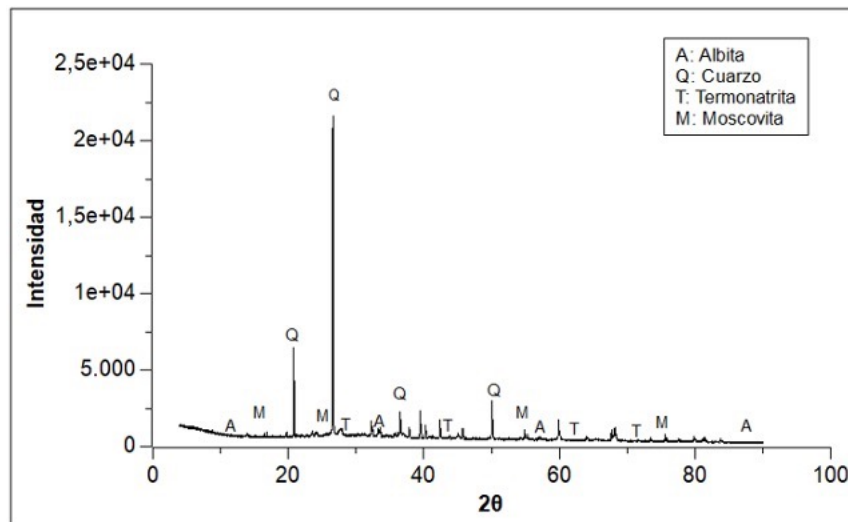
La relación  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  en los LTT, se encuentran dentro de los rangos óptimos: 3 - 3.8, que permitirían resistencias mecánicas muy altas en los productos geopoliméricos [46].

#### 4.2.2.2. Ensayos de difracción de rayos X (DRX) en probetas

En las siguientes tablas se indica el porcentaje de la composición mineralógica de los especímenes ensayados.

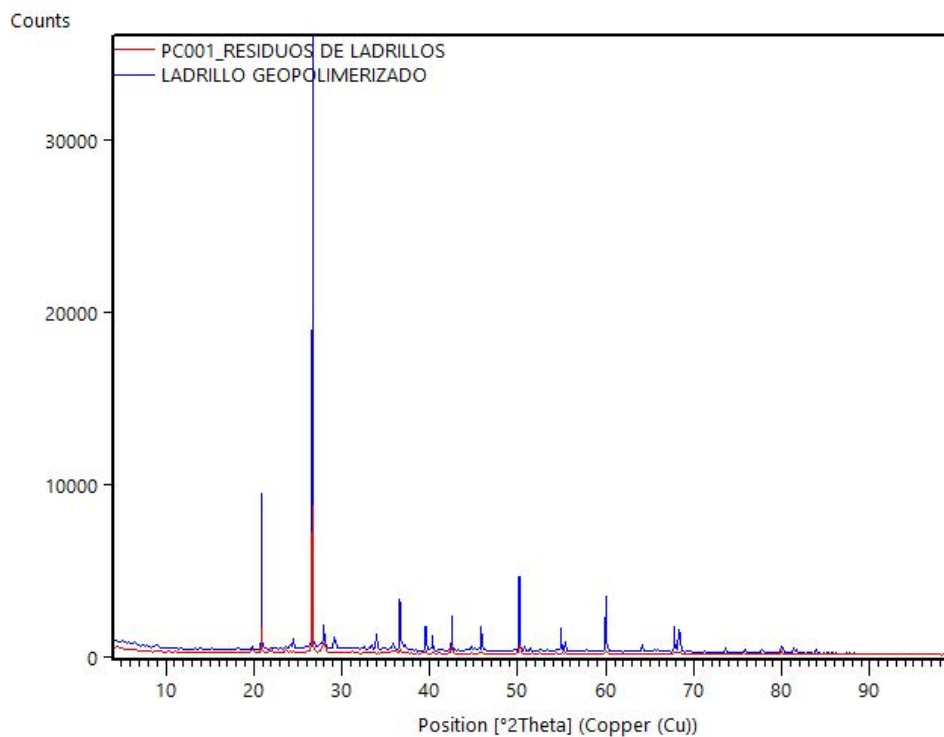
**Tabla 24.** Resumen del ensayo de difracción de rayos X (DRX)

Componente	Geopolimerización (%)
Cuarzo	59
Albita	1
Termonatrita	9
Moscovita	31



**Figura 58.** Resultados ensayo DRX

En la Tabla 24. , el ensayo mineralógico de los LTT resultó los siguientes minerales: cuarzo, albita, moscovita y termonatrita. Destacándose el cuarzo, que presentó los picos más altos: 50%, y fue el mineral con más presencia en los DRX. Por lo tanto, los ladrillos tipo tejuela están compuestos por materiales cristalinos que contienen una gran cantidad de silicio.



**Figura 59.** Difractograma de rayos X (XRD), comparación de dos muestras residuos de ladrillo y ladrillo geopolimerizado<sup>45</sup>

En el análisis de los picos principales (30° - 35°): ambos difractogramas muestran un pico muy intenso alrededor de 30°, indicando la presencia de una fase cristalina predominante en ambas muestras. Este pico es particularmente más alto y de

<sup>45</sup> Eje y, representa la intensidad de los picos de difracción, medida en cuentas (counts). La intensidad está relacionada con la cantidad de material cristalino presente en la muestra. Eje x, representa el ángulo de difracción  $2\theta$ , medido en grados. Este ángulo está relacionado con la distancia interplanar de los cristales en la muestra, según la ley de Bragg.

varios picos en la muestra de ladrillo geopolimerizado, sugiriendo una mayor cristalinidad o una mayor concentración de ciertos compuestos cristalinos en comparación con los residuos de ladrillos. Esto permitiría identificar que la muestra de ladrillo geopolimerizado parece tener una mayor cristalinidad o contenido de fases cristalinas específicas en comparación con los residuos de ladrillos.

Antes de la geopolimerización los residuos de ladrillos presentan un patrón de difracción con ciertos picos característicos. Estos picos corresponden a las fases cristalinas presentes en los residuos, como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y posibles fases minerales como la mullita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ).

Después de la geopolimerización la muestra de ladrillo indica un cambio en los patrones de difracción, indicando una reorganización en la estructura cristalina del material. Los picos más intensos y definidos en la muestra geopolimerizada sugieren una mayor cristalinidad o la formación de nuevas fases cristalinas específicas debido al proceso de geopolimerización<sup>46</sup>.

### ***Mecanismo químico de geopolimerización reflejado en DRX***

En cuanto a disolución y policondensación, los residuos de ladrillos, al ser tratados con activadores alcalinos, sufren una disolución de sus componentes aluminosilicatados. Los iones liberados se reordenan y condensan en una estructura tridimensional de geopolímeros. Este reordenamiento químico se refleja en el difractograma como picos más definidos y posiblemente nuevos picos.

---

<sup>46</sup> La mayor intensidad de los picos en la muestra geopolimerizada sugiere una mayor ordenación y formación de estructuras cristalinas. Esto es típico en geopolímeros donde la reacción alcalina induce la formación de una red polimérica de silicoaluminatos.

En la fase de curado y cristalización, durante el curado la estructura del geopolímero se estabiliza y puede cristalizar parcialmente, lo que se manifiesta en el DRX como un aumento en la intensidad de ciertos picos y la aparición de otros nuevos.

El proceso de geopolimerización transforma los residuos de ladrillos en un material con una estructura cristalina distinta y más ordenada, como se observa en los patrones de difracción de rayos X. Los picos más intensos y la aparición de nuevas fases cristalinas en la muestra de ladrillo geopolimerizado son indicativos de una mayor cristalinidad y la formación de nuevas fases minerales. Estos cambios estructurales contribuyen a las mejores propiedades mecánicas y durabilidad del material geopolimerizado.

#### **4.2.3. Verificación del Proceso de Geopolimerización mediante**

##### **SEM**

El objetivo del análisis fue la caracterización de las muestras, tanto desde un punto de vista morfológico como su composición química elemental.

Para ello se ha llevado a cabo el siguiente plan de trabajo:

La preparación de la muestra incluyó el montaje en soportes indicados, la aplicación de una capa delgada de recubrimiento conductor (el recubrimiento utilizado en el análisis fue oro (Au)) y la carga en el microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA 3.

Estudio morfológico de superficie: se examinaron las características de forma de las muestras receptadas usando el método SEM, permitiendo observar la topografía y la morfología de la superficie de las muestras con una ampliación alta

para observar detalles finos, textura de superficie, forma de partículas individuales, etc.

Composición química cualitativa y semicuantitativa: para la caracterización química elemental de la muestra se ha utilizado la técnica de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) utilizada en combinación con el SEM.

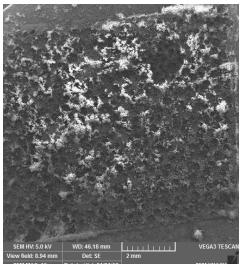
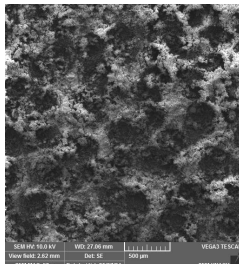
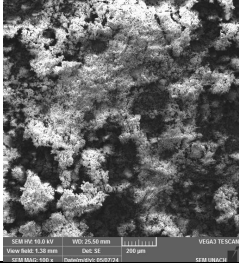
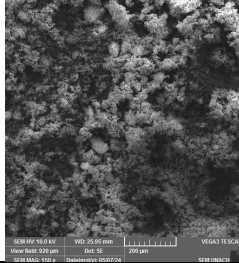
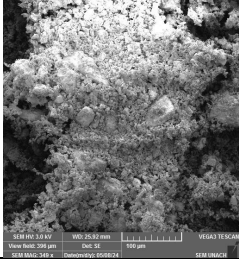
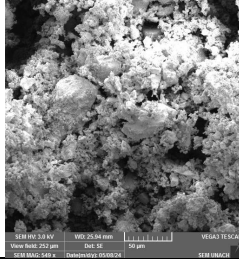
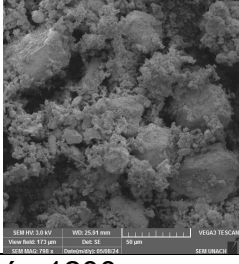
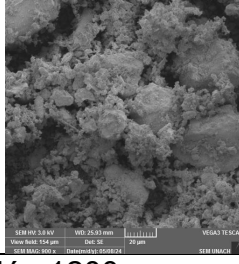
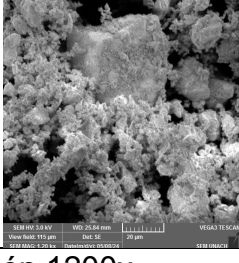
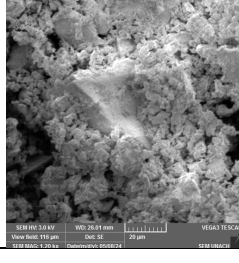
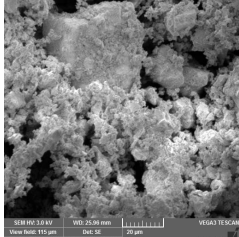

El EDS permite identificar los elementos químicos presentes en zonas puntuales de la muestra y proporciona información sobre su composición, además de generar mapas de distribución de los elementos.

#### **4.2.3.1. Resultados del análisis SEM**

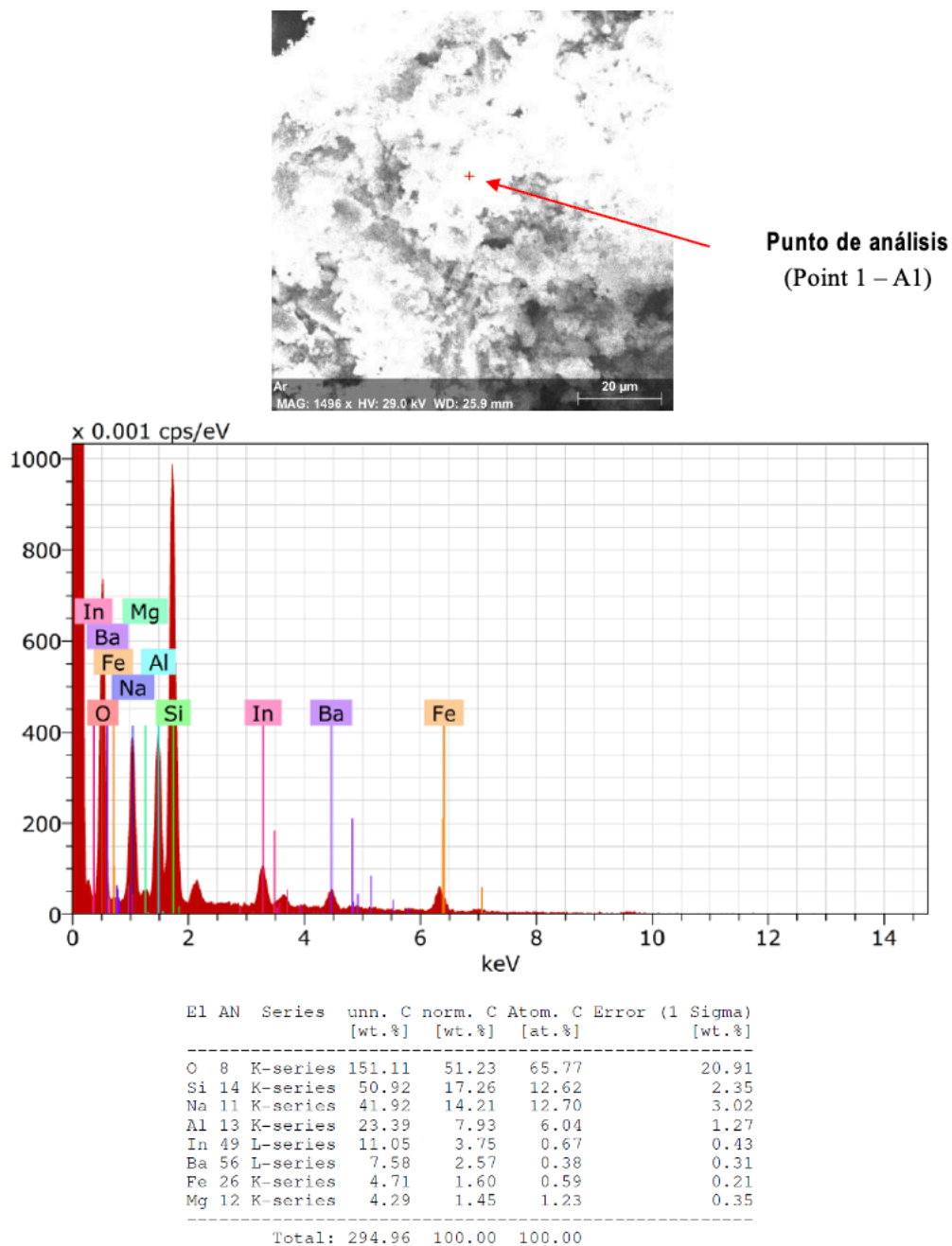
Con el fin de determinar las características morfológicas de las muestras se ha realizado una exploración utilizando el microscopio electrónico de barrido SEM, operando a 3 a 30 kV de tensión de filamento y distancia de trabajo de 20 mm a 40 mm en las muestras previamente recubiertas con material conductor (Au).

A continuación, se adjunta las imágenes adquiridas en conjunto con las mediciones detalladas referentes a las dimensiones de los granos de arena que han sido minuciosamente examinados y registrados.

**Tabla 25.** *Tabla de imágenes de arcilla A1, a diversas magnificaciones en microscopía de barrido electrónico.*

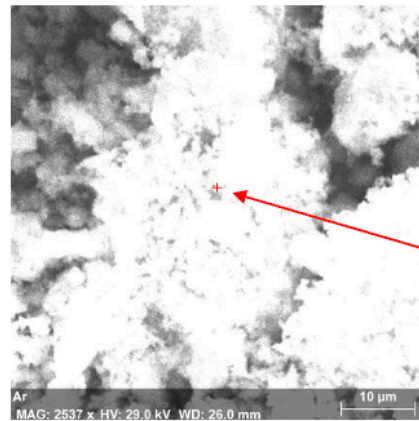
<p>Magnificación: 15x</p> 	<p>Magnificación 50x</p> 
<p>Magnificación 100x</p> 	<p>Magnificación 200x</p> 
<p>Magnificación 350x</p> 	<p>Magnificación 550x</p> 
<p>Magnificación 800x</p> 	<p>Magnificación 900x</p> 
<p>Magnificación 1200x</p> 	<p>Magnificación 1200x</p> 
<p>Magnificación 1200x</p> 	

Los resultados obtenidos muestran la morfología característica de la arcilla (A1) en análisis, se observan partículas de forma irregular, la composición química elemental de la arcilla será posteriormente determinadas mediante análisis de EDS.

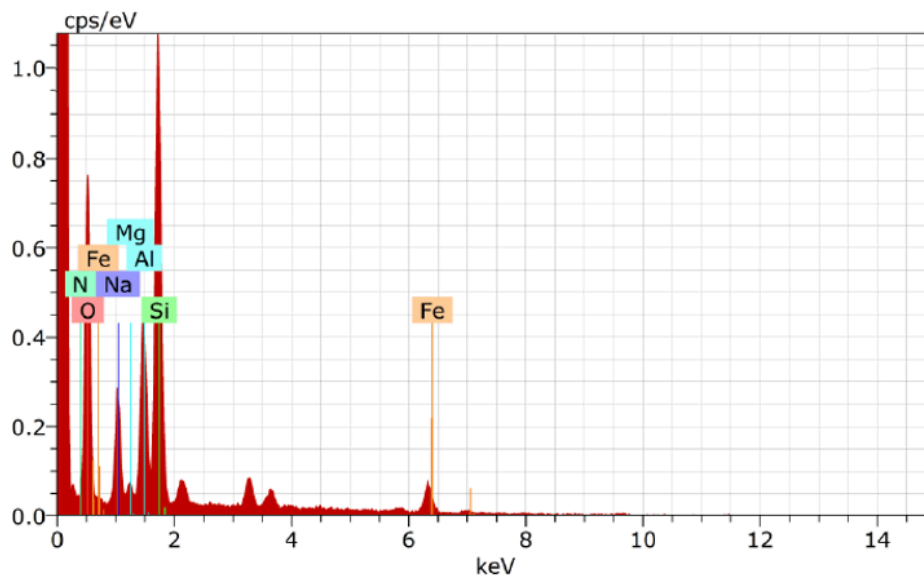


**Figura 60.** Análisis morfológico y químico elemental de la muestra de arcilla (A1) mediante SEM y EDS en el Punto de análisis 1

Para el análisis EDS (Espectroscopía de energía dispersiva de rayos X) se definió un punto de interés (Point 1 – A1). Se identificó la presencia significativa de oxígeno (O) constituyendo la parte predominante en la composición, silicio (Si), sodio (Na) y aluminio (Al) en una cantidad apreciable, así como también indio (In), bario (Ba), hierro (Fe) y magnesio (Mg) en menor proporción.



**Punto de análisis**  
(Point 2 – A1)

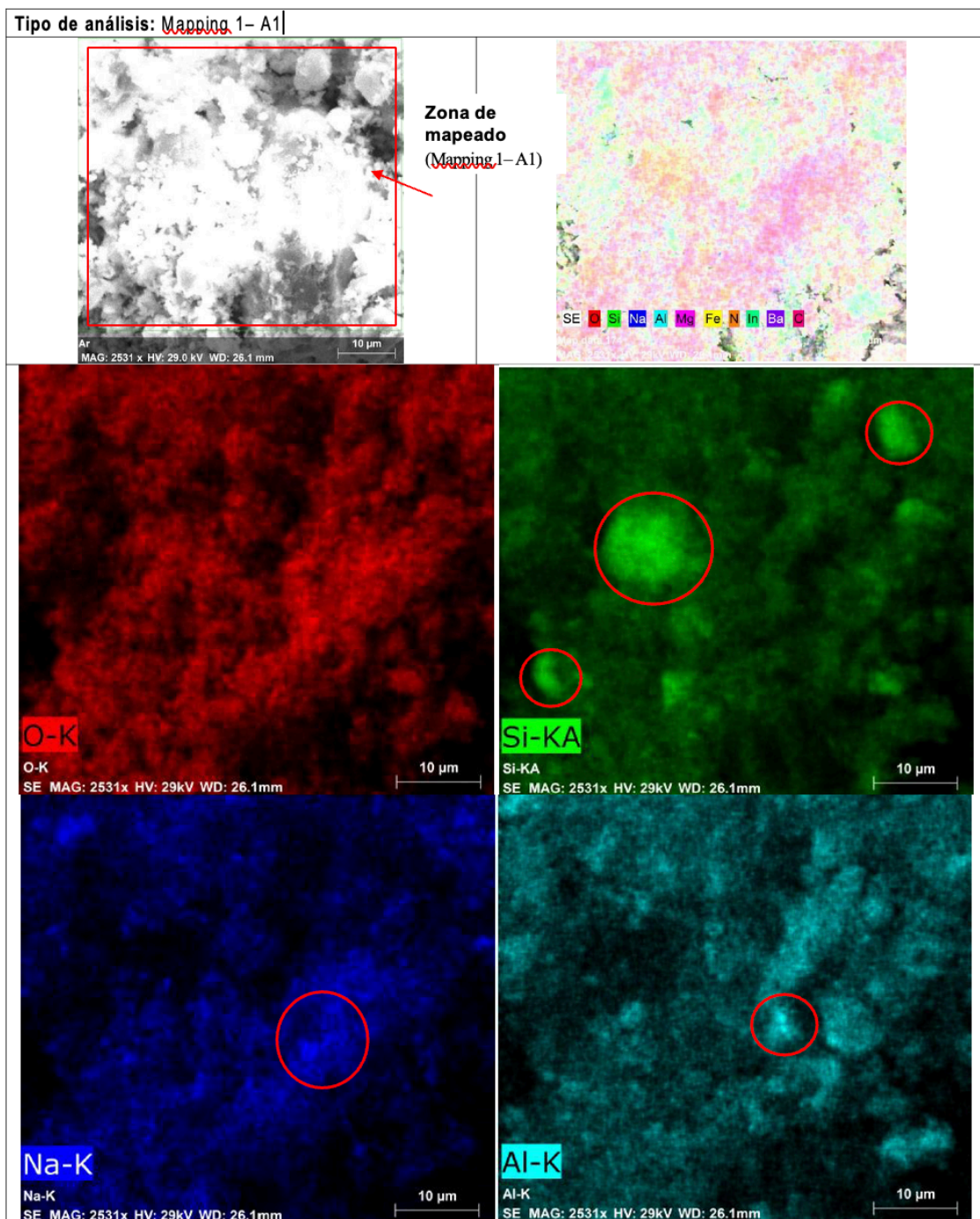


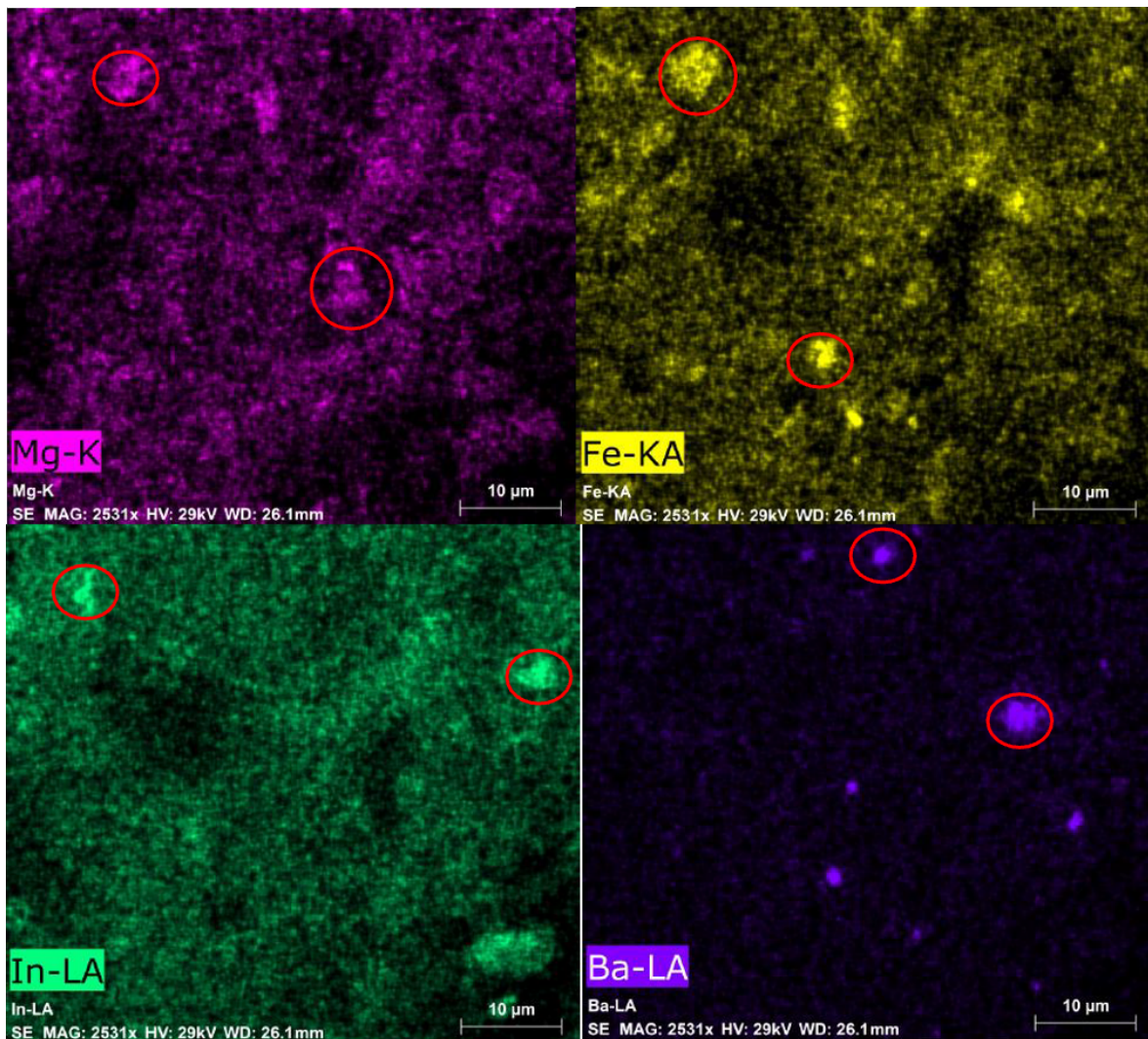
El AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O 8	K-series	88.93	57.09	63.70	12.23
Si 14	K-series	20.19	12.97	8.24	0.95
N 7	K-series	19.89	12.77	16.28	4.01
Na 11	K-series	12.42	7.97	6.19	0.93
Al 13	K-series	9.83	6.31	4.18	0.55
Fe 26	K-series	2.66	1.71	0.55	0.13
Mg 12	K-series	1.82	1.17	0.86	0.16
Total:		155.75	100.00	100.00	

**Figura 61.** Análisis morfológico y químico elemental de la muestra de arcilla (A1) mediante SEM y EDS en el Punto de análisis 2

Para el Point 2 de análisis EDS se definió un segundo punto de interés (Point 2 – A1). Se identificó la presencia significativa de oxígeno (O) constituyendo la parte predominante en la composición, silicio (Si), sodio (Na) y aluminio (Al) y magnesio (Mg) en una cantidad apreciable.

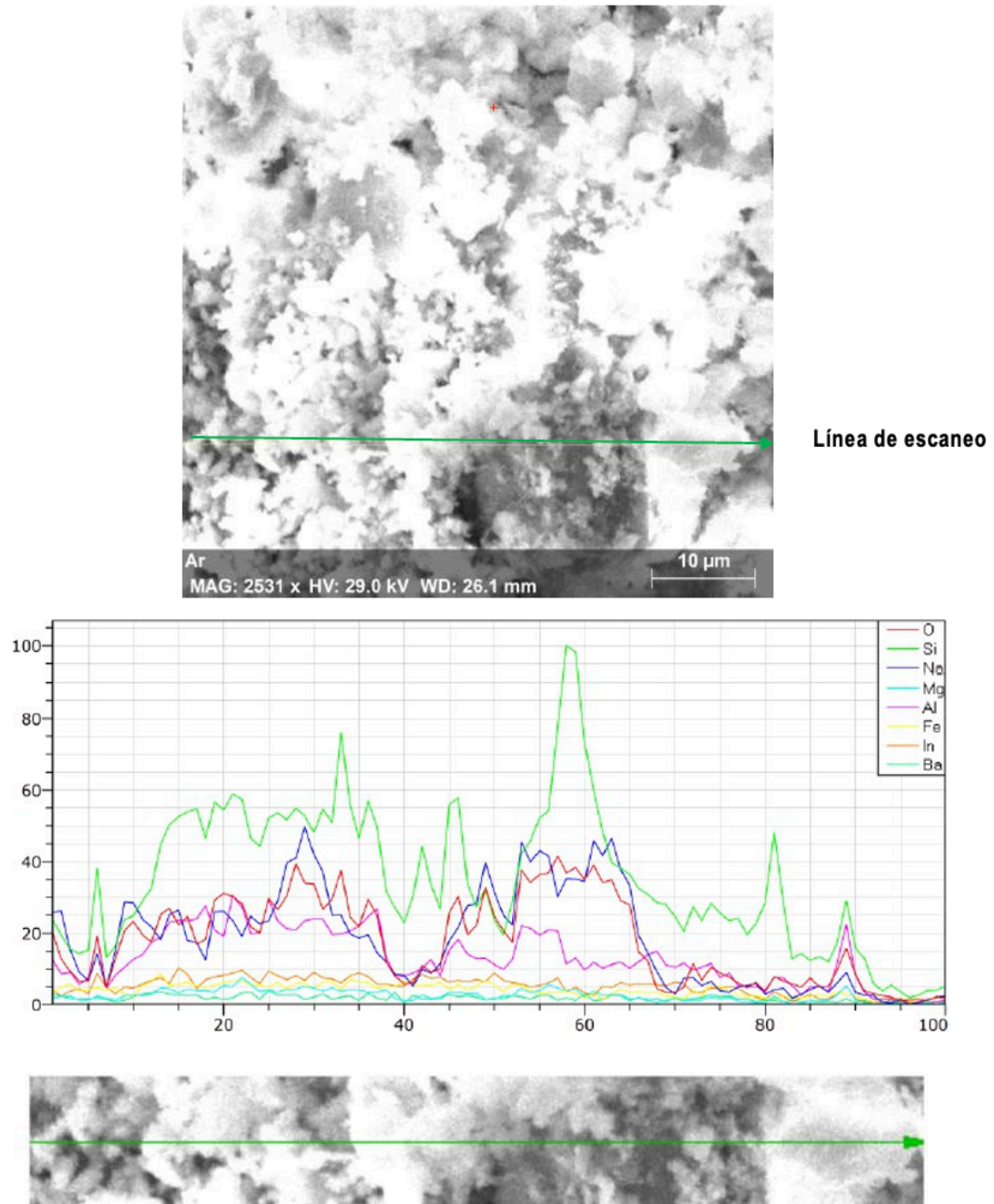
**a. Tipo de análisis: Mapping 1-A1**





**Figura 62.** Mapeo de elementos de la muestra de arcilla (A1) mediante EDS en la zona de análisis A1

Para el análisis tipo mapping mediante EDS se escogió una zona de mapeado (Mapping 1-A1), este análisis reveló la distribución de los elementos en la muestra identificando patrones. Se confirmó la predominancia de oxígeno (O), seguido de silicio (Si) y sodio (Na) en cantidades considerables. Además, se observó la distribución de los elementos como indio (In), bario (Ba), hierro (Fe), aluminio (Al) y magnesio (Mg).



**Figura 63.** Análisis elemental a lo largo de una línea de escaneo en la muestra de arcilla (A1) mediante EDS

Se realizó un escaneo de tipo lineal que reveló la distribución y presencia una vez más de silicio (Si) en mayor proporción, así como también oxígeno (O) y sodio (Na).

#### **4.2.3.2. Conclusiones de los análisis morfológicos y químicos SEM**

Los resultados del análisis morfológico y químico de la muestra de arcilla (A1) indican una alta probabilidad de geopolimerización. Las imágenes de alta magnificación muestran una matriz densa y homogénea sin estructuras cristalinas evidentes, lo que es típico de los geopolímeros. Además, la distribución uniforme de partículas observada en las imágenes de menor magnificación refuerza esta conclusión. Los resultados del análisis de EDS confirman la presencia predominante de oxígeno, silicio, sodio y aluminio, con una distribución homogénea de estos elementos, características consistentes con una red de aluminio-silicato propia de los geopolímeros. En conjunto, estos indicios sugieren fuertemente que la muestra ha experimentado geopolimerización.

#### **4.2.4. Variables para modelación de especímenes**

Para obtener un correcto análisis de resultados en las modelaciones FEM, se requiere de una validación de los datos obtenidos en laboratorio y los datos obtenidos mediante el software [47].

Para efectuar las simulaciones y con ello la validación de los prototipos será necesario establecer correctamente los parámetros del material. Las propiedades físicas y mecánicas de los elementos son indispensables al momento de definir el modelo, propiedades que para el caso de esta investigación han sido obtenidas con una combinación de métodos experimentales y teóricos como: densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, porosidad, diagrama esfuerzo – deformación del elemento y por ende la resistencia a la compresión y flexión máxima<sup>47</sup>.

---

<sup>47</sup> Los datos obtenidos permitirán realizar simulaciones para nuevas geometrías del material geopolimerizado.

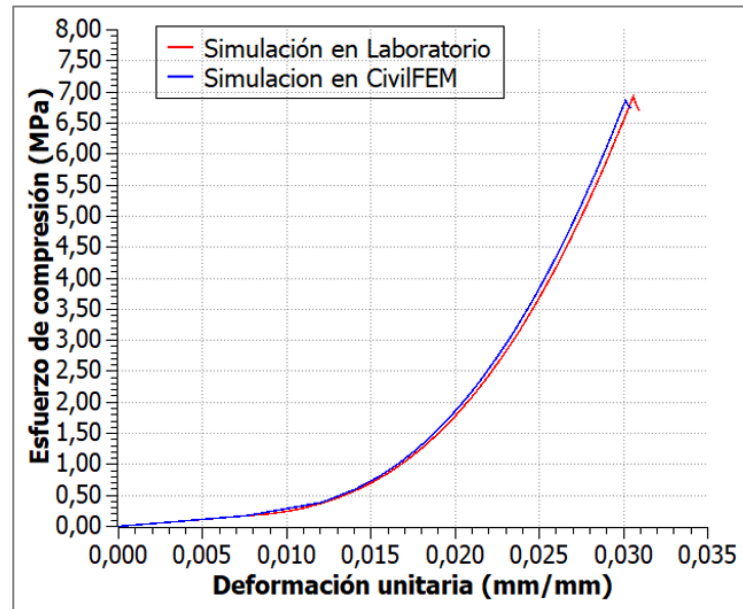
A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el software Civil FEM basados en los datos experimentales de los resultados de compresión y de flexión simple, determinados a partir de los datos de la Tabla 26.

**Tabla 26.** *Propiedades del ladrillo tejuela para modelación FEM*

Ladrillo	Coefficiente de Poisson (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Geopolimerizado	90.55	0.1

#### 4.2.5. Validación en modelo de compresión

Una vez finalizado el proceso de modelación y comparando los resultados en la Figura 64. , observamos una clara correlación entre los datos calculados; posterior a los ensayos de compresión en laboratorio y los obtenidos en el software Civil FEM. Los resultados experimentales en el LTT mostraron un esfuerzo máximo a compresión de 6.93 MPa con una deformación unitaria de 0.03. Por otro lado, los resultados en Civil FEM muestran un esfuerzo máximo a compresión de 6.86 MPa con una deformación unitaria de 0.03 de esta forma se obtiene una diferencia de -1.00% en resultados de compresión y de -1.47% en resultados de deformación.



**Figura 64.** Esfuerzo deformación experimental vs FEM, Ensayo de compresión

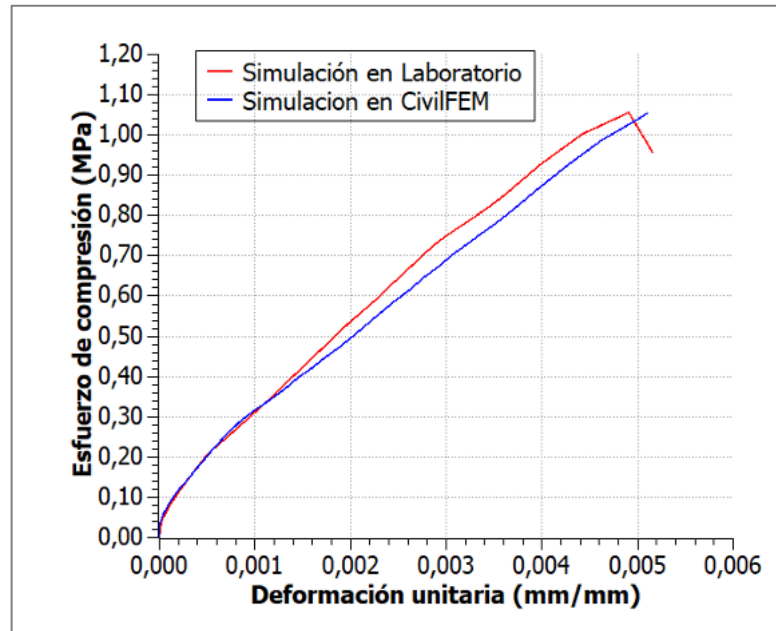
Obteniendo un coeficiente de determinación de Pearson de  $r^2=0.9985$  entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante el software FEM. De esta manera siguiendo las recomendaciones de Boutagouga en [48] de aceptación en modelaciones FEM y con error menor al 5% la simulación del modelo a compresión se considera como aceptable.

**Tabla 27.** Validación del modelo a compresión

Identificación	GEO
$\bar{\sigma}$ (MPa) Lab.	6.93
$\varepsilon$ (mm/mm) Lab.	0.03
$\bar{\sigma}$ (MPa) FEM.	6.86
$\varepsilon$ (mm/mm) FEM	0.03
Error Relativo $\bar{\sigma}$ (%)	-1.00%
Error Relativo $\varepsilon$ (%)	-1.47%
Pearson <sup>2</sup>	0.999

#### 4.2.6. Validación en modelo de flexión simple

Similar al proceso del ensayo a compresión, la metodología presenta resultados con una clara correlación entre la simulación y datos reales, resultados de las probetas ensayadas a flexión simple. En la Tabla 28. , se presenta un cuadro de resumen de resultados.



**Figura 65.** Esfuerzo deformación experimental vs FEM, Ensayo a flexión en LTT

**Tabla 28.** Validación del modelo a flexión

Identificación	Geopolimerización
$\sigma$ (MPa) Lab	1.06
$\epsilon$ (mm/mm) Lab	0.004
$\sigma$ (MPa) FEM	1.05
$\epsilon$ (mm/mm) FEM	0.005
Error Relativo $\sigma$ (%)	-0.21%
Error Relativo $\epsilon$ (%)	3.92%
Pearson <sup>2</sup>	0.996

De esta manera se puede observar que los resultados obtenidos por el software FEM mantienen un rango de error aceptable ( $\pm 5$  %) respecto a los datos reales,

además del error relativo se tiene como parámetro adicional la correlación de Pearson  $r^2$  la cual se mantiene por encima de 0.9 para todos los ensayos.

#### **4.2.7. Caracterización térmica del ladrillo tipo tejuela**

##### **4.2.7.1. Determinación de la transferencia de calor**

En el presente apartado se determina la transferencia de calor, por lo que, se consideraron placas de 0.3x0.3x0.02 m de dimensión, las pruebas se desarrollaron en el laboratorio de suelos de la UTPL. Se toma como base, la metodología aplicada para realización de ensayos mediante elaboración manual de calorímetro y con uso de herramientas como termocupla, termómetro, calibrador para mediciones de temperatura.

Una de las referencias metodológicas es la detallada en el artículo denominado “Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones HV a C/R”<sup>48</sup>, en el que se utiliza como herramienta; el balance térmico sobre un calorímetro diseñado para estimar la conductividad de diferentes materiales, minimizando el efecto sobre el balance térmico del ambiente. También se tiene presente la Ley de Fourier y conducción de calor.

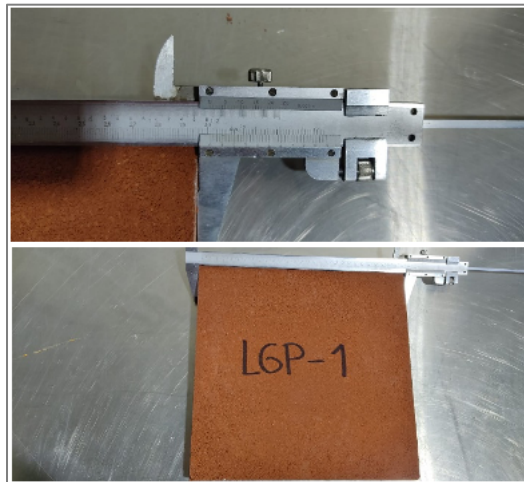
##### **a. Descripción del proceso**

Se procede a medir con el calibrador el ancho, alto y espesor de las placas realizadas tomando 3 medidas para posterior sacar la media y el área total. Los

---

<sup>48</sup> Fonseca Díaz, N., & Tibaquirá, J. E. (2008). Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones HVAC/R. *Scientia Et Technica*, 2(39). <https://doi.org/10.22517/23447214.3185>. el cual presenta el desarrollo experimental implementado para estimar la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en el campo de la refrigeración y el acondicionamiento de aire (HVAC/R)

datos necesarios para realizar los cálculos se darán a partir de los resultados obtenidos en la toma de datos como se indica en la Figura 66.



**Figura 66.** Determinación de medidas de probetas para ensayos de transferencia de calor

Se instala un foco de equivalencia a 60W como fuente de calor en el recinto emisor del calorímetro como se indica en la Figura 67.



**Figura 67.** Instalación de fuente de calor calorímetro para ensayo

Se coloca de forma vertical la placa dentro del calorímetro ubicándola en la ranura central para muestras, como se observa en la Figura 68.

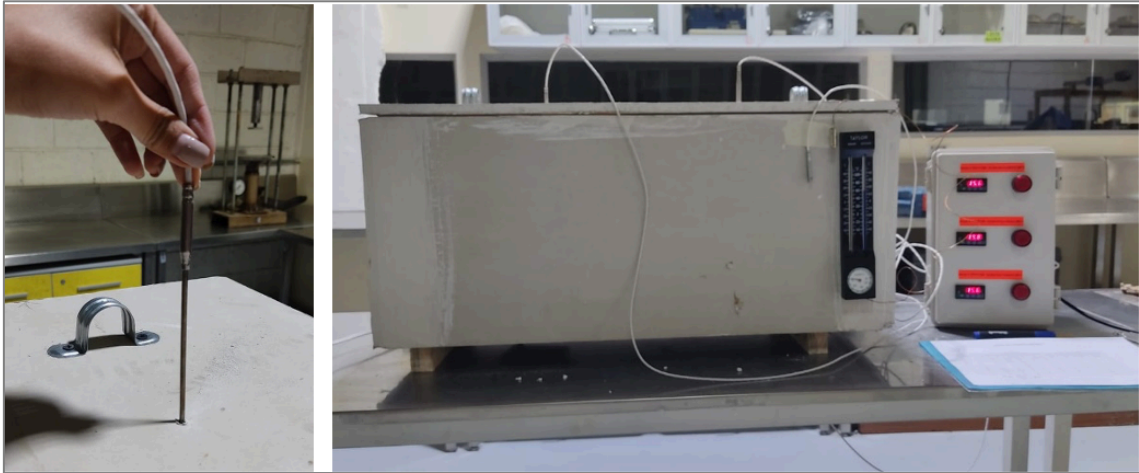


**Figura 68.** Colocación de placa para ensayo de forma vertical en el centro de la caja  
Se procede a encender el foco y se coloca la tapa del calorímetro cerrándolo herméticamente, evitando la fuga de energía como se indica en la Figura 69.



**Figura 69.** Encendido de emisor y sellado de caja (calorímetro) a) encendido de foco en recinto emisor b) colocación de tapa y sellado de calorímetro

Se coloca los sensores de la termocupla en el recinto emisor, receptor y al exterior de la caja. Los datos de temperatura serán analizados en intervalos de 1, 30 y 60 minutos como se indica en la Figura 70.



**Figura 70.** Colocación de sensores de termocupla para toma de datos  
Colocación de sensores en recinto emisor, receptor y exterior. Toma de datos con termocupla en intervalos de 1, 30 y 60 minutos.

#### **b. Resultados del ensayo de transferencia de calor**

Para determinar la experimentación de transferencia del calor<sup>49</sup>, hemos basado este estudio en la ley de la conducción térmica de Fourier, en la que se considera una pared plana de espesor  $e$  y una conductividad térmica media  $\lambda$

$$Q' = \lambda \cdot A \frac{T1 - T2}{e} \qquad Q = Q' \cdot \Delta t$$

$\lambda$ = constante de conductividad térmica (W/m ° K)

A= Área del material (m<sup>2</sup>)

T1= Temperatura del emisor (° C)

T2= Temperatura del receptor (° C)

e= Espesor del material (m)

Q= Transferencia total de calor (W)

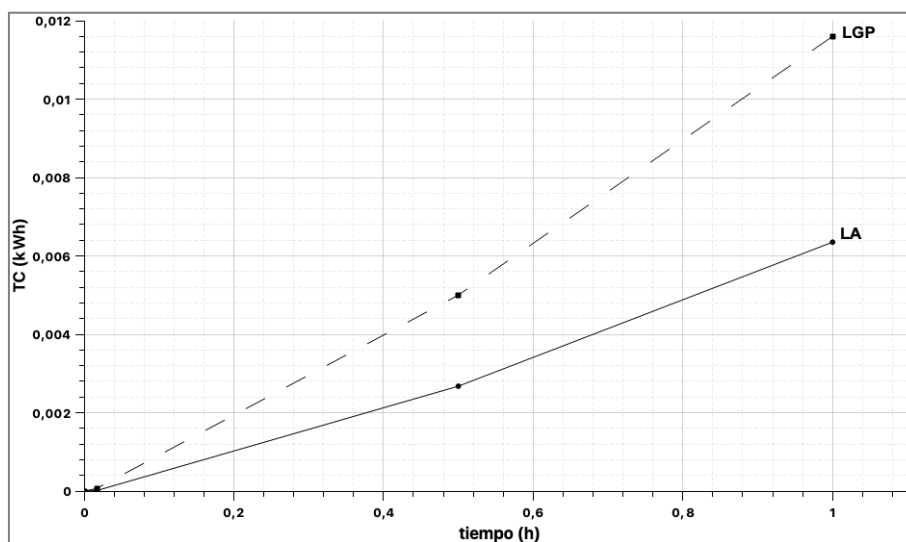
Q'= Índice de trasferencia de calor (W)

$\Delta t$ = Intervalo de tiempo (h)

<sup>49</sup> Revisado en <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ley-de-conduccion-termica-de-fourier-definicion/> , 18/10/2022

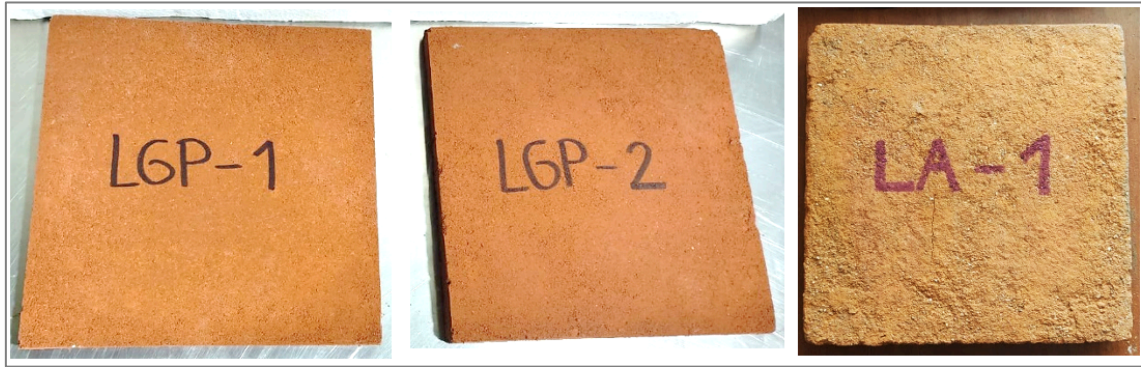
**Tabla 29.** Resultados de ensayo de transferencia de calor

Código de muestra	SE-T1 (°C)	SR-T2 (°C)	TE (°C)	tiempo t (h)	Conductividad $\lambda$ (W/m <sup>2</sup> K)	área del material A (m <sup>2</sup> )	espesor del material e (m)	Índice de transferencia de calor Q' (kW)	Transferencia de calor Q (kWh)
LGP-1	16,70	15,60	16,40	0,017	0,954	0,090	0,020	0,005	0,000
LGP-1	19,00	15,50	15,60	0,500	0,954	0,090	0,020	0,010	0,005
LGP-1	19,80	15,60	15,50	1,000	0,954	0,090	0,020	0,012	0,012
LGP-2	17,40	15,70	15,80	0,017	0,954	0,092	0,021	0,005	0,000
LGP-2	19,40	15,60	15,80	0,500	0,954	0,092	0,021	0,010	0,005
LGP-2	19,90	15,60	15,70	1,000	0,954	0,092	0,021	0,012	0,012
LA-1	19,80	19,40	19,90	0,017	0,800	0,058	0,043	0,000	0,000
LA-1	25,10	19,00	19,40	0,500	0,800	0,058	0,043	0,007	0,003
LA-1	26,10	19,00	19,00	1,000	0,800	0,058	0,043	0,008	0,008
LA-2	20,40	19,40	19,70	0,017	0,800	0,058	0,042	0,001	0,000
LA-2	23,00	19,30	19,40	0,500	0,800	0,058	0,042	0,004	0,002
LA-2	24,00	19,50	19,30	1,000	0,800	0,058	0,042	0,005	0,005

**Figura 71.** Gráfica de transferencia de calor

### c. Probetas utilizadas en los ensayos

Para realizar los ensayos de transferencia de calor se utilizaron las dos placas elaboradas a partir de proceso de geopolimerización y dos placas extras elaboradas en las fábricas de ladrillo de Catamayo para realizar una comparación entre estos dos materiales, las misma que se muestran en la Figura 72.



**Figura 72.** Probetas utilizadas en ensayos de transferencia de calor

a) Placa LGP-1 Cara Frontal

b) Placa LGP-2 Cara Frontal

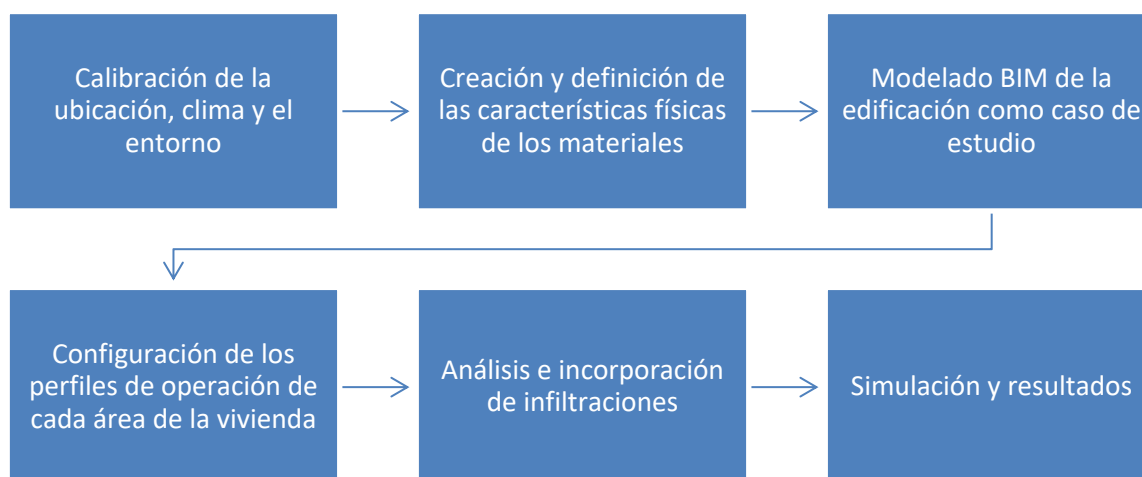
c) Placa LA-1 Cara Frontal

## 5. Discusión

### 5.1. Simulación energética con uso de ladrillo tipo tejuela

#### LTT en fachadas

El presente capítulo analiza el proceso de la obtención de datos del confort térmico interior de las viviendas a través del software EcoDesigner, una extensión del programa BIM de Archicad, creado por Graphisoft. Para ello se desarrollan seis fases:

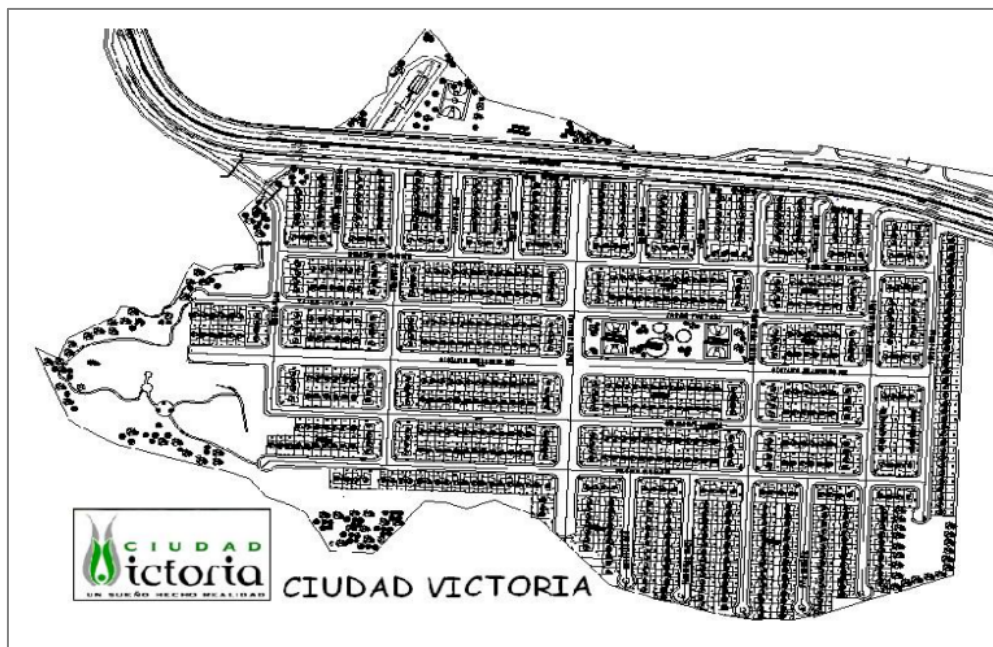


**Figura 73.** Fases para simulación del comportamiento térmico del material recompuesto

El ejercicio de simulación energética con la aplicación del ladrillo tejuela en envolventes arquitectónicas ha sido planteado realizarlo en el barrio “Ciudad Victoria”<sup>50</sup>, que se encuentra ubicado al occidente de la ciudad de Loja en Ecuador,

<sup>50</sup> El proyecto empieza a desarrollarse el 25 de enero del 2006, con una proyección de **852 viviendas** con sus respectivas áreas verdes y comunales, para la adquisición de las viviendas el estado aporta con bonos para la comunidad mediante el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, el cual benefició a más de 192 familias que se inscribieron en el plan habitacional.

en el barrio “Obra Pía Alto”, delimitado al norte con la vía de integración barrial “Ángel Felicísimo Rojas”, al sur con el sector “Menfis Alto”, al este con la vía de integración barrial “Ángel Felicísimo Rojas”; el sector cuenta con un área aproximada de 15.6 hectáreas.



**Figura 74.** Emplazamiento Ciudad Victoria

Fuente: Empresa Pública Municipal de vivienda [Fotografía], Municipio de Loja s/f



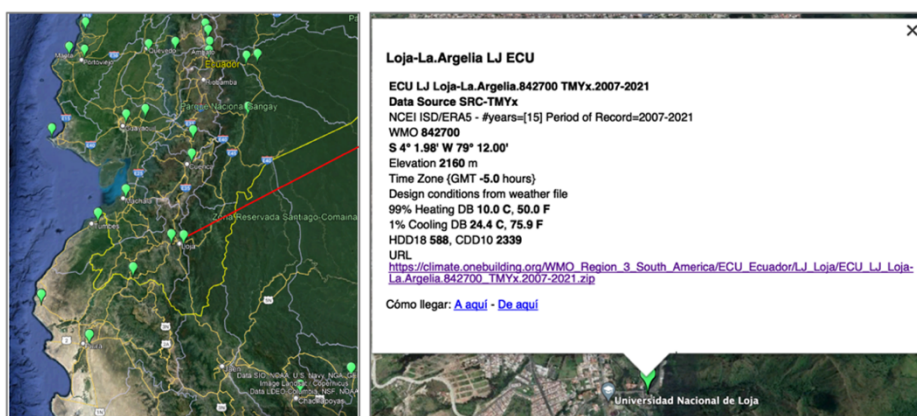
**Figura 75.** Ciudad Victoria. Ciudad de Loja - Ecuador<sup>51</sup>

<sup>51</sup> Empresa Pública Municipal de vivienda [Fotografía Municipio de Loja s/f. <https://bit.ly/3C4h0yR> CC BY 2.0

### 5.1.1. Determinación de zona climática

Teniendo como referencia el apartado 3, de la NEC-HS-EE<sup>52</sup>, la zonificación climático - habitacional la ciudad de Loja se encuentra en la “zona climática 3” denominada “continental lluviosa”<sup>53</sup>.

A partir del método de grados/días<sup>54</sup> y con el archivo climático con los datos obtenidos de la página <http://climate.onebuilding.org/>, en el que se han establecido información de las variables correspondientes a los promedios anuales obtenidos de la estación meteorológica LA ARGELIA LJ ECU<sup>55</sup>, la misma que nos proporciona los siguientes valores:



**Figura 76.** Obtención de datos a partir de Climate One Building<sup>56</sup>

<sup>52</sup> Norma Ecuatoriana de la Construcción. Habitabilidad y Salud. Eficiencia Energética.

<sup>53</sup> Del fichero climático de la ciudad de Loja, obtenido de la estación meteorológica “Loja La Argelia LJ ECU” se determina que los HDD (Grados días de calefacción o Heating Degree Days) tienen un valor de 588 teniendo en cuenta que la temperatura base para calefacción es de 18, mientras que los CDD (Grados días de enfriamiento o Cooling Degree Days) tiene un valor de 2339 con temperatura base de 10°C, considerando la normativa ASHRAE siendo un criterio térmico para la clasificación del clima.

Analizando los datos de HDD 18 y CDD 10 a partir de la estación meteorológica y la tabla 1 de la NEC-HS-EE (pág. 12), se pudo determinar que la ciudad de Loja pertenece a la Zona climática 3, dentro de la zona 3C según la norma ASHRAE 90.1, denominada CONTINENTAL LLUVIOSA, cumpliendo con el criterio térmico de  $CDD_{10^{\circ}C} \leq 2500$  y  $HDD_{18^{\circ}C} \leq 2000$

<sup>54</sup> Nos muestra según la ubicación geográfica si la edificación tiene requerimientos de calefacción o refrigeración, o ambos. Se define además, como la diferencia de temperatura entre la temperatura media del aire exterior durante un periodo de 24 horas y una temperatura base determinada.

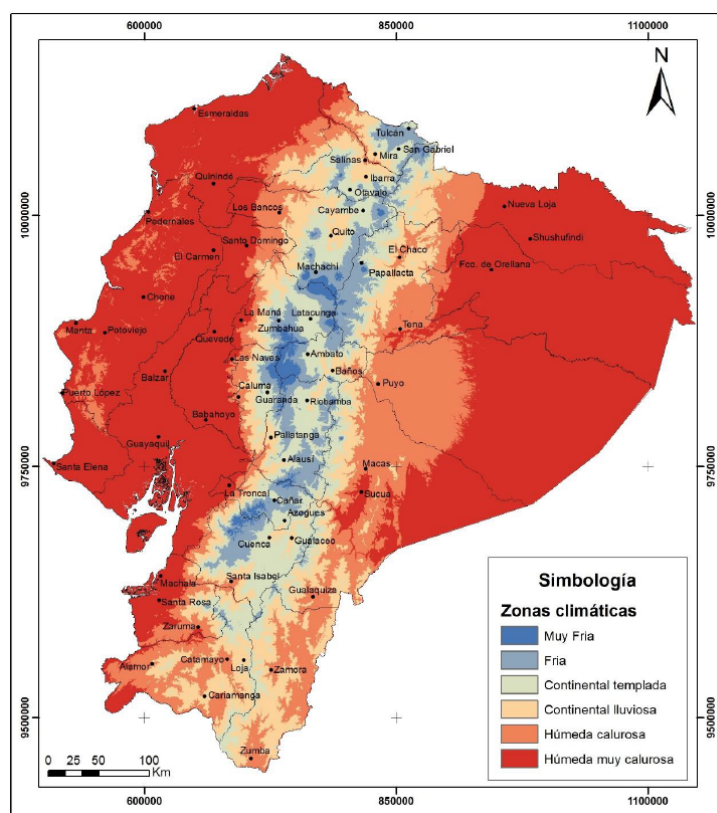
<sup>55</sup> [https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/ECU\\_Ecuador/index.html#IDLJ\\_Loja-](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ECU_Ecuador/index.html#IDLJ_Loja-)

<sup>56</sup> Recuperado de

[https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/ECU\\_Ecuador/LJ\\_Loja/ECU\\_LJ\\_Loja-La.Argelia.842700\\_TMYx.2007-2021.zip](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ECU_Ecuador/LJ_Loja/ECU_LJ_Loja-La.Argelia.842700_TMYx.2007-2021.zip).

**Tabla 30. Referencia para zonificación climática NEC-HS-EE<sup>57</sup>**

Zona climática Ecuador	Zona climática ASHRAE	Nombre	Criterio térmico
1	1 A	Húmeda muy calurosa	5000<CDD10°C
2	2 A	Húmeda calurosa	3500<CDD10°C≤5000
3	3 C	Continental lluviosa	CDD10°C≤2500 y HDD18°C≤2000
4	4 C	Continental templado	2000<HDD18°C≤3000 ←
5	5 C	Fría	CDD10°C≤2500 y HDD18°C≤2000 2000<HDD18°C≤3000 3000M<ALTURA(m)≤5000m
6	6 B	Muy fría	CDD10°C≤2500 y HDD18°C≤2000 2000<HDD18°C≤3000 3000M<ALTURA(m)≤5000m



**Figura 77. Mapa de zonas climáticas en el Ecuador**

Fuente: Recuperado de NEC-HS-EE, p.13

<sup>57</sup> Recuperado de NEC-HS-EE, p.12.

### 5.1.2. Plataformas web y programas complementarios

Al igual que existen diversos programas de simulación, sitios como "Climate One Building"<sup>58</sup> ofrecen acceso a amplias bases de datos climáticos mundialmente. Esta plataforma brinda archivos para la simulación arquitectónica, recabando datos de estaciones meteorológicas públicas y privadas. Destacándose por ajustar sus datos a normativas internacionales como ASHRAE 55-2017, enfocada en las condiciones térmicas ambientales para ocupación humana. Además, interactúa con varios softwares mediante extensiones, siendo el formato EPW, creado por "Energy Plus", esencial para los principales simuladores.

### 5.1.3. Análisis del clima exterior

"Climate Consultant 6" se empleó en esta investigación por su capacidad para simplificar las complejas variables climáticas en gráficas entendibles. Al igual que "EcoDesigner", es compatible con la extensión EPW, pero sus funciones varían. Esta herramienta facilita un análisis detallado de los componentes climáticos del archivo EPW para Loja. Además, se ajusta a cuatro modelos de confort según la normativa ASHRAE, eligiéndose la norma ASHRAE Standard 55 para estudiar el clima continental lluvioso de Ecuador, ya que sus parámetros se alinean con los requisitos de la investigación.

Para determinar las variables del clima de la ciudad de Loja donde se ubicará la vivienda caso de estudio, se utilizaron los ficheros climáticos generados del

---

<sup>58</sup> La plataforma destaca por ofrecer diversas extensiones que clasifican datos climáticos según la necesidad del usuario, incluyendo años individuales (TRY), típicos meteorológicos (TMY) y extremos (XMY). Para esta investigación, se eligió la extensión EPW por su compatibilidad con "EcoDesigner".

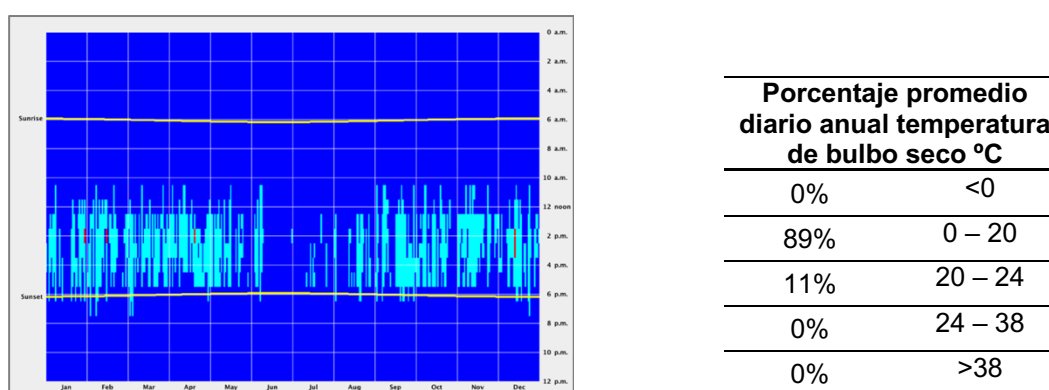
programa “Climate Consultant 6.0”, en el que se considera el modelo de confort adaptativo en ASHRAE Standard 55-2010<sup>59</sup>

A partir de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Location: Loja -La Argelia, LJ, ECU

Latitude/Longitude: 4.033°South 79.2°West, Time Zone from Greenwich -5

Data source: SRC-TMYx 842700WMO Station Number, Elevation 2160m

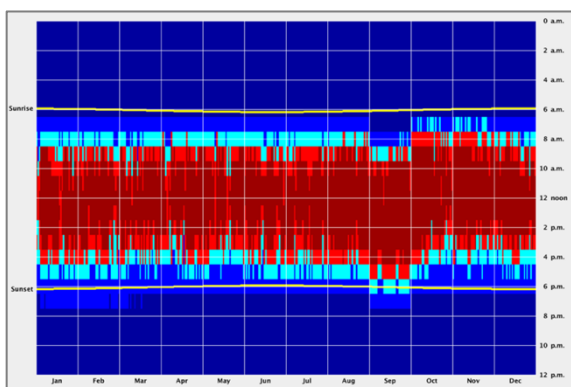


**Figura 78.** Temperatura de bulbo seco del aire por días y horas<sup>60</sup>

En la Figura 78. se puede observar que la **temperatura** correspondiente al confort térmico (20 - 27°C) se presenta entre las 9h45 de la mañana y las 7 de la noche aproximadamente, en un 24% mientras que el resto del día se tienen temperaturas menores a los 20 grados en un valor correspondiente al 76%.

<sup>59</sup> Este modelo es aplicable a espacios con ventilación natural, permitiendo a los ocupantes controlar la apertura de ventanas, lo que hace que su respuesta térmica varíe con el clima exterior y acepte un rango de confort más extenso que los edificios con HVAC centralizado. Presupone que los ocupantes ajustan su vestimenta según las condiciones térmicas y mantienen una actividad sedentaria (1,0 a 1,3 met). Es importante destacar que este modelo excluye la presencia de sistemas de enfriamiento mecánico y no es aplicable si hay calefacción mecánica activa. Además, establece un rango de confort térmico que va desde los 19.9°C como mínimo hasta los 25.5°C como máximo, según el clima.

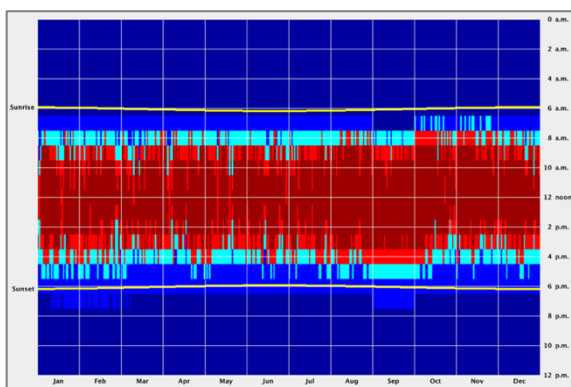
<sup>60</sup> Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0



Porcentaje promedio diario anual radiación global horizontal (Wh/sq.m)	
49%	Noche
11%	4 – 158
9%	158 – 316
9%	316 – 474
22%	>474

**Figura 79.** Radiación global horizontal por días y horas<sup>61</sup>

Al observar la 0, se determina que los valores máximos de radiación global horizontal superan los 474Wh/m<sup>2</sup>, predominando ampliamente de 9 de la mañana a 5 de la tarde durante casi todo el año. En contraste, los valores mínimos, que oscilan entre 4 y 158Wh/m<sup>2</sup>, se registran principalmente en las primeras horas de la mañana y al atardecer.



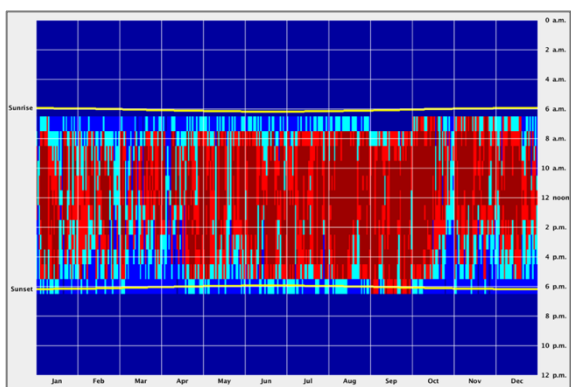
Porcentaje promedio diario anual radiación difusa vertical (Wh/sq.m)	
50%	Noche
12%	4 – 158
8%	158 – 316
8%	316 – 474
22%	>474

**Figura 80.** Radiación difusa vertical por días y horas<sup>62</sup>

La 0 indica que la radiación difusa en una superficie horizontal está influenciada por el índice de claridad del cielo. Según la gráfica, en nuestra ciudad predominan valores superiores a 474Wh/m<sup>2</sup> en un 22% del tiempo, mientras que entre las 6 y 8 de la mañana, se registra consistentemente una radiación de 4 a 158Wh/m<sup>2</sup>, representando el 12%.

<sup>61</sup> Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0

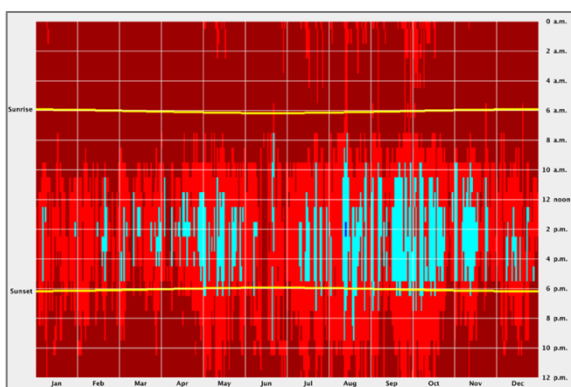
<sup>62</sup> Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0.



Porcentaje promedio diario anual radiación normal directa (Wh/sq.m)	
51%	Noche
8%	4 – 158
10%	158 – 316
13%	316 – 474
18%	>474

**Figura 81.** Radiación directa normal por días y horas<sup>63</sup>

En la Figura 81. los valores más elevados de radiación directa normal se registran en mayo, julio y octubre, superando los 474Wh/m<sup>2</sup>, con una mayor frecuencia en julio, de 9 de la mañana a 6 de la tarde, constituyendo el 21% anual. En contraste, en enero, marzo y mayo se presentan los menores valores de radiación para este parámetro, representando el 12%.



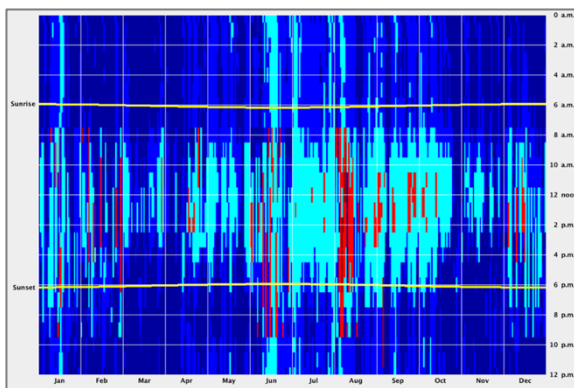
Porcentaje promedio diario anual humedad relativa (%)	
0%	<20
0%	20 – 40
8%	40 – 60
34%	60 – 80
57%	>80

**Figura 82.** Humedad relativa por días y horas<sup>64</sup>

Analizando la Figura 82. en la ciudad de Loja, se registra una humedad relativa (HR) superior al 60% predominantemente entre las 7pm y las 9am, mientras que desde las 9am hasta las 7pm, la HR se mantiene entre el 40% y el 60%.

<sup>63</sup> Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0

<sup>64</sup> Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0



Porcentaje promedio diario anual velocidad de viento (m/s)	
40%	<2
34%	2 – 3
23%	3 – 5
3%	5 – 9
0%	>9

Figura 83. Velocidad del viento por días y horas<sup>65</sup>

Al analizar la 0la velocidad del viento en la ciudad de Loja varía entre 2 y 9 m/s, destacando que los vientos predominantes, con velocidades menores a 2m/s, representan el 54% del total. Los vientos más fuertes, con velocidades superiores a 9 m/s, ocurren principalmente de agosto a septiembre.

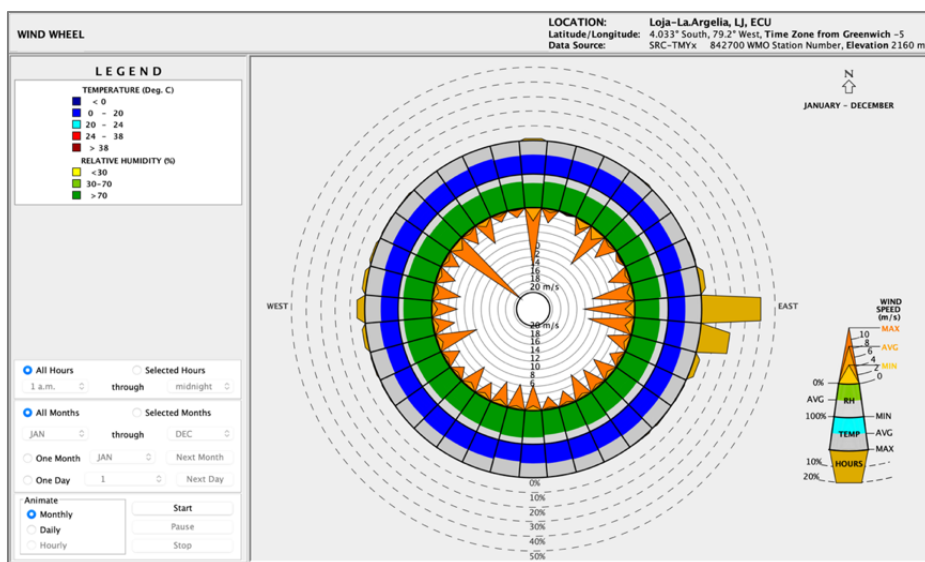


Figura 84. Dirección del viento<sup>66</sup>

En la Figura 84. referente a los **vientos**, se puede determinar que los vientos predominantes en la ciudad de Loja provienen del sureste, alcanzando una velocidad máxima hasta de 14m/s.

Tabla 31. Cuadro resumen del clima de la ciudad de Loja

<sup>65</sup> Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0

<sup>66</sup> Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0

Zona climática Ecuador	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Unidad
Radiación global horizontal*	372	347	414	407	368	356	302	380	420	404	458	400	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación normal directa*	212	154	249	275	270	312	204	309	298	226	319	266	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación difusa*	224	237	240	215	201	160	174	172	224	242	221	215	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación global horizontal**	1049	1075	1077	1045	988	930	963	995	1055	1071	1091	1039	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación normal directa**	1001	998	1011	1008	984	983	994	988	991	985	1053	1019	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación difusa**	538	549	558	532	490	450	458	494	546	567	543	522	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación global horizontal***	4552	4214	4981	4850	4358	4197	3567	4511	5031	4890	5582	4898	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación normal directa***	2592	1872	2995	3275	3194	3683	2412	3668	3577	2736	3899	3262	Wh/m <sup>2</sup>
Radiación difusa***	2745	2881	2895	2563	2385	1885	2053	2051	2691	2927	2697	2638	Wh/m <sup>2</sup>
Iluminación global horizontal*	41274	38102	45280	44837	41338	39798	33943	41940	45970	44115	50230	44414	lux
Iluminación normal directa*	20143	14321	23495	25998	26437	31269	20209	30357	28057	21064	29851	25404	lux
Temperatura de bulbo seco****	14	15	15	14	15	14	14	14	15	15	14	15	°C
Temperatura de punto de rocío****	11	12	12	11	12	11	10	9	12	11	10	12	°C
Humedad relativa****	84	86	83	85	85	81	79	70	80	77	81	82	%
Dirección del viento*****	270	270	90	90	90	90	90	90	90	90	270	270	grados
Velocidad del viento****	1	1	2	1	1	2	3	2	2	1	0	1	m/s
Temperatura piso****	14	14	14	15	15	15	15	15	15	14	14	14	°C

\* Promedio por horas  
 \*\* Máximo por hora  
 \*\*\* Promedio diario total  
 \*\*\*\* Promedio mensual  
 \*\*\*\*\* Modo mensual

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Software Climate Consultant 6,0, en función del archivo ECU\_LJ\_Loja-La.Argelia.842700\_TMYx.2004-2018.epw. Recuperado de [https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/ECU\\_Ecuador/LJ\\_Loja/ECU\\_LJ\\_Loja-La.Argelia.842700\\_TMYx.2007-2021.zip](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ECU_Ecuador/LJ_Loja/ECU_LJ_Loja-La.Argelia.842700_TMYx.2007-2021.zip)

### 5.1.4. Análisis del caso de aplicación

El proyecto incluye 852 viviendas en dos tipologías: Tipología I con 519 viviendas unifamiliares de una planta para 4 personas, y Tipología II con 333 viviendas de dos plantas diseñadas para 5 personas.

### 5.1.4.1. Análisis Tipológico

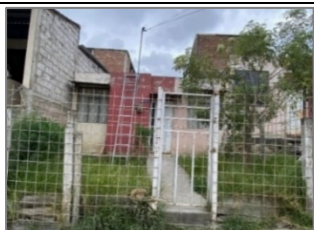
Los prototipos de viviendas comprenden dos tipologías de edificación que se especifican a continuación:

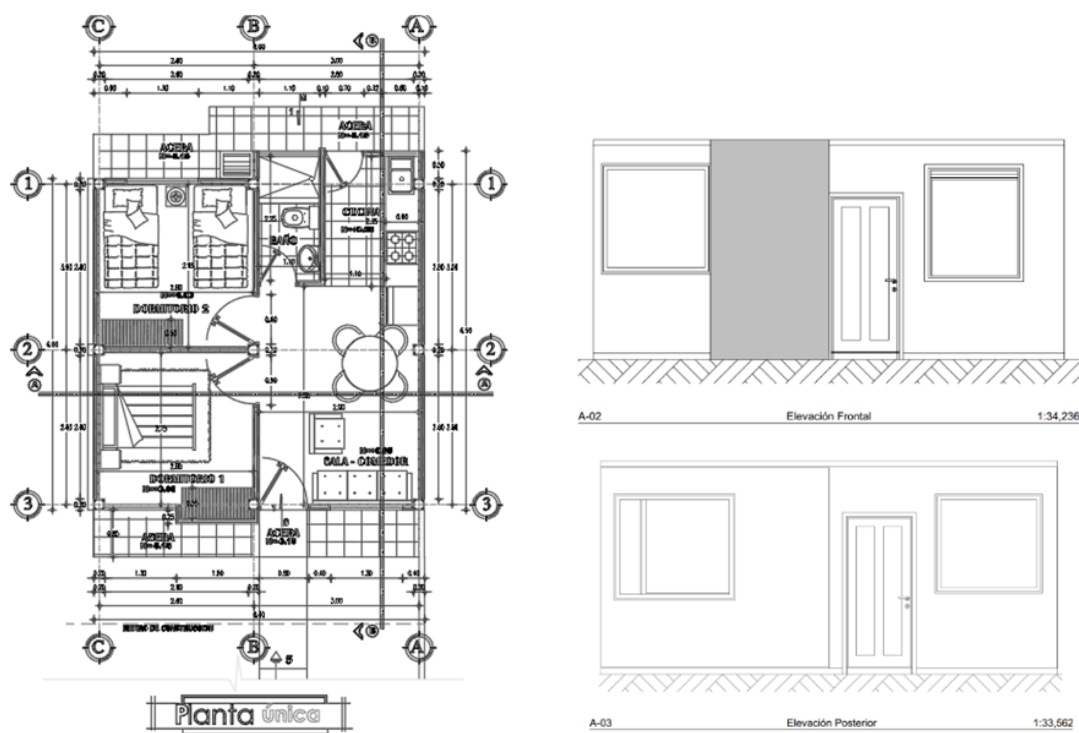
**Tabla 32. Tipología viviendas**

Tipología	Área terreno	Área de construcción	Capacidad
I	90 m <sup>2</sup>	40 m <sup>2</sup>	4 personas

La tipología I, cuenta con un área de construcción de 40 m<sup>2</sup> y se desarrolla en una planta distribuida de la siguiente manera

**Tabla 33. Tipología I**

Tipología i	Distribución de los espacios	Área m <sup>2</sup>
	Sala - Comedor - cocina	14.49
	Baño	1.87
	Dormitorio 1	9.54
	Dormitorio 2	8.20



**Figura 85. Planta Única – Elevación; Tipología I**

Siendo esta tipología con la que se trabajará la aplicación del ladrillo tipo tejuela LTT, y así poder determinar su comportamiento.

### 5.1.4.2. Materialidad

Los paquetes constructivos de la vivienda en análisis se resumen en la Tabla 34. considerando los valores de conductividad térmica valores que fueron tomados de la normativa ecuatoriana de la construcción NEC (2018) y los niveles de infiltración del manual de hermeticidad al aire de edificaciones de Chile<sup>67</sup>.

**Tabla 34.** Paquetes Constructivos. Nivel de infiltración


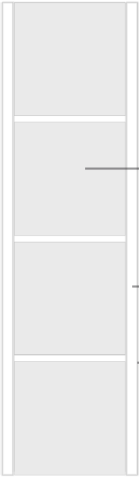
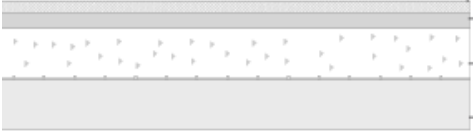
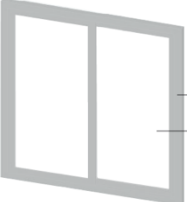

Paquete constructivo	Componentes	Espesor (cm)	Conductividad (W/mk)	Nivel de Infiltración (l/sm <sup>2</sup> )	
Cubierta	Losa de hormigón armado	Hormigón Armado	7	2.3	4,40
Paredes	Bloque de concreto	Enlucido exterior	1	0.5	4.40
		Bloque de concreto	10	0.62	
		Enlucido interior	1	0.72	
Piso	Madera	Madera dura	0.7	0.18	1.10
	Cerámica	Cerámica	0.5	1.75	1.10
Puertas	Metal	Acero	0.03	50	4
		Aire (R0.15m <sup>2</sup> k/w)	0.1		
		Acero	0.03		
		Madera	Roble pintado		
Ventanas	Vidrio simple	Vidrio transparente	0.3	0.9	4

A continuación, se detalla los paquetes constructivos y materiales del estado actual de las viviendas, según la tipología de vivienda.

<sup>67</sup>

[https://construccionsustentable.uc.cl/images/Documentos/Manual\\_de\\_hermeticidad\\_al\\_aire\\_de\\_edificaciones.pdf](https://construccionsustentable.uc.cl/images/Documentos/Manual_de_hermeticidad_al_aire_de_edificaciones.pdf)

**Tabla 35. Materialidad vivienda tipo I, vivienda de un piso**

Elemento	Materiales	Detalles Constructivos
Cubierta	Losa de Hormigón	 <p>Hormigón (7) cm</p>
Paredes	Bloque de Hormigón	 <p>Bloque de Hormigón (40 x 20 x 10) cm</p> <p>Revestido (1) cm</p> <p>Empaste (0.1) cm</p>
Pisos	Cerámica	 <p>Cerámica 40x40 (1) cm</p> <p>Mortero (1) cm</p> <p>Hormigón (8) cm</p> <p>Grava (20) cm</p>
Ventanas	Aluminio y vidrio	 <p>Perfiles de Aluminio</p> <p>Vidrio Simple</p>
Aberturas	Puertas	 <p>Puerta Metálica Accesos principales</p> <p>Puerta de madera Espacios Interiores</p>

### 5.1.5. Simulación por ordenador

El uso de software para estudiar el confort en edificaciones está aumentando significativamente. Comprender su importancia y beneficios en la toma de decisiones es crucial, según Costa-Carrapico [49], la simulación térmica dinámica facilita predicciones a largo plazo sobre el rendimiento térmico de las viviendas, permitiendo anticipar su comportamiento, evaluar estrategias, y determinar su resiliencia al cambio climático y su impacto en el confort térmico.

Es crucial tener en cuenta que la simulación de edificaciones requiere datos específicos. Según Musau et al.[50], Es crucial disponer de datos exactos en tres áreas específicas: primero, información detallada sobre la geometría y estructura del edificio; segundo, datos climáticos y de ubicación de fuentes externas; y, por último, los algoritmos del software, que son fundamentales, aunque estén fuera del control del usuario.

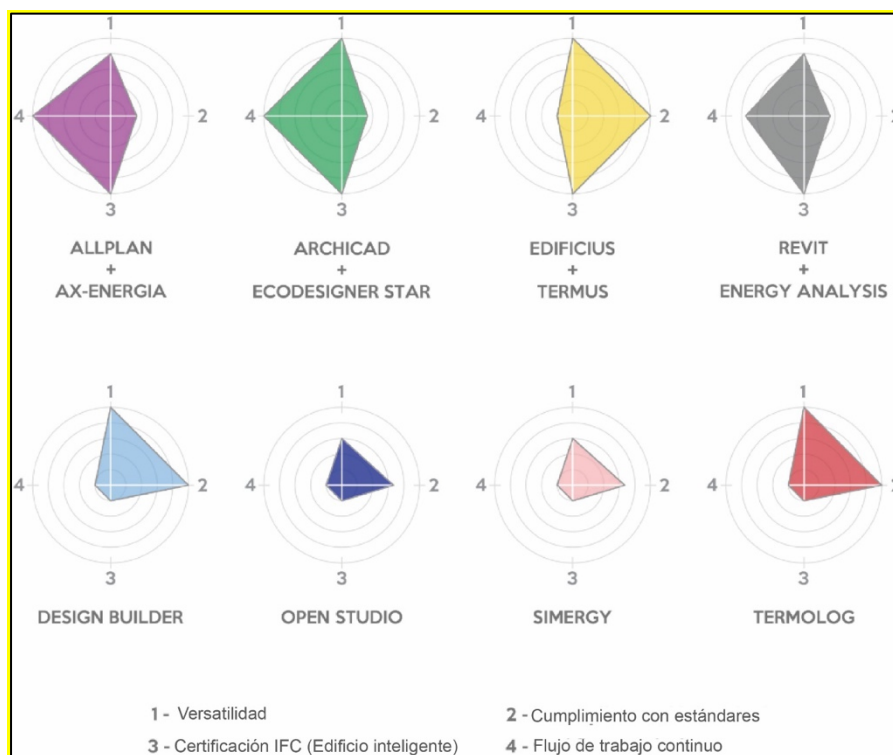
Por tanto, la simulación utiliza datos minuciosamente investigados y verificados para obtener resultados que se asemejan más a la realidad, lo que facilita entender el comportamiento de los edificios y ahorra tiempo y recursos.

Según Aram & Abessi [51], los datos de la simulación por computadora son confiables y precisos, validando su uso en proyectos futuros. Además, esta técnica facilita comparar la eficacia del modelo BIM (Building Information Modeling) en diversos escenarios, incluyendo clima, ubicación y materiales, de manera rápida y eficiente.

Además, Musau & Evans [50] sostienen que, gracias a las herramientas de simulación, muchas edificaciones logran obtener la certificación LEED (Liderazgo

en Energía y Diseño Ambiental), lo que promueve una relación responsable con los recursos en el uso de los edificios.

Actualmente, existe una amplia gama de software en el mercado para simular el comportamiento higrotérmico de las viviendas, disponibles tanto en versiones gratuitas como de pago. Según Bonomolo et al. [52], la calidad de estos programas se evalúa según cuatro características clave: versatilidad, cumplimiento de estándares, soporte para modelos IFC y un flujo de trabajo continuo (Figura 86. ). Estos criterios son fundamentales para determinar la calidad del software, y se llevó a cabo una comparación de los programas más utilizados globalmente para identificar el más adecuado para esta investigación.



**Figura 86.** Comparación de diversas herramientas de simulación

Nota. Adaptado de “Modelado de información de construcción y simulación energética para Diseño arquitectónico”, (p. 11), por Bonomolo et al, 2021, MDPI, 11 (2252).

Después de evaluar los parámetros, se determinó que el programa Archicad + EcoDesigner Star era el mejor calificado para llevar a cabo esta investigación, según Bonomolo [52]. La principal ventaja de EcoDesigner Star, es su versatilidad en términos de velocidad de manejo y la prevención de pérdida de información en las transiciones de BIM<sup>68</sup> (Building Information Modeling) a BEM<sup>69</sup> (Building Energy Modeling). Además, esta herramienta permite un modelado sencillo y la calibración de variables clave, como la ubicación, la caracterización de materiales, el clima y la orientación del edificio.

Además de las herramientas mencionadas, el programa EcoDesigner Star ofrece otros instrumentos que no están incluidos en los paquetes estándar de otros programas. Estos incluyen el cálculo de puentes térmicos, energías renovables y, sobre todo, la capacidad de exportar archivos en varias extensiones, lo que facilita la colaboración con otros programas. Por lo tanto, esta herramienta es perfectamente adecuada para el plan de estudio de esta investigación debido a su excelente desempeño en las interfaces BIM y BEM.

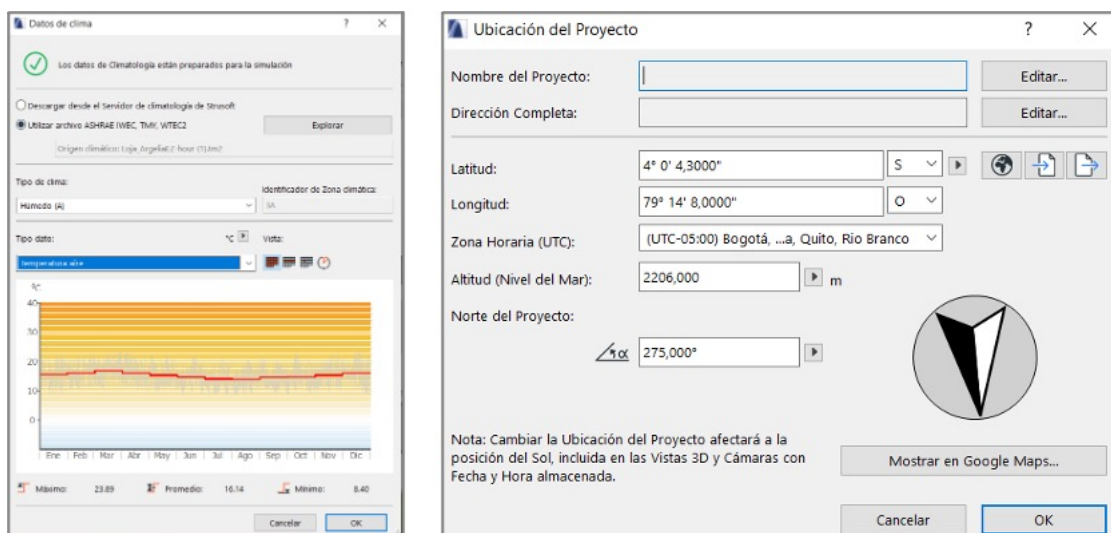
#### **5.1.5.1. Evaluación del rendimiento térmico en la tipología**

El primer paso consiste en configurar el software ingresando el archivo climático seleccionado. Luego, se procede a configurar la ubicación y orientación de las viviendas, y se realiza una verificación utilizando la herramienta Google Maps.

---

<sup>68</sup> es un proceso digital que implica la generación y gestión de representaciones digitales de las características físicas y funcionales de un edificio. BIM se utiliza en el diseño y gestión de proyectos de construcción y proporciona un modelo 3D detallado y preciso que contiene datos ricos sobre cada componente del edificio.

<sup>69</sup> es el proceso de creación de una representación digital del uso de energía en un edificio. Este modelo se utiliza para analizar y predecir el comportamiento energético de un edificio, considerando variables como el diseño, los materiales, los sistemas de calefacción y refrigeración, y la ocupación.



*Figura 87. Configuración Ecodesinger*

### 5.1.5.2. Materiales – Componentes constructivos

Luego, se procede a configurar los diferentes elementos de las viviendas, incluyendo los pisos, paredes interiores y aberturas. En este caso, se utiliza el mismo material para ambos tipos de viviendas. En cuanto a la cubierta, la vivienda de la tipología I se construye con una losa de hormigón de 7 cm de espesor.

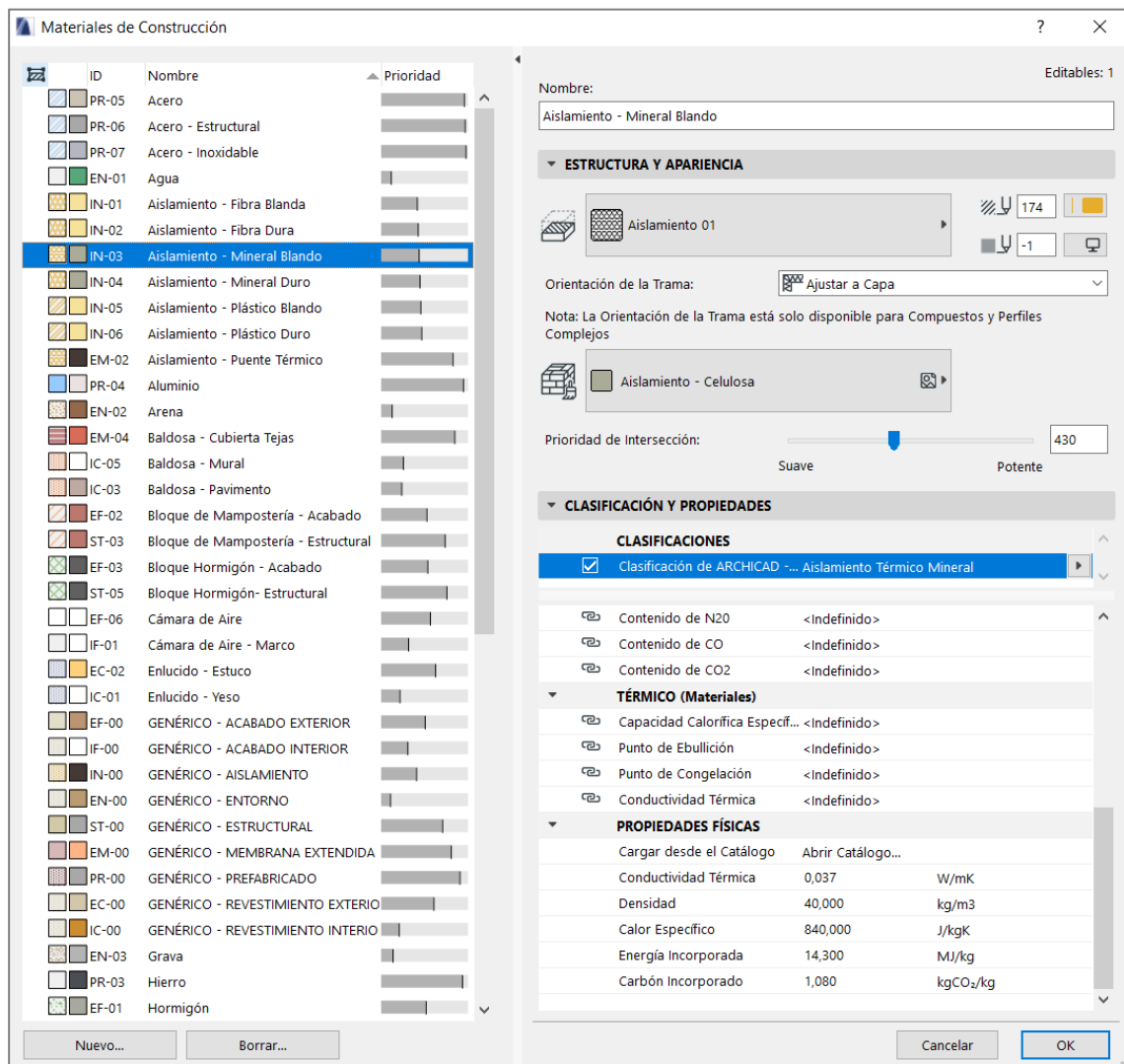
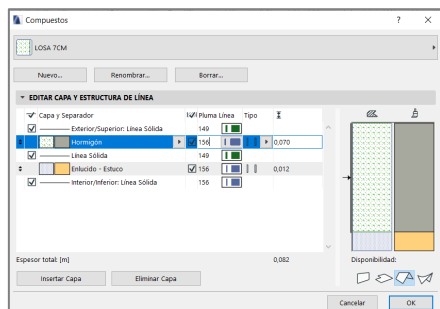


Figura 88. Materiales de construcción

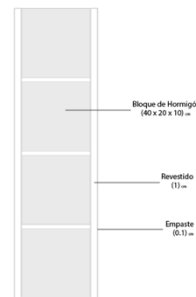
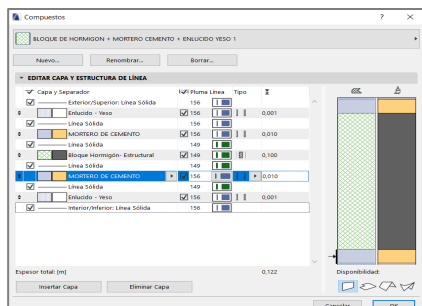
Los valores de conductividad térmica de cada elemento se obtuvieron de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (2018), mientras que los niveles de infiltración se tomaron del manual de hermeticidad al aire de edificaciones de Chile Cite & Decon (2011).

**Tabla 36. Componentes constructivos vivienda tipo I**

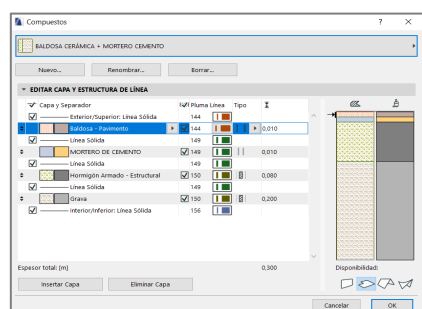
Tipología I			
Cubierta			
Paquete constructivo (cm)	Componentes	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)
Espesor = 0.08 Nivel de Infiltración: 7 (l/sm²)	Losa hormigón Armado	7	1.15
Material Compuesto		Detalle Constructivo	



Paredes			
Paquete constructivo (cm)	Componentes	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)
Espesor = 12,20 Nivel de Infiltración: 4,40 (l/sm²)	Empaste	0.1	0.116
	Revestido	1	0.72
	Bloque de hormigón	10	0.62
	Revestido	1	0.72
	Empaste	0.1	0.116



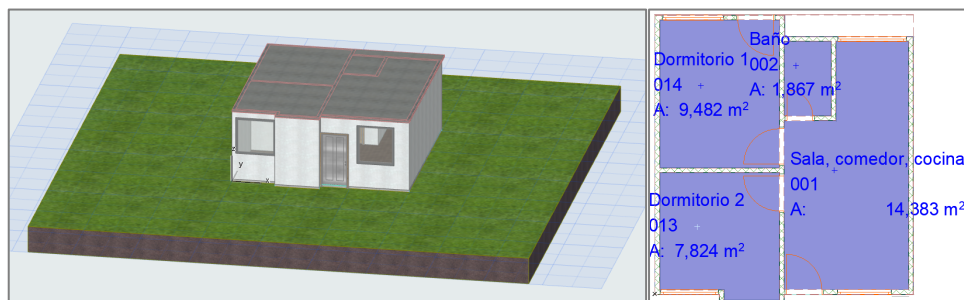
Piso de ceramica			
Paquete constructivo (cm)	Componentes	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)
Espesor = 30 Nivel de Infiltración: 4,40 (l/sm²)	Cerámica	0.7	1.75
	Mortero	0.10	1
	Hormigón	8	2.5
	Mejoramamiento - grava	20	1.4
Material Compuesto		Detalle Constructivo	



Para la tipología I, el nivel de infiltración planteado es de 15 l/sm² para cumplir con la Normativa manual de hermeticidad al aire de edificaciones de Chile Cite & Decon, (2011).

### 5.1.6. Modelado 3d

#### 5.1.6.1. Vivienda Tipo I

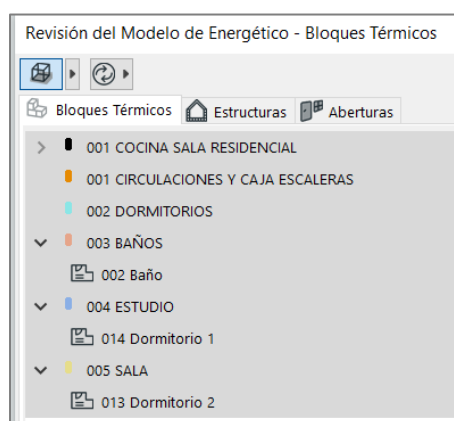


**Figura 89.** Perfiles de operación de vivienda

Se definen perfiles de operación para cada zona según el uso por horas y la ocupación de cada uno de los espacios.

**Tabla 37.** Perfiles de Operación Vivienda Tipo I

Perfiles de operación VIVIENDA TIPO I				
Perfil		Horario uso	Ocupantes	Área total
Dormitorios	Días laborales	20:00 – 24:00	4	17,76
		24:00 – 6:00		
	Fin de semana	24:00 – 8:00	-	
		13:00 – 15:00 18:00 – 24:00		
Vacaciones	Sin uso	-		
Sala- Comedor- Cocina	Días laborales	07:00 – 8:00	2	14,383
	Fin de semana	18:00 – 22:00		
	Vacaciones	Sin uso	-	
Baño	Días laborales	06:00 – 8:00	1	1,87
		19:00 – 21:00		
	Fin de semana	06:00 – 8:00	-	
		19:00 – 21:00		
Vacaciones	Sin uso	-		



**Figura 90.** Bloques Térmicos Vivienda Tipo I

### 5.1.7. Configuración simulación

Se evalúan errores en estructuras y aberturas, determinando la materialidad de los perfiles de ventanas, el tipo de vidrio, y la protección, fijada en 40% por las cortinas de tela. También se establece el horario de apertura de ventanas del 1 de septiembre al 31 de julio, de 14:00 a 15:00 p.m., ajustándose al modelado para altos niveles de infiltración, típicos en construcciones ecuatorianas.

Se simulan las viviendas, ajustando los resultados a las fechas de picos de temperatura por zona, según los informes de simulación. Esto permite verificar el cumplimiento con los rangos de confort de la Normativa de Loja, que estipula temperaturas entre 18°C y 25°C. Definidos estos parámetros, se ejecuta la simulación, obteniéndose los resultados pertinentes.

#### 5.1.7.1. Vivienda tipo I. Caso base

Evaluación del Rendimiento Energético				
[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]				
Valores Clave				
<b>Datos generales del proyecto</b>		<b>Coefficientes de transfer.</b> Valor U [W/m²K]		
Nombre Proyecto:	VIVIENDA TI...	Promedio Edificio Entero:	3,59	
Ubicación Ciudad:		Pavimentos:	2,83 - 2,83	
Latitud:	4° 0' 4" S	Externo:	2,90 - 4,59	
Longitud:	79° 14' 8" O	Subterráneo:	--	
Altitud:	2206,00 m	Aberturas:	2,11 - 7,09	
Origen de Datos Climáticos:	Loja_A...(1).tm2	<b>Valores Anuales Específicos</b>		
Fecha de Evaluación:	23/2/2023 20:10	Energía calorífica Neta:	1,58	kWh/m²a
<b>Datos de geometría del edificio</b>		Energía refrigerante Neta:	0,00	kWh/m²a
Área bruta de la planta:	97,61 m²	Energía Neta Total:	1,58	kWh/m²a
Área de Suelo Tratado:	88,56 m²	Consumo de Energía:	220,42	kWh/m²a
Área del Envoltente Exterior:	266,38 m²	Consumo de Combustible:	220,42	kWh/m²a
Volumen ventilado:	237,61 m³	Energía Primaria:	442,67	kWh/m²a
Ratio acristalamiento:	2 %	Coste Combustible:	14,44	USD/m²a
<b>Datos de rendimiento de la estructura</b>		Emisión CO <sub>2</sub> :	43,05	kg/m²a
Infiltración a 50Pa:	15,25 AAH	<b>Días-Grado</b>		
		Calefacción (HDD):	1069,75	
		Refrigeración (CDD):	2189,40	

Figura 91. Evaluación del Rendimiento Energético Vivienda Tipo I

### **5.1.7.2. Diagnóstico temperatura interna de los espacios “Vivienda Tipo I”**

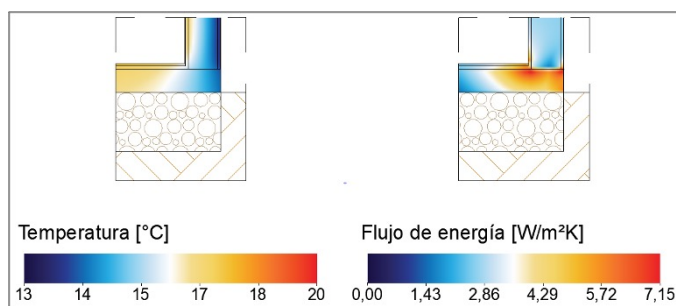
En días fríos, entre las 24H00 y las 12H00, los dormitorios registran bajas temperaturas, descendiendo hasta 10.6°C. Desde las 12H00, las temperaturas ascienden, manteniéndose en el rango de confort hasta las 15H00, cuando se experimenta un sobrecalentamiento hasta 27.2°C. Posteriormente, a partir de las 20H00, la temperatura disminuye, retornando al rango de confort hasta la medianoche.

Durante días calurosos, de 24H00 a 03H00, las temperaturas en los dormitorios se mantienen dentro del rango de confort. Desde las 03H00, comienzan a descender, llegando a 16°C a las 10H00, fuera del rango de confort. A partir de las 10H00, las temperaturas se elevan, alcanzando un sobrecalentamiento de hasta 30°C, que persiste hasta las 24H00.

En días fríos, la sala-comedor y la cocina registran temperaturas bajas de 01H00 a 12H00, luego se ajustan al rango de confort hasta las 14H00. Posteriormente, desde las 14H00 hasta las 21H00, las temperaturas se elevan, alcanzando un sobrecalentamiento de hasta 30°C, antes de descender y volver al rango de confort hasta la 01H30. En días calurosos, estas áreas mantienen temperaturas adecuadas de 24H00 a 4H00, ajustándose al rango de confort. Sin embargo, de 4H00 a 10H00, las temperaturas descienden a 17°C, fuera del rango de confort, para luego aumentar y mantenerse dentro del rango hasta las 12H30. A partir de ahí, se experimenta un sobrecalentamiento de hasta 37°C que persiste hasta las 24H00.

### 5.1.7.3. Comportamiento de la envolvente frente a las condiciones exteriores

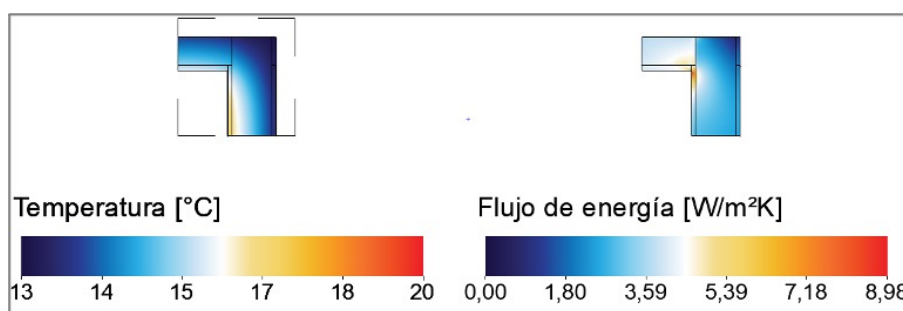
A continuación, se proporciona información sobre el desempeño de la envolvente de la vivienda en relación con las condiciones climáticas del entorno. Se estableció una temperatura promedio de 13°C para el exterior y 20°C para los espacios internos.



**Figura 92.** Detalle Unión Pared - Piso Tipología I

Flujo de Temperatura: en la unión de la pared con el piso se puede determinar que existe pérdida de calor por medio de la pared y piso.

Flujo de Energía: la debilidad térmica se encuentra en el contrapiso, elemento por donde ingresa la temperatura fría del exterior.



**Figura 93.** Detalle Unión Pared - Cubierta Tipología I

Flujo de Temperatura: en la unión de la losa de 7 cm de cubierta y la pared de bloque de hormigón se determinó que existe pérdida de calor por medio de ambos componentes.

Flujo de Energía: ambos elementos permiten el paso de la temperatura del exterior.

### 5.1.8. Requerimientos de la envolvente de la edificación

Según la Normativa Ecuatoriana de Construcción, Habitabilidad y Salud NEC-HS\_EE, y tomando en cuenta la zona climática específica de las viviendas, es crucial cumplir con ciertos requisitos para garantizar la habitabilidad y confort en la envolvente del edificio. Estos criterios mínimos, que varían según la zona climática, se enfocan en los materiales y componentes de la envolvente para optimizar el rendimiento térmico en los espacios residenciales. La ciudad de Loja se clasifica dentro de la Zona Climática 3, lo que determina los estándares específicos a seguir para este propósito.

Elementos opacos	Habitable				No habitable	
	Climatizado		No climatizado		Montaje máximo	Valor Min. R de aislamiento
	Montaje máximo	Valor Min. R de aislamiento	Montaje máximo	Valor Min. R de aislamiento		
<b>Techos</b>	U-0.273	R-3.5	U-2.9	R-0.89	U-4.7	R-0.21
<b>Paredes, sobre nivel del terreno</b>	U-0.592	R-1.7	U-2.35	R-0.36	U-5.46	NA
<b>Paredes, bajo nivel de terreno</b>	C-6.473	NA	C-6.473	NA	C-6.473	NA
<b>Pisos</b>	U-0.496	R-1.5	U-3.2	R-0.31	U-3.4	NA
<b>Puertas opacas</b>	U-2.839	NA	U-2.6			
<b>Ventanas</b>	<i>Transmitancia máxima</i>	<i>Montaje máximo SHGC</i>	<i>Transmitancia máxima</i>	<i>Montaje máximo SHGC</i>	<i>Transmitancia máxima</i>	<i>Montaje máximo SHGC</i>
<b>Vidriado vertical <math>\geq 45^\circ</math></b>	U-3.69	SHGC-0.25	U-5.78	SHGC-0.82	U-6.81	NA
<b>Vidriado horizontal <math>&lt; 45^\circ</math></b>	U-6.64	SHGC-0.36	U-6.64	SHGC-0.36	U-11.24	NA

**Figura 94.** Requisitos Envolvente Zona Climática 3

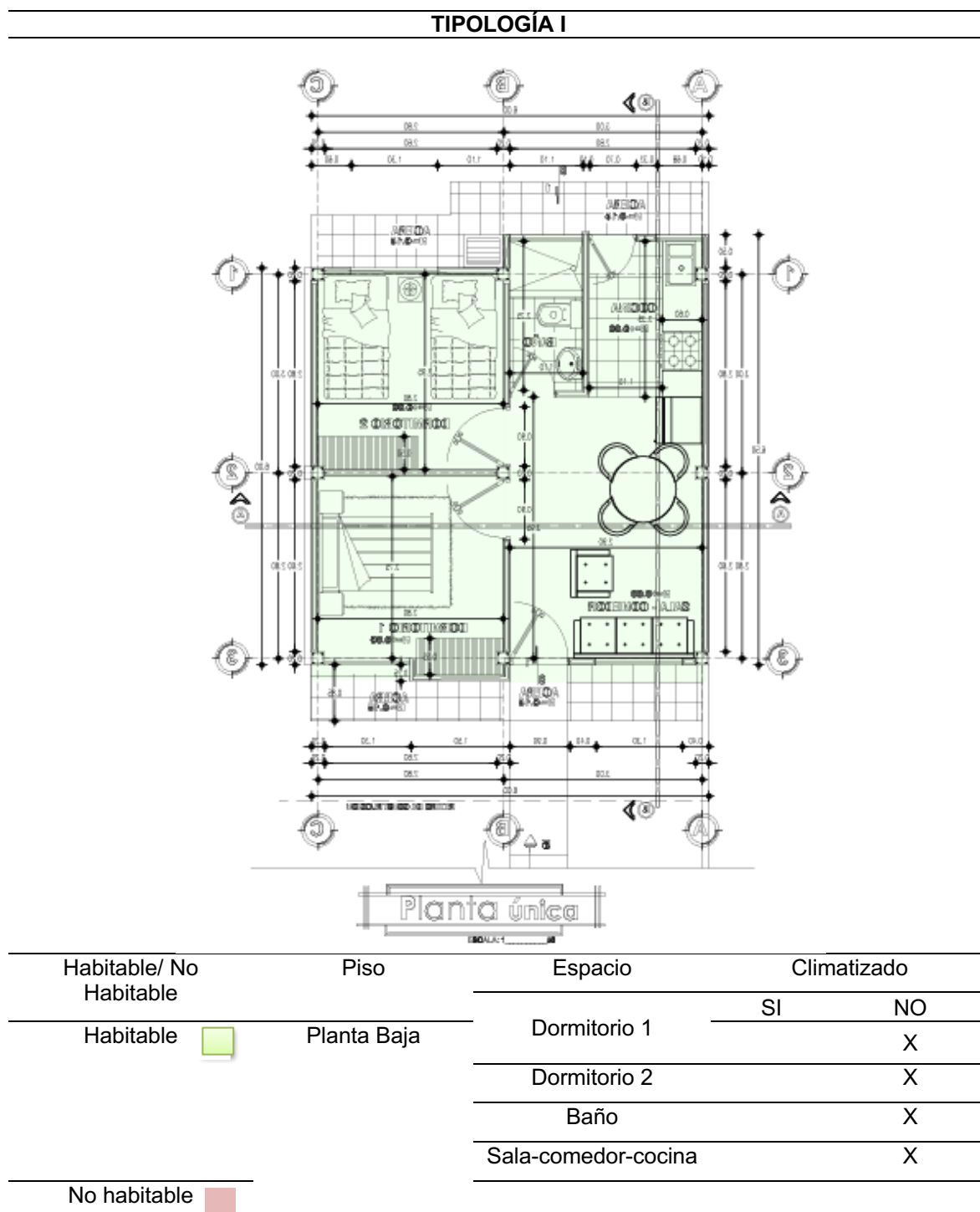
Los requisitos se basan en el cumplimiento de valores de transmitancia térmica (U) que deben cumplir los paquetes constructivos que conforman la envolvente de la edificación.

### 5.1.9. Verificación Cumplimiento NEC-HS\_EE

Para verificar el cumplimiento de la envolvente con los estándares de la norma NEC-HS\_EE, es esencial diferenciar entre zonas habitables y no habitables de la

vivienda. Posteriormente, se debe examinar los sistemas constructivos de la envolvente, incluyendo sus componentes y propiedades térmicas específicas. El propósito de este análisis es confirmar si las viviendas satisfacen los criterios establecidos por la normativa.

**Tabla 38. Zonas Habitables Vivienda Tipología I**



A continuación, se detallará los componentes de cada paquete constructivo de la envolvente, con sus características descriptivas.

### 5.1.10. Paquetes constructivos y propiedades térmicas

**Tabla 39.** Paquete Constructivo Vivienda Tipo I

Paquete constructivo	Componentes	Espesor (cm)	Conductividad (W/m <sup>2</sup> K)	Valor actual U (W/m <sup>2</sup> K)	Valor U referido (W/m <sup>2</sup> K)	Cumplimiento NEC
Techos espacios habitables – no climatizados	Ho. Armado	7.0cm	2.3	4.7	2.35	NO CUMPLE
	enlucido	1.2cm	0.81			
Paredes espacios habitables – no climatizados – sobre nivel de terreno	enlucido	1.0cm	0.116	2.89	2.90	CUMPLE
	bloque de concreto	10cm	0.62			
	enlucido	1.0cm	0.116			
Pisos espacios habitables – no climatizados	cerámica	0.7cm	1.75	2.82	3.2	CUMPLE
	contrapiso	8cm	2.50			

En la Tabla 39. se puede apreciar que los elementos constructivos de la vivienda Tipo I, como las paredes y los pisos, cumplen con los requisitos establecidos por la norma NEC en términos de transmitancia térmica (U) de los componentes de la envolvente. Sin embargo, se observa que las cubiertas no cumplen con los estándares establecidos por la normativa.

#### 5.1.10.1. Porcentaje de superficie acristalada en relación con el muro neto

Para asegurar que la construcción cumple con la normativa NEC-HS\_EE, se verifica que las ventanas, ubicadas en las fachadas frontal y posterior y hechas de perfiles de aluminio natural con vidrio claro de 4 mm, no superen el 40% del área neta de la fachada. A continuación, presentamos una tabla de cálculo del área acristalada:

**Tabla 40.** Porcentaje de Superficie Acristalada - Muro Neto Vivienda Tipo I


Elevación	Área total fachada (m <sup>2</sup> )	Área de superficie acristalada (m <sup>2</sup> )	Porcentaje de superficie acristalada (%)	Cumplimiento de la NEC – HS - EE
Elevación Frontal	15.12	3.29	27.1%	SI CUMPLE
Elevación Posterior	12.12	3.58	23.6%	SI CUMPLE

Se determina que la vivienda cumple los requerimientos de la normativa NEC-HS\_EE en cuanto a las superficies acristaladas.

### 5.1.11. Sensación térmica de los usuarios

Las entrevistas con residentes del sector revelaron que, en general, las viviendas, especialmente las de un solo piso, registran una sensación térmica de temperaturas promedio más bajas de lo deseado.

**Tabla 41.** Sensación térmica de los usuarios

Sensación térmica - usuarios		
Tipología	Horario	Temperatura
	Día	frío
	Noche	

### 5.1.12. Análisis del confort higrotérmico

El análisis del confort higrotérmico revela que las viviendas no alcanzan las temperaturas óptimas para el confort, causando incomodidad por los fluctuantes cambios térmicos. Estos se deben al uso de materiales de alta transmitancia térmica tanto en la envolvente exterior como interior, afectando la regulación de

temperaturas y resultando en pérdida de calor en invierno y ganancia excesiva en verano. En particular, las viviendas Tipo I enfrentan problemas por usar cerámica en pisos, material que enfría el ambiente y resulta inapropiado para “Ciudad Victoria”, recomendándose en su lugar madera o parquet para conservar el calor.

**Tabla 42.** Análisis higrotérmico. Resultados

Zona	Temperaturas °C (25°-18°C)			Cumplimiento
	Promedio	Máxima	Mínima	
Dormitorios	21.47	25.46	13.05	NO CUMPLE
Sala comedor cocina	23.09	34.08	14.40	NO CUMPLE

Elementos opacos	Habitable				No habitable	
	Climatizado		No climatizado		Montaje máximo	Valor Min. R de aislamiento
	Montaje máximo	Valor Min. R de aislamiento	Montaje máximo	Valor Min. R de aislamiento		
<b>Techos</b>	U-0.273	R-3.5	U-2.9	R-0.89	U-4.7	R-0.21
<b>Paredes, sobre nivel del terreno</b>	U-0.592	R-1.7	U-2.35	R-0.36	U-5.46	NA
<b>Paredes, bajo nivel de terreno</b>	C-6.473	NA	C-6.473	NA	C-6.473	NA
<b>Pisos</b>	U-0.496	R-1.5	U-3.2	R-0.31	U-3.4	NA
<b>Puertas opacas</b>	U-2.839	NA	U-2.6			
<b>Ventanas</b>	<i>Transmitancia máxima</i>	<i>Montaje máximo SHGC</i>	<i>Transmitancia máxima</i>	<i>Montaje máximo SHGC</i>	<i>Transmitancia máxima</i>	<i>Montaje máximo SHGC</i>
<b>Vidriado vertical ≥45°</b>	U-3.69	SHGC-0.25	U-5.78	SHGC-0.82	U-6.81	NA
<b>Vidriado horizontal &lt;45°</b>	U-6.64	SHGC-0.36	U-6.64	SHGC-0.36	U-11.24	NA

**Figura 95.** Requisitos de Envoltente Zona Climática 3

El análisis respecto a la Normativa NEC-HS-EE indica que la vivienda no satisface los requisitos del piso climático 3, afectando la habitabilidad y el confort. Los problemas detectados se asocian a los materiales usados en interiores y en la envoltente del edificio. Se sugiere adoptar estrategias enfocadas en mejorar estos materiales constructivos para elevar la calidad de los espacios internos.

**Tabla 43.** Valores de cumplimiento para envoltente de la edificación según normativa NEC-HS-EE

Envoltante de la edificación - Vivienda Tipo I				
Tipología	Componente	Valor U actual (W/m <sup>2</sup> K)	Valor U requerido (W/m <sup>2</sup> K)	Cumplimiento
Cubierta	losa de hormigón 7cm	4.7	2.35	NO CUMPLE
Paredes	bloque de hormigón	2.89	2.90	CUMPLE
Entrepiso	cerámica	2.82	3.20	CUMPLE

### 5.1.13. Aplicación

La propuesta para mejorar la vivienda incorpora criterios de diseño residencial específicos para Loja, centrados en la mejora de la materialidad de los componentes constructivos como sigue:

- **Paredes:** Se recomienda instalar fachaletas de ladrillo geopolimerizado de 2 a 4 cm de grosor, elegidas por su eficacia en mantener un equilibrio térmico interior respecto al exterior, además de su capacidad para acondicionar adecuadamente las viviendas.
- **Piso:** Para combatir las bajas temperaturas en los dormitorios, se aconseja reemplazar el material del piso actual por piso flotante. Este material es capaz de retener la ganancia solar durante el día en invierno, liberando calor, y de permanecer fresco durante la noche en verano, contribuyendo a la regulación de la temperatura en los dormitorios.

A continuación, se especifican los paquetes constructivos recomendados para cada elemento de la vivienda.

**Tabla 44.** Materialidad Propuesta - Vivienda tipo I

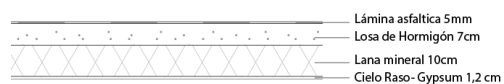
Propuesta Tipología I

Cubierta

Paquete constructivo (cm)	Componentes	espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)
espesor = 18,7	chova	0.5	0.17
	losa hormigón armado	7	1.15
	lana mineral	10	0.04
	cielo raso gypsum	1.2	0.57

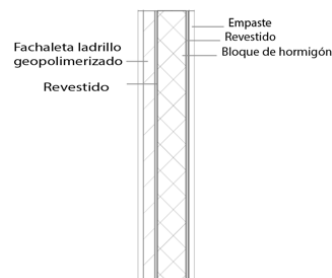
Material Compuesto

Detalle Constructivo



Paredes

Paquete constructivo (cm)	Componentes	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)
espesor = 16.1	fachaleta ladrillo geopolimerizado	4	0.954
	revestido	1	0.72
	bloque	10	0.62
	revestido	1	0.72
	Empaste	0.1	0.116

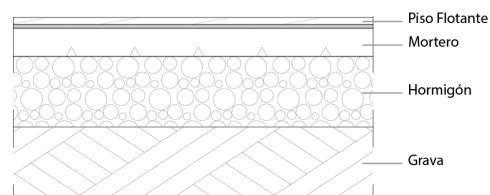
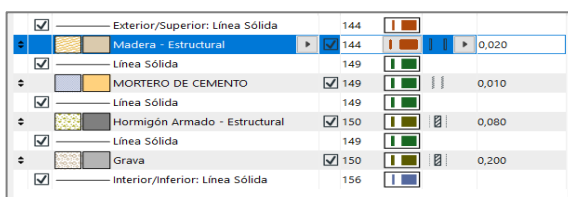


Piso flotante

Paquete constructivo (cm)	Componentes	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)
espesor = 31	piso flotante	2	0.18
	mortero	1	1
	hormigón	8	2.5
	mejoramiento - grava	20	1.4

Material Compuesto

Detalle Constructivo



### 5.1.14. Simulación térmica “Propuesta Vivienda Tipo I”

Evaluación del Rendimiento Energético				
[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]				
Valores Clave				
<b>Datos generales del proyecto</b>		<b>Coefficientes de transfer.</b>	Valor U	[W/m²K]
Nombre Proyecto:	APLICACIO...	Promedio Edificio Entero:	2,22	
Ubicación Ciudad:		Pavimentos:	2,83 - 2,83	
Latitud:	4° 0' 4" S	Externo:	0,64 - 2,90	
Longitud:	79° 14' 8" O	Subterráneo:	--	
Altitud:	2206,00 m	Aberturas:	2,11 - 6,28	
Origen de Datos Climáticos:	Loja_...1).tm2			
Fecha de Evaluación:	26/2/2023 1:07			
<b>Datos de geometría del edificio</b>		<b>Valores Anuales Específicos</b>		
Área bruta de la planta:	97,60 m²	Energía calorífica Neta:	0,17	kWh/m²a
Área de Suelo Tratado:	88,22 m²	Energía refrigerante Neta:	0,00	kWh/m²a
Área del Envolverte Exterior:	265,92 m²	Energía Neta Total:	0,17	kWh/m²a
Volumen ventilado:	236,73 m³	Consumo de Energía:	218,38	kWh/m²a
Ratio acristalamiento:	2 %	Consumo de Combustible:	218,38	kWh/m²a
		Energía Primaria:	440,73	kWh/m²a
		Coste Combustible:	14,43	USD/m²a
		Emisión CO <sub>2</sub> :	42,43	kg/m²a
<b>Datos de rendimiento de la estructura</b>		<b>Días-Grado</b>		
Infiltración a 50Pa:	16,06	AAH		
		Calefacción (HDD):	1069,75	
		Refrigeración (CDD):	2189,40	

Figura 96. Evaluación del Rendimiento Energético Propuesta- Vivienda tipo I

#### 5.1.14.1. Diagnóstico temperatura interna de los espacios Tipología I

##### – Propuesta

El cumplimiento de la NEC está establecido en función de la franja para clima continental lluvioso (zona 3) de 18° a 25°, que para el caso específico de la ciudad de Loja se lo determina en función del cálculo de la zona de confort, en función de la temperatura neutra u óptima, mediante la fórmula:

$$Zc = Tn \pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Tn = 17.6 + 0,31 Tm$$

Además, por los estudios de Szokolay<sup>70</sup> y Auliciems, se define que el rango de confort para el caso de la ciudad de Loja está entre 20°C y los 25°C.

Tabla 45. Registro de temperaturas actual - propuesta tipología I

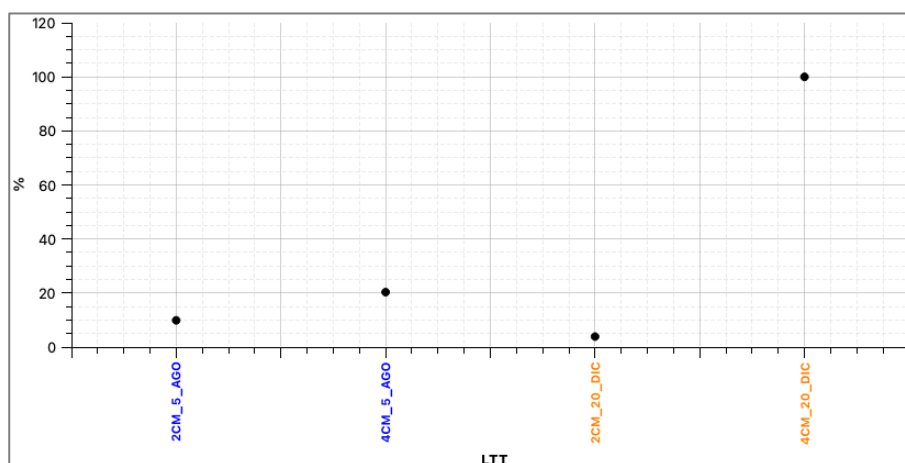
<sup>70</sup> Szokolay, Steven. “Passive and low energy design for thermal and visual comfort” Passive and low Energy Ecotechniques Applied to housing (PLEA’84) Pergamon Press, New York, U.S. 1984. Adaptado de Fuentes, Armando, Arquitectura Bioclimática, UAM,

Registro de temperaturas					
		Actual		Propuesta	
		Cocina - Sala	Cumplimiento (20°-25°C)	Cocina - Sala	Cumplimiento (20°-25°C)
Días Fríos	Temperatura Promedio	20.5°	Cumple	17.5°	No cumple
	Temperatura Máxima	30.7°	No Cumple	23.1°	Cumple
	Temperatura Mínima	12.1°	No cumple	12.9°	No cumple
Días de calor	Temperatura Promedio	25.7°	No Cumple	24.7°	Cumple
	Temperatura Máxima	37.4°	No cumple	34.0°	No cumple
	Temperatura Mínima	16.7°	No Cumple	18.4°	Cumple
		Actual		Propuesta	
		Dormitorios		Dormitorios	
Días Fríos	Temperatura Promedio	18.4°	Cumple	17.5°	No cumple
	Temperatura Máxima	27.2°	No Cumple	22.4°	Cumple
	Temperatura Mínima	10.6°	No cumple	13.0°	No Cumple
Días de calor	Temperatura Promedio	24.5°	Cumple	22.0°	Cumple
	Temperatura Máxima	34.04°	No cumple	24.9°	Cumple
	Temperatura Mínima	15.5°	No Cumple	18.6°	Cumple

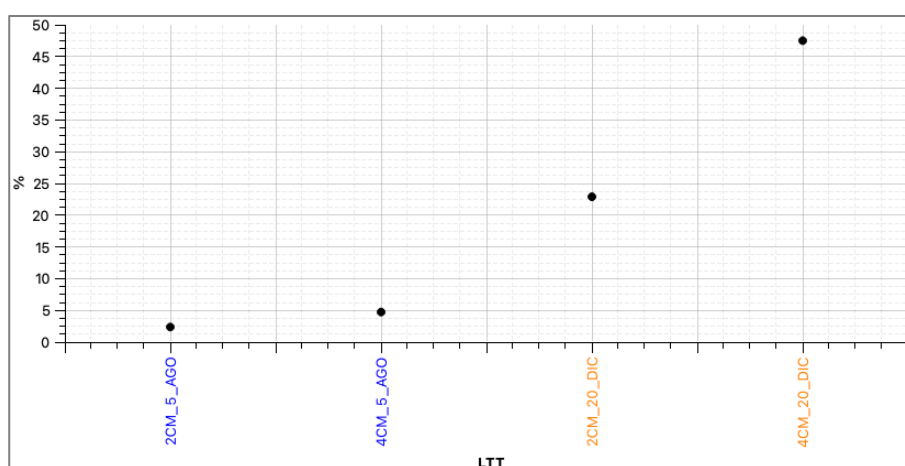
### 5.1.15. Verificación Cumplimiento NEC:

**Tabla 46.** Verificación Cumplimiento NEC Propuesta Tipología I

Envolvente de la edificación Vivienda Tipo I				
Tipología	Componente	Valor U actual (W/m²k)	Valor requerido (W/m²k)	Cumplimiento
Cubierta	Losa de Hormigón 7cm	0.643	U-2.35	Cumple
Paredes	Bloque de hormigón	2.89	U-2.90	Cumple
Piso	Cerámica	2.31	U-3-20	Cumple
Piso Dormitorios	Piso Flotante	2.178	U-3-20	Cumple

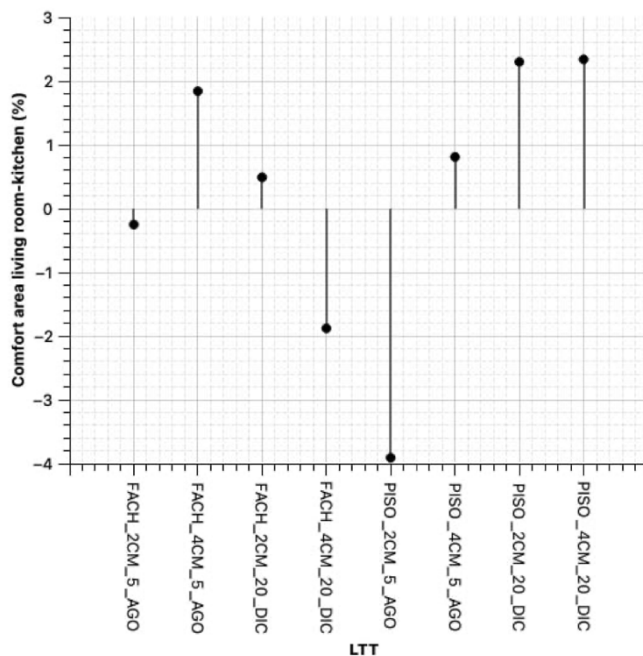


**Figura 97.** Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Sala-Cocina, considerando mejoras en la cubierta y piso flotante

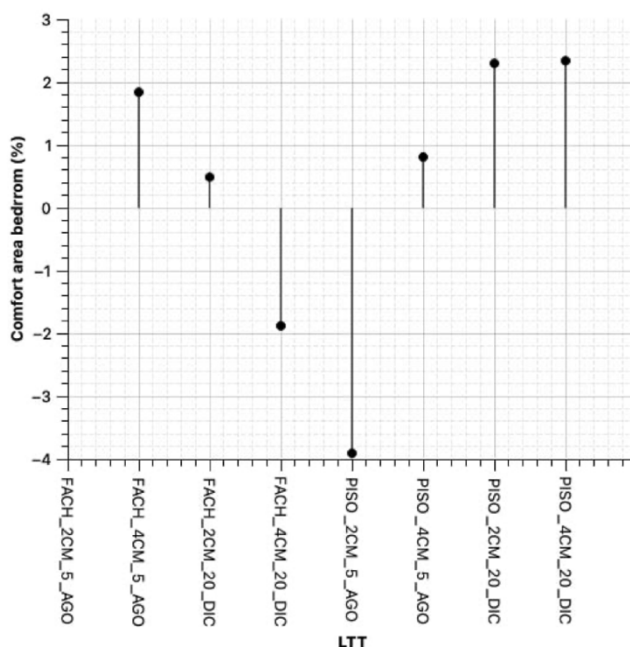


**Figura 98.** Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Dormitorios, considerando mejoras en la cubierta y piso

Los resultados de aplicar el LTT en la envolvente arquitectónica muestran una mejora significativa al aumentar el espesor del material. Esta simulación también contempla mejoras en la cubierta y la sustitución de pisos cerámicos por laminados, destacando la importancia de estas modificaciones para optimizar el rendimiento térmico. Además, para evaluar los efectos específicos del LTT en la envolvente sin mejoras en la cubierta, se realizó otra simulación para la vivienda tipo I. Aquí se varía el espesor del material sin alterar otros componentes, lo cual permite entender mejor su contribución al confort térmico. Los detalles de estas modificaciones y sus impactos se ilustran en las figuras presentadas a continuación:



**Figura 99.** Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Sala-Cocina



**Figura 100.** Resultados simulación: porcentaje de reducción / ampliación franja de confort térmico (19.98°C-24.98°C) aplicando LTT, respecto al caso base. Espacio: Dormitorios

En estas gráficas por ambiente y por fechas que determina el software como puntos críticos de análisis se puede determinar en su mayoría que siguen existiendo

mejoras en su comportamiento térmico, con mayor énfasis cuando el LTT es de 4 cm.

### 5.1.16. Impacto del revestimiento con ladrillos geopolimerizados en el rendimiento energético de la edificación analizada.

**Tabla 47.** Comparativa de parámetros energéticos y emisiones

Parámetro	Antes	Después	Reducción/Mejora
<b>Consumo Energético y Emisiones</b>			
Consumo de Energía Total	220.42 kWh/m <sup>2</sup> a	218.38 kWh/m <sup>2</sup> a	2.04 kWh/m <sup>2</sup> a
Consumo de Combustible	220.42 kWh/m <sup>2</sup> a	218.38 kWh/m <sup>2</sup> a	2.04 kWh/m <sup>2</sup> a
Energía Primaria	442.67 kWh/m <sup>2</sup> a	440.73 kWh/m <sup>2</sup> a	1.94 kWh/m <sup>2</sup> a
Coste del Combustible	144.62 USD/m <sup>2</sup> a	14.43 USD/m <sup>2</sup> a	130.19 USD/m <sup>2</sup> a
Emisión CO <sub>2</sub>	43.05 kg/m <sup>2</sup> a	42.43 kg/m <sup>2</sup> a	0.62 kg/m <sup>2</sup> a
<b>Coefficientes de Transferencia (Valor U)</b>			
Promedio Edificio Entero	3.59 W/m <sup>2</sup> K	2.22 W/m <sup>2</sup> K	Mejora Significativa
Pavimentos	2.83 - 2.83 W/m <sup>2</sup> K	2.83 - 2.83 W/m <sup>2</sup> K	Sin cambio
Externo	2.90 - 4.59 W/m <sup>2</sup> K	0.64 - 2.90 W/m <sup>2</sup> K	Mejora Significativa
Subterráneo	N/A	N/A	Sin información
Aberturas	2.11 - 7.09 W/m <sup>2</sup> K	2.11 - 6.28 W/m <sup>2</sup> K	Reducción en la variación de valores U
<b>Valores Anuales Específicos</b>			
Energía calorífica Neta	1.58 kWh/m <sup>2</sup> a	0.17 kWh/m <sup>2</sup> a	1.41 kWh/m <sup>2</sup> a
Energía refrigerante Neta	0.00 kWh/m <sup>2</sup> a	0.00 kWh/m <sup>2</sup> a	Sin cambio
Energía Neta Total	1.58 kWh/m <sup>2</sup> a	0.17 kWh/m <sup>2</sup> a	1.41 kWh/m <sup>2</sup> a
Días-Grado			
Calefacción (HDD)	1069.75	1069.75	Sin cambio
Refrigeración (CDD)	2189.40	2189.40	Sin cambio

La tabla indica mejoras en el consumo energético y las emisiones, con una reducción significativa en el coste del combustible y en las emisiones de CO<sub>2</sub>. La eficiencia térmica del edificio mejoró, especialmente en las superficies externas, reduciendo el valor U promedio de 3.59 a 2.22 W/m<sup>2</sup>K. No hubo cambios en pavimentos y la variabilidad de los valores U en las aberturas disminuyó.

### 5.1.17. Análisis de los beneficios energéticos de los ladrillos geopolimerizados tipo tejuela LTT.

#### 5.1.17.1. Porosidad del Ladrillo:

La alta porosidad (47.46%) indica que hay una cantidad significativa de aire atrapado en los poros del ladrillo. El aire es un excelente aislante térmico porque reduce la transferencia de calor por conducción.

#### 5.1.17.2. Valores U (Coeficientes de Transferencia de Calor):

Los valores U para los componentes externos del edificio (0.64 - 2.90 W/m<sup>2</sup>K) reflejan la capacidad aislante de los materiales. Un valor U más bajo implica una mejor capacidad aislante.

Si el ladrillo con alta porosidad está siendo utilizado en las paredes exteriores, contribuiría a valores U más bajos, indicando una menor transferencia de calor a través de las paredes.

#### 5.1.17.3. Consumo Energético y Eficiencia:

La baja energía calórica neta (0.17 kWh/m<sup>2</sup>a) y el bajo consumo de energía total (218.38 kWh/m<sup>2</sup>a) sugieren que el edificio mantiene bien su temperatura interna, lo cual es característico de un buen aislamiento térmico.

La eficiencia energética del edificio implica que los materiales de construcción, incluidos los ladrillos, están desempeñando un rol de aislante.

Por lo tanto, el **ladrillo geopolimerizado con alta porosidad está actuando como un aislante térmico en el edificio**. Esto se debe a:

- La capacidad del aire atrapado en los poros para reducir la transferencia de calor.

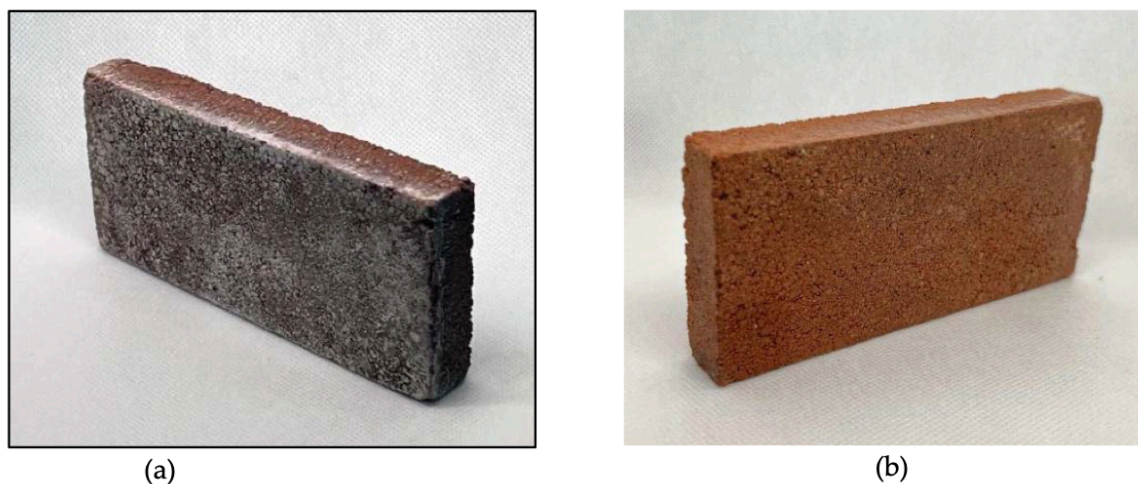
- Los valores U indicados para los componentes externos del edificio, que son coherentes con materiales aislantes.
- El bajo consumo de energía y la alta eficiencia energética del edificio, que reflejan la efectividad de los materiales aislantes utilizados.

De lo anterior, podemos concluir que en este caso de análisis el ladrillo geopolimerizado está contribuyendo positivamente al aislamiento térmico del edificio, reduciendo las pérdidas de calor y mejorando la eficiencia energética.

## **5.2. Análisis de eflorescencias de LTT**

En el estudio de la producción de LTT, es esencial abordar la reacción química que estos materiales pueden tener, así como su propensión a generar eflorescencias. Este fenómeno, caracterizado por la aparición de depósitos salinos en superficies, surge como una consideración importante debido a su impacto tanto estético como en la integridad estructural de los materiales. A continuación, se presentan los hallazgos derivados del análisis de muestras de LTT expuestas al ambiente, examinando específicamente cómo afectan estas reacciones a la calidad y durabilidad del material en condiciones reales de uso.

Según Lv et al. [53] en su reporte del estudio sobre “Inhibición de la eflorescencia en revestimientos inorgánicos de geopolímero a base de sodio”, la eflorescencia es un comportamiento espontáneo en un geopolímero a base de sodio, que implica la migración de álcalis solubles, pudiendo disolverse con agua, produciendo carbonatos blancos.



**Figura 101.** a.) fotografía prototipo LTT con eflorescencias b.) fotografía prototipo LTT cubierto con polidimetil siloxano

Su inhibición podría darse con el uso polidimetil siloxano (PS), suprimiendo significativamente la tasa de lixiviación de álcali, estableciendo además una estructura impermeable, reduciéndose de un 80 y 90%.

De lo anterior se procede a realizar un análisis DRX del prototipo de LTT, luego que ha pasado tiempo no menor a los 28 días, y este se ha encontrado en condiciones “normales” de exposición al factor intemperización. Los resultados arrojados son los que se pueden advertir en la Tabla 48.

**Tabla 48.** Fases minerales (compuestos químicos) detectados en la muestra

Compuesto mineral	Fórmula química	Semicuantificación (%)
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	73
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1
Moscovita	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	20
Fosfato de aluminio hidratado	Al <sub>5</sub> [(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [(P,S)O <sub>3</sub> (OH,O)] <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>8</sub> •6.48(H <sub>2</sub> O)	1
Sulfato de magnesio y potasio hexahidratado	K <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> •6(H <sub>2</sub> O)	4


Las primeras cuatro fases cristalinas (cuarzo, hematita, albita y moscovita) corresponden a minerales que deben estar presentes en el ladrillo, las cuales son inocuas.

Los últimos dos compuestos identificados (fosfato de aluminio hidratado y sulfato de magnesio y potasio hexahidratado), corresponden a fosfatos/sulfatos hidratados, que se pueden haber formado por la humedad en la superficie de los ladrillos.

Estos dos últimos compuestos pueden causar daño a los ojos e irritación de la piel y/o respiratoria, pero dado que su composición es baja y está ocupado en exteriores baja su riesgo de complicaciones por toxicidad.

### **5.3. Análisis de resultado de lixiviado de ladrillo**

La muestra de lixiviado de ladrillo se procesó después de haber aplicado laca al ladrillo, con el objetivo de protegerlo de la humedad, como otra alternativa al polidimetil siloxano. Analizando los resultados del informe de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), podemos evaluar la eficacia de esta medida en función de las concentraciones de metales pesados en el lixiviado.

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA</b>					
<b>REGISTRO DE INFORME DE RESULTADOS</b>					
LABORATORIOS UTPL		Laboratorios			
CODIGO: R.7.8.2 VERSION: 4 FECHA: 2022-03-02 ELABORADO POR: Diego Maza Estrada REVISADO Y APROBADO POR: Diana Ines Hualpa					
<b>A. Información Proporcionada por el Cliente:</b>					
<b>Cliente:</b>	Facultad de Ingeniería y Arquitectura	<b>Muestreador:</b>	Carlos Correa		
<b>Dirección:</b>	San Cayetano Alto s/n, Loja.Ecuador	<b>Descripción:</b>	Lixiviado de Ladrillo		
<b>Email:</b>	<a href="mailto:racorrea@utpl.edu.ec">racorrea@utpl.edu.ec</a>	<b>Fecha de muestreo:</b>	2024-04-10		
<b>B. Información general de muestra recibida:</b>					
<b>Fecha de recepción:</b>	2024-04-24				
<b>Condiciones de recepción:</b>	Las muestras son transportadas en total sequedad a temperatura ambiente				
<b>C. Resultados de análisis de muestra</b>					
<b>Condiciones Ambientales durante el ensayo:</b>	<b>Temperatura (°C):</b>	20.9	<b>Humedad (%):</b> 55		
<b>Item de Ensayo</b>					
Fecha de análisis		Ítem de ensayo	Resultado	Unidades	Método de ensayo
Inicio	Fin				
2024-04-25	2024-05-01	Cadmio	0.857	mg/L	US EPA 3051A; SM 3113 A
2024-04-25	2024-05-01	Plomo	20.625	mg/L	US EPA 3051A; SM 3113 A
2024-04-25	2024-05-02	Arsenico	<0.001	mg/L	US EPA 3051A; SM 3113 A
2024-04-25	2024-05-06	Mercurio	0.001	mg/L	US EPA 3051A; SM 3112 A
<b>D. Glosario:</b>					
n/d: No disponible	mg/Kg: miligramos por kilogramo				
U: Incertidumbre expandida con valor de k=2 y con un 95% de confianza.	%N: porcentaje de Nitrógeno				
<LDD: Menor al límite de detección	IS: In Situ (En el sitio de muestreo)				
%MO: Porcentaje de Materia Orgánica	SM: siglas en inglés de Método Estándar				
mg/L miligramos por litro	AOAC: siglas en inglés de Asociación de Químicos Analíticos Oficiales				
<b>E. Observaciones:</b>					
A) El informe de ensayo no se puede reproducir parcialmente, excepto en su totalidad con la aprobación escrita del laboratorio.					
B) Los resultados representan exclusivamente la muestra (s) analizada (s).					
D) El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente que pueda afectar la validez de los resultados.					
E) Cuando el resultado se expresa como <0,045 (0,016) significa que el límite más bajo de nuestra acreditación es 0,045 y el valor expresado entre paréntesis (0,016) corresponde a la concentración del parámetro en su muestra.					
<b>F. Información Técnica:</b>					
Los métodos de análisis para la determinación de cada uno de los parámetros, se basan en: Edición 24th del Standar Methods, publicada en octubre de 2023.					

----- Fin del Informe -----

**Figura 102.** Informe de resultados de análisis de metales pesados en lixiviado de ladrillo

Se hicieron los análisis al prototipo una vez que se colocó una capa de protección al ladrillo. Los resultados muestran la presencia de plomo en concentraciones relativamente altas<sup>71</sup>, mientras que el arsénico y el mercurio están presentes en cantidades muy bajas.

<sup>71</sup> Esto se debe a la aplicación de una laca de protección para proteger de la humedad

La baja concentración de arsénico ( $<0.001$  mg/L) y mercurio ( $0.001$  mg/L) puede indicar que la laca fue efectiva en prevenir la lixiviación de estos metales, posiblemente debido a sus menores cantidades iniciales en la estructura del ladrillo o a una mayor capacidad de la laca para evitar su movilización.

Sin embargo, el alto contenido de plomo y cadmio en el lixiviado sugiere que la laca no fue completamente eficaz en impedir la salida de estos metales más abundantes o fácilmente lixiviables.

La variabilidad en la eficacia de la laca podría deberse a factores como la calidad y el tipo de laca utilizada, la uniformidad de su aplicación, y las propiedades intrínsecas del ladrillo que pueden influir en la retención o liberación de ciertos metales.

La humedad puede haber permeado a través de microfisuras o áreas con aplicación insuficiente de laca, permitiendo la lixiviación de cadmio y plomo.

## **5.4. Análisis de sostenibilidad basado en la composición y fabricación**

El desarrollo de materiales de construcción sostenibles es crucial para mitigar los impactos ambientales de la industria. Este estudio analiza ladrillos enfocados en su resistencia a la compresión y eficiencia material, identificando el más sostenible con una molaridad de 7.5, contenido de solución del 26%, moldeado a  $110^{\circ}\text{C}$  y bajo 4000 / 5000 libras de presión, optimizando el uso de recursos y energía. La resistencia a la compresión de 1.15 MPa y un factor de optimización de 10.78 MPa/kg indican excelente capacidad de carga y durabilidad. La combinación de una molaridad moderada y condiciones de presión y temperatura contribuyen significativamente a la sostenibilidad del ladrillo. Para obtener una comprensión

holística de los impactos ambientales, es esencial implementar un análisis del ciclo de vida (ACV) completo. Esto incluye evaluar la extracción y producción de materias primas, emisiones y consumo de energía durante la fabricación, impacto del transporte, durabilidad y mantenimiento en el uso, y opciones de disposición o reciclaje. La capacidad de reciclaje del ladrillo es una ventaja clave, ya que permite recomponer el material en nuevos productos constructivos, reduciendo los desechos y la demanda de nuevas materias primas. Fomentar la reutilización y reciclaje de estos ladrillos puede minimizar el impacto ambiental a largo plazo. Para fortalecer la sostenibilidad, se recomienda realizar un ACV completo incorporando datos detallados sobre emisiones, uso de recursos, y mejorar las prácticas de reciclaje. Estos pasos promoverán el desarrollo de soluciones de construcción más sostenibles y eficientes, alineadas con prácticas internacionales y expectativas regulatorias.

#### 5.4.1. Análisis de Costos de Materiales

Para determinar el costo del hidróxido de sodio (NaOH) por ladrillo tipo tejuela (LTT) con una molaridad de 12.5M, se siguieron pasos precisos basados en datos fundamentales. El precio del NaOH es \$24.50 por kg, la molaridad de la solución alcalina es 12.5M, y el contenido de solución representa el 26% del peso total del ladrillo. Dado que un litro de solución de 12.5M contiene 500g de NaOH, y cada ladrillo requiere 0.058 litros de esta solución (equivalente al 26% del peso del ladrillo, que es 221.24 g), la cantidad de NaOH utilizada por ladrillo es de 28.76g. Convertida a kilogramos, esta cantidad es 0.03 kg. Multiplicando esta cantidad por el precio del NaOH, se obtiene un costo de **\$0.70 por ladrillo**. Este cálculo incluye únicamente los costos de materiales, sin considerar otros costos de producción como mano de obra, energía, transporte y otros gastos operativos. Esta estimación

proporciona una visión clara de los costos específicos de los materiales utilizados en la producción de cada ladrillo, lo que es crucial para evaluar la viabilidad económica del proceso.

El desafío, sin embargo, radica en reducir la molaridad de la mezcla sin comprometer las propiedades del ladrillo. Disminuir la molaridad de la solución alcalina podría reducir significativamente los costos de materiales, ya que se utilizaría menos NaOH por ladrillo. Este ajuste no solo haría el proceso más económico, sino también potencialmente más sostenible. La investigación y experimentación para encontrar la menor molaridad posible que aún cumpla con los requisitos de resistencia y durabilidad del ladrillo es esencial. Esto implica un balance cuidadoso entre la concentración de la solución alcalina y las propiedades mecánicas del producto final, garantizando que los ladrillos mantengan su calidad y funcionalidad mientras se minimizan los costos.

## 6. Conclusiones

- La caracterización química mediante el ensayo de DRX; el material cumple con las condiciones de materia prima para el proceso de geopolimerización mediante el uso de hidróxido de sodio, debido a que muestra buenos contenidos de cuarzo (Q), por otra parte, los resultados del ensayo de FRX indica un contenido alto de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), el cual es altamente recomendado en mezclas geopoliméricas para formar aluminosilicatos y generar altas resistencias.
- La generación de un material de construcción a través de un proceso de geopolimerización usando los residuos de ladrillos como materia prima es viable, en función de los resultados experimentales obtenidos. La mezcla óptima que presentó un valor máximo de factor de optimización de 14.84 MPa/kg fue la de 12.5M-26%CS-150°C.
- Los ladrillos geopoliméricos tipo tejuela LTT, son una potencial alternativa de uso en envolventes arquitectónicas, comunes, debido a sus propiedades mecánicas y térmicas satisfactorias y su proceso de producción sostenible por: el bajo consumo de energía en comparación al proceso artesanal común, a la reutilización de residuos y a la reducción significativa del uso recursos naturales.
- La resistencia mínima para un ladrillo macizo cerámico tipo C en un ensayo de compresión corresponde a un valor de 6MPa según los requisitos de la norma NTE INEN 297, dentro de esto se determina que los LTT cumplen con

la sollicitación alcanzando una resistencia promedio a compresión de 6,93 MPa.

- La resistencia mínima a flexión simple, de los ladrillos tejuela no cumple con los requerimientos de la norma NTE INEN 297, para ladrillos macizos cerámicos tipo C, alcanzando una resistencia a flexión de 1.937 MPa cuyo valor mínimo es 2.
- Los requerimientos según la norma NTE INEN 297, recomienda un porcentaje de absorción máximo de 25% para ladrillos macizos cerámicos tipo C, los ladrillos tejuela presentan una porosidad calculada de 28,12% dando un porcentaje teórico de absorción del 24,95%, cumpliendo perfectamente las recomendaciones de la norma.
- La mezcla óptima de 12.5M-26%CS-150°C no solo cumplió con los requisitos mecánicos y térmicos, sino que también demostró ser una alternativa viable para su uso en envolventes arquitectónicas, destacando su potencial para aplicaciones en la construcción sostenible.
- La modelación en Civil FEM, se validaron correctamente con datos reales obtenidos en el laboratorio tanto a compresión como a flexión, obteniendo diferencias de -1.00% de esfuerzo y -1.47% en resultados de deformación en ensayos a compresión en LTT.
- La modelación del ensayo de flexión presenta un error relativo que se mantiene en un rango de  $\pm 5\%$  tanto a esfuerzo como en deformación presentando valores de -0.21% y 3.92% para los prototipos de geopolimerización.

- El ensayo de transferencia de calor permitió entender el comportamiento térmico de los tipos de ladrillos analizados, en el cual el índice de transferencia de calor de las placas de 30x30cm de ladrillo geopolimerizados fue mayor que la placa de ladrillo de arcilla cocida teniendo una variación de 0,0117 a 0,0050 kW respectivamente en un rango de tiempo de 1 hora. La misma dinámica se observa en la transferencia de calor total kWh de los dos materiales, las placas de ladrillo geopolimerizados son más eficientes respecto al intercambio de calor frente a las placas de ladrillo de arcilla cocida pero se observa que las LA-1 y LA-2 mantienen un calor constante teniendo una fluctuación mínima de 0,001 kW mientras que las LGP-1 y LGP-2 tienen una fluctuación más alta de 0,003 kW lo cual se evidencia en la aplicación de dichos materiales en la simulación energética al no observar mejoría en las horas de calefacción en la vivienda.
- Los ladrillos geopolimerizados demostraron una mejora en el aislamiento térmico de los edificios, reduciendo la necesidad de calefacción y refrigeración. Esto se traduce en un ahorro energético y económico considerable a lo largo de la vida útil del edificio
- Existe una mejora en el material constructivo el momento que se incrementa su espesor hasta 4 cm, esto se ve reflejado en las simulaciones del EcoDesigner.
- El LTT, de acuerdo con los valores de la conductividad térmica podría aplicarse en pisos, para hacerlo funcionar como un piso radiante.
- Las eflorescencias no afectan a la resistencia mecánica y podrían eliminarse por acción mecánica con tratamientos de hidrofugación, o con siloxanos, o

pudiendo también aplicarse una lechada o mortero de cal, o una pintura de silicato, para su protección.

- Los ladrillos geopolimerizados mejoran la eficiencia energética de las edificaciones al reducir la demanda de calefacción y refrigeración, demostrando un potencial significativo para aplicaciones en revestimientos arquitectónicos.
- El análisis del costo del hidróxido de sodio (NaOH) para la producción de ladrillos tipo tejuela (LTT) con una molaridad de 12.5M muestra que cada ladrillo tiene un costo de \$0.7046 solo en materiales. Reducir la molaridad de la solución alcalina podría disminuir significativamente los costos sin comprometer la calidad del ladrillo. Futuros estudios deben enfocarse en encontrar un balance óptimo que mantenga las propiedades mecánicas del ladrillo mientras reduce los costos, promoviendo una producción más eficiente y sostenible.

## 7.Recomendaciones

- Estudiar la influencia que puede llegar a tener los procesos de trituración de los residuos de ladrillos en la geosíntesis de los productos geopoliméricos.
- Investigar la aplicación de soluciones alcalinas diferentes a la aplicada en este proyecto para los procesos de geopolimerización y evaluar su influencia en los productos geopoliméricos, se podría ampliar la presente investigación con adhesiones de cenizas volantes, o el uso de elementos tradicionales en la construcción como la cal.
- Evaluar la incidencia en las propiedades mecánicas que puede generar distintos periodos iniciales de curado y diferentes etapas de curado con la adición de cenizas volantes o la cal.
- Para llevar a cabo un análisis económico de la fabricación de ladrillos tipo tejuela de 11 cm x 5.5 cm x 1.5 cm utilizando la mezcla óptima de geopolimerización, se ha considerado la solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) con una molaridad de 12.5 M y un contenido de solución del 26%. El peso del ladrillo es aproximadamente 221.24 g, y de este, el 26% corresponde a la solución alcalina, lo que resulta en 57 g de solución por ladrillo. Dado que 1 litro de solución contiene 500 g de NaOH, la cantidad de NaOH requerida por ladrillo es de 28.5 g. Con un costo de \$24.50 por kg de NaOH, el costo de NaOH por ladrillo es de \$0.69825, costo que resulta ser muy elevado para procesos de competencia en el mercado, por lo que se sugiere seguir la línea investigativa con la intención de reducir la cantidad de

hidróxido de sodio compensados con otros elementos como cenizas o incluso cemento hasta un 5%.

- Realizar un estudio completo y detallado de la sostenibilidad de la fabricación de esta clase de ladrillos.
- Promover alternativas para la creación de nuevos materiales para la construcción de concretos y morteros de alta resistencia y su aplicación en la construcción.
- El uso de las normativas existentes en nuestro país como la NEC HS EE, es un referente a tener en cuenta al momento de concebir proyectos que tengan como objetivo la eficiencia energética, el confort de los usuarios y el bajo impacto ambiental, optimizando los procesos de fabricación de los materiales lograremos reducir la huella de carbono provocado por cada uno de ellos., complementado con estudios de conductividad térmica de los materiales locales.
- Realizar un análisis completo del ciclo de vida de los ladrillos geopolimerizados, evaluando todos los impactos ambientales desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este análisis permitirá identificar oportunidades adicionales para mejorar la sostenibilidad del material.
- Investigar y desarrollar métodos para optimizar aún más el proceso de geopolimerización, como la utilización de diferentes activadores alcalinos o la integración de otros residuos industriales en la mezcla, para mejorar las propiedades del material y reducir costos.

- Evaluar la viabilidad económica y técnica de la producción a gran escala de ladrillos geopolimerizados, incluyendo estudios de mercado y estrategias para su comercialización. Esto puede incluir la cooperación con industrias de construcción y entidades gubernamentales para promover su uso.
- Desarrollar normativas y procedimientos de certificación específicos para los ladrillos geopolimerizados, asegurando que cumplan con los estándares nacionales e internacionales de construcción. Esto facilitará su aceptación en el mercado y promoverá su adopción a nivel global.
- Fomentar investigaciones adicionales sobre el comportamiento a largo plazo de los ladrillos geopolimerizados en diferentes condiciones climáticas y su resistencia a fenómenos ambientales extremos. Además, explorar la posibilidad de usar este material en otras aplicaciones constructivas, como pavimentos y estructuras portantes.
- Se recomienda investigar la viabilidad de producción a gran escala de los ladrillos geopolimerizados, evaluando los costos y la logística de obtención de materias primas, así como la implementación de procesos de producción industrial.
- Explorar la posibilidad de reducir la concentración de NaOH sin comprometer las propiedades mecánicas del material, así como la incorporación de otros aditivos que puedan mejorar aún más las características del ladrillo geopolimerizado.
- Continuar con investigaciones sobre el uso de otros residuos industriales en la geopolimerización, así como el estudio de la durabilidad y el

comportamiento a largo plazo de los ladrillos geopolimerizados en diferentes condiciones ambientales y de uso.

## 8. Futuras investigaciones

En la búsqueda de métodos sostenibles para la fabricación de ladrillos, se ha investigado el uso de materiales alternativos y procesos optimizados. Este estudio sugiere la incorporación de nuevos materiales como ceniza de café, ceniza de arroz y hasta un 5% de cemento, en la matriz de ladrillos geopolimerizados con la intención de hacerla más robusta. La investigación se enfoca en la combinación de diferentes molaridades y temperaturas para optimizar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los ladrillos.

En este análisis, se utilizarán datos experimentales para identificar la mejor muestra de cada material (ceniza de café, ceniza de arroz y cemento) en términos del factor de optimización (MPa/kg). Este factor de optimización se define como la resistencia a compresión diametral  $R_t$  (kg/cm<sup>2</sup>) dividida por el peso  $W$ (kg). Además, se analizarán las posibles causas que contribuyen a las diferencias en el rendimiento de las muestras.

### ***Datos y Metodología***

Para identificar la mejor muestra de cada material, se seleccionarán las muestras con el valor más alto del factor de optimización. A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores máximos del factor de optimización para cada material y las condiciones experimentales correspondientes.

**Tabla 49.** *Tabla resumen evaluación muestras óptimas de materiales en base a su factor de optimización*

Ceniza de Café								
Muestra	% Material	Molaridad	Contenido de Solución (%)	Temperatura (°C)	Presión de Moldeo (lb)	Rt(kg/cm <sup>2</sup> )	W(kg)	Factor de Optimización (MPa/kg)
19	2.50	7.50	26.00	110	5000	8.12	0.11	7.54

Ceniza de Arroz								
Muestra	% Material	Molaridad	Contenido de Solución (%)	Temperatura (°C)	Presión de Moldeo (lb)	Rt(kg/cm <sup>2</sup> )	W(kg)	Factor de Optimización (MPa/kg)
80	5.00	7.50	26.00	150	5000	9.64	0.10	9.16

Cemento								
Muestra	% Material	Molaridad	Contenido de Solución (%)	Temperatura (°C)	Presión de Moldeo (lb)	Rt(kg/cm <sup>2</sup> )	W(kg)	Factor de Optimización (MPa/kg)
121	5.00	7.50	26.00	110	5000	11.74	0.11	10.78

El análisis ha identificado las mejores muestras de ceniza de café, ceniza de arroz y cemento en función del factor de optimización, destacando la importancia de la molaridad de la solución, la temperatura de curado, el contenido de material y la presión de moldeo en la resistencia mecánica. La ceniza de café, rica en sílice y con propiedades puzolánicas, mejora la reactividad con el agente activador alcalino y contribuye a la sostenibilidad al reciclar residuos agrícolas, mejorando la resistencia y durabilidad del ladrillo. La ceniza de arroz, similar en composición y propiedades, también aumenta la resistencia mecánica y promueve prácticas de construcción sostenibles. El cemento Portland, conocido por su alta resistencia y durabilidad, actúa como aglutinante formando una matriz sólida y sirve como referencia estándar para evaluar nuevos materiales geopolimerizados. Las diferencias en el rendimiento de las muestras se atribuyen a las variaciones en los parámetros experimentales, que son críticos para maximizar la resistencia mecánica de los materiales estudiados y que permiten una proyección del tema a investigarse en función de parámetros relacionados a la sostenibilidad del producto final.

## Referencias

- [1] V. J. García, C. O. Márquez, A. R. Zúñiga-Suárez, B. C. Zúñiga-Torres, and L. J. Villalta-Granda, “Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: Review and New Insights,” *Int J Concr Struct Mater*, vol. 11, doi: 10.1007/s40069-017-0194-7.
- [2] H. Li, L. Dong, Z. Jiang, X. Yang, and Z. Yang, “Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls,” *J Clean Prod*, vol. 133, pp. 1017–1026, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.149.
- [3] EPA, “Construction and Demolition Debris Management in the United States , 2015 U . S . Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery March 2020,” vol. 2013, no. March, pp. 1–24, 2020.
- [4] INEC, “Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.”
- [5] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, “Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review,” *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.193.
- [6] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications 3 rd edition*, no. January 2008. 2011.
- [7] S. K. Amin, S. A. El-Sherbiny, A. A. M. A. El-Magd, A. Belal, and M. F. Abadir, “Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste,” *Constr Build Mater*, vol. 157, pp. 610–620, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.052.
- [8] NTE INEN 0297, “NTE INEN 0297: Ladrillos cerámicos. Requisitos,” vol. 0297, p. 7, 1978.
- [9] L. Sánchez, “Optimización de las mezclas para la fabricación de ladrillos artesanales en la región de Malacatos.” Universidad Técnica Particular de Loja, 2016.
- [10] NTE INEN 0292, “NTE INEN 292:Ladrillos cerámicos. Muestreo,” 2015.
- [11] L. M. Seymour, D. Keenan-Jones, G. L. Zanzi, J. C. Weaver, and A. Masic, “Reactive ceramic aggregates in mortars from ancient water infrastructure serving Rome and Pompeii,” *Cell Rep Phys Sci*, vol. 3, no. 9, p. 101024, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.XCRP.2022.101024.
- [12] J. Davidovits, “Geopolymer Chemistry and Applications Geopolymer Chemistry & Applications,” *Institute Geopolymer, France*, vol. 2011, no. January 2008, 2015.
- [13] J. Davidovits, L. Huaman, and R. Davidovits, “Ancient geopolymer in south-American monument. SEM and petrographic evidence,” *Mater Lett*, vol. 235, pp. 120–124, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.MATLET.2018.10.033.
- [14] J. (Universidad A. de C. Apablaza, “Caracterización De Polimeros Naturales Fosfo-Siliciclásticos Para Aplicaciones En La Industria De La Construcción,” pp. 15–30, 2015.
- [15] J. C. Calderón Peñafiel, “Materiales de arcilla geo-polimerizada: tecnologías para la arquitectura del futuro,” *Jornada de Doctorado del programa de Tecnología de la arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo: Libro de Actas 2018*, pp. 4–9, 2018.

- [16] K. A. M. El-Naggar, S. K. Amin, S. A. El-Sherbiny, and M. F. Abadir, "Preparation of geopolymer insulating bricks from waste raw materials," *Constr Build Mater*, vol. 222, pp. 699–705, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.182.
- [17] L. A. López Ruiz, X. Roca Ramón, and S. Gassó Domingo, "The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach," *J Clean Prod*, vol. 248, p. 119238, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.119238.
- [18] P. Duxson, A. A. Fernández-Jimé, A. J. L. Provis, A. G. C. Lukey, A. A. Palomo, and A. J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: the current state of the art", doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [19] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J Mater Sci*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [20] M. E. Valenzuela Herrera, "Estudio Experimental De Las Propiedades De Geopolímeros Sintetizados a Partir De Puzolana Natural Memoria," pp. 0–86, 2013.
- [21] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals," *Int J Miner Process*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000, doi: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- [22] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.
- [23] R. Walker and • S Pavía, "Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes", doi: 10.1617/s11527-010-9689-2.
- [24] K. Komnitsas, D. Zaharaki, A. Vlachou, G. Bartzas, and M. Galetakis, "Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers," *Advanced Powder Technology*, vol. 26, no. 2, pp. 368–376, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.APT.2014.11.012.
- [25] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.
- [26] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.
- [27] L. K. Turner and F. G. Collins, "Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete," *Constr Build Mater*, vol. 43, pp. 125–130, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.01.023.
- [28] S. K. Amin, S. A. El-Sherbiny, A. A. M. A. El-Magd, A. Belal, and M. F. Abadir, "Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste," *Constr Build Mater*, vol. 157, pp. 610–620, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.052.
- [29] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.
- [30] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.
- [31] NRCS Soils Staff, "Soil Survey Manual," 1951.
- [32] Md. Baltimore, *Munsell Soil Color Charts*. New York, 1994.
- [33] S. J. Thien, "A flow diagram for teaching texture by feel analysis," *Journal of Agronomic Education*, pp. 54–55, 1979.

- [34] ASTM D422, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils,” 2007, *West Conshohocken, PA*. doi: D5778-95.
- [35] K. Komnitsas, D. Zaharaki, A. Vlachou, G. Bartzas, and M. Galetakis, “Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers,” *Advanced Powder Technology*, vol. 26, no. 2, pp. 368–376, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.APT.2014.11.012.
- [36] ASTM D4318-17e1, “Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,” 2017, *West Conshohocken, PA*. doi: D4318-17E01.
- [37] ASTM D854-14, “Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer,” 2014, *West Conshohocken, PA*. doi: D0854-10.
- [38] J. Ruehlmann and M. Körschens, “Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 2. Predicting the effect of the mineral composition of particle-size fractions,” *Geoderma*, vol. 375, p. 114543, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.GEODERMA.2020.114543.
- [39] S. O. Sore, A. Messan, E. Prud’homme, G. Escadeillas, and F. Tsobnang, “Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash,” *Constr Build Mater*, vol. 124, pp. 301–311, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.102.
- [40] N. Pardo, G. Penagos, M. Correa, and E. López, “Desarrollo de morteros de bajo impacto ambiental a partir de residuos sílico-aluminosos activados alcalinamente del sector minero,” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.BSECV.2021.09.003.
- [41] A. M. Mustafa al Bakri *et al.*, “Geopolymerization method for soil stabilization application,” US 2015/0016895 A1, 2015
- [42] J. Paladines, “Fabricación de ladrillos a base de lodos de relaves de minas,” Universidad Técnica Particular de Loja, 2016.
- [43] N. H. Faisal *et al.*, “Diametral compression test method to analyse relative surface stresses in thermally sprayed coated and uncoated circular disc specimens,” *Surf Coat Technol*, vol. 357, pp. 497–514, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2018.10.053.
- [44] J. J. del Coz Díaz, P. J. García Nieto, F. P. Álvarez Rabanal, and A. Lozano Martínez-Luengas, “Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method,” *Eng Struct*, vol. 33, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2010.09.012.
- [45] UNE, “UNE-EN 772-16:2011 Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 16: Determinación de las dimensiones.” 2011.
- [46] S. O. Sore, A. Messan, E. Prud’homme, G. Escadeillas, and F. Tsobnang, “Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash,” *Constr Build Mater*, vol. 124, pp. 301–311, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.102.
- [47] R. Illampas, D. C. Charmpis, and I. Ioannou, “Laboratory testing and finite element simulation of the structural response of an adobe masonry building under horizontal loading,” *Eng Struct*, vol. 80, pp. 362–376, 2014.
- [48] D. Boutagougua, “A formulation of membrane finite elements with true drilling rotation,” *Eng Comput (Swansea)*, 2019.
- [49] I. Costa-Carrapiço, B. Croxford, R. Raslan, and J. Neila González, “Hygrothermal calibration and validation of vernacular dwellings: A genetic algorithm-based optimisation methodology,” *Journal of Building Engineering*, vol. 55, 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104717.

- 
- [50] F. Musau and A. Evans, “Computer simulation of energy in buildings: Predicted versus measured results,” in *Building Simulation Conference Proceedings*, 2019, pp. 4321–4328.
- [51] M. Aram and O. Abessi, “Optimal design of green buildings using computational fluid dynamics and climate simulation tools,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 917–932, 2020, doi: 10.1007/s13762-019-02403-6.
- [52] M. Bonomolo, S. Di Lisi, and G. Leone, “Building information modelling and energy simulation for architecture design,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 5, pp. 1–32, 2021, doi: 10.3390/app11052252.
- [53] X. Lv, Y. Qin, Z. Lin, Z. Tian, and X. Cui, “Inhibition of Efflorescence in Na-Based Geopolymer Inorganic Coating,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 24, pp. 14822–14830, Jun. 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c01919.

## Anexos

### **b. Requerimientos para la envolvente de la edificación<sup>72</sup>**

Para evaluar la envolvente de las edificaciones se debe tener en cuenta los siguientes aspectos, que han sido considerados de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, referida al capítulo de Habitabilidad y Salud; Eficiencia energética en el que se establecen indicadores como parámetros de comparación para un mejor confort de edificaciones.

### **c. Categoría de espacio**

Los requisitos establecidos se aplican para dos tipos de espacios: espacios habitables (acondicionado residencial) y espacios no habitables (semi-climatizado).

Un espacio al ser contado como habitable deberá cumplir con requisitos establecidos para espacios acondicionados al momento de la construcción, independientemente de la aplicación de equipos mecánicos o eléctricos dentro del proyecto<sup>73</sup>.

### **d. Clima**

Se determinará la zona climática para cada ciudad dentro de Ecuador en base al mapa de zonas climáticas del Ecuador para identificar los requisitos a cumplir la envolvente de la edificación. Para la presente investigación se tomarán en cuenta

---

<sup>72</sup> Tomado de la NEC-HS-Eficiencia energética, <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/NEC-HS-EE-Final.pdf>

<sup>73</sup> Además se debe considerar que de acuerdo al método grados – días, en donde se considera una temperatura base, por su ubicación geográfica, las horas que necesita la edificación de enfriamiento o calefacción pueden variar de un edificio a otro. En este caso las preguntas a resolver son: ¿A qué temperatura se calienta el edificio?, ¿Cuál es la ganancia de calor interna promedio?, esto deberá ser mediado también con las propiedades térmicas del edificio, el programa de calefacción / refrigeración y, las influencias externas como las ganancias solares.

los requisitos para la zona climática 3 a la cual pertenece la ciudad de Loja, según la NEC-HS-EE detallados en la Tabla 50.

**Tabla 50. Requisitos de envolvente para la zona climática 3<sup>74</sup>**

Elementos opacos	Habitable				No habitable	
	Climatizado		No climatizado		Montaje máximo (W/m <sup>2</sup> K)	Valor mín. R de aislamiento (m <sup>2</sup> K/W)
	Montaje máximo (W/m <sup>2</sup> K)	Valor mín. R de aislamiento (m <sup>2</sup> K/W)	Montaje máximo (W/m <sup>2</sup> K)	Valor mín. R de aislamiento (m <sup>2</sup> K/W)		
<b>Techos</b>	U-0,273	R-3,5	U-2,9	R-0,89	U-4,7	R-0,21
<b>Paredes, sobre nivel de terreno</b>	U-0,592	R-1,7	U-2,35	R-0,36	U-5,46	NA
<b>Paredes, bajo nivel de terreno</b>	C-6,473	NA	C-6,473	NA	C-6,473	NA
<b>Pisos</b>	U-0,496	R-1,5	U-3,2	R-0,31	U-3,4	NA
<b>Puertas opacas</b>	U-2,839	NA	U-2,6	-	-	-
<b>Ventanas</b>	Transmitancia máxima	Montaje máximo SHGC	Transmitancia máxima	Montaje máximo SHGC	Transmitancia máxima	Montaje máximo SHGC
<b>Área traslúcida vertical ≥45°</b>	U-3,69	SHGC-0,25	U-5,78	SHGC-0,82	U-6,81	NA
<b>Área traslúcida horizontal &lt;45°</b>	U-6,64	SHGC-0,36	U-6,64	SHGC-0,36	U-11,24	NA

Fuente: Recuperado de NEC-HS-EE, p.15, recopilado de ASHRAE 90.1-2007 "EFICIENCIA ENREGÉTICA PARA EDIFICIOS EXCEPTO BAJAS EDIFICACIONES RESIDENCIALES"

#### e. Cerramientos opacos

Para evaluar superficies opacas a excepción de puertas, el cumplimiento se constatará mediante uno de los siguientes métodos:

<sup>74</sup> Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, Ecuador, 2018

U= Coeficiente global de transferencia de calor, W/m<sup>2</sup>K

R= Valor mínimo de resistencia térmica, m<sup>2</sup>K/W

SHGC=

**f. Valor mínimo nominal R de aislamiento:**

Para determinar el cumplimiento de las exigencias prescriptivas se deben utilizar los valores referenciales de la resistencia térmica de los materiales de aislamiento utilizados en la envolvente<sup>75</sup>.

**g. Valor máximo U de todo el paquete constructivo:**

Para determinar el cumplimiento de las exigencias prescriptivas se deben utilizar los valores referenciales U de los paquetes constructivos que se incluyen en el Anexo D de la NEC-HS-EE<sup>76</sup>.

**h. Aislamiento y reflectividad del techo**

Para evaluar el techo de la edificación en el caso de estudio se cumplirá con valores de aislamiento especificados en la Tabla 50. de acuerdo con la zona climática 3 en la que se encuentra la ciudad de Loja.

El SRI se debe calcular de acuerdo con la norma ASTM E1980 para condiciones con velocidad de aire moderada (2 – 6 m/s) utilizando un coeficiente de convección de 11.9 W/m<sup>2</sup>°C. El SRI debe ser obtenido en base a la reflectancia solar medida conforme a la norma ASTM E1918 o ASTM C1549, y la emitancia térmica medida conforme a la norma ASTM E408 o ASTM C1371. Los valores de reflectancia solar y emitancia térmica deben ser proporcionados y certificados por el fabricante<sup>77</sup>.

**i. Aislamiento de muros sobre el nivel de terreno**

Todos los muros sobre el nivel de terreno deben cumplir con los valores de aislamiento especificados en la Tabla 50. Cuando parte de un muro está sobre y

---

<sup>75</sup> Referirse a las tablas del Anexo C y del Anexo D de la NEC-HS-EE (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, Ecuador, 2018).

<sup>76</sup> Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, Ecuador, 2018).

<sup>77</sup> Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, Ecuador, 2018).

bajo el nivel de terreno, todo el muro de ese piso o nivel debe ser aislado ya sea por la parte exterior o interior, en base a las siguientes condicionantes:

- Si se considera aislamiento en la parte interior, el muro debe ser aislado de acuerdo con los requisitos de la categoría muros sobre el nivel de terreno de la Tabla 50.
- Si se considera aislamiento en la parte exterior o aislamiento integral del muro, la parte del muro bajo el nivel de terreno debe ser aislada de acuerdo con los requerimientos de la categoría de muros bajo el nivel de terreno, y la parte del muro sobre el nivel de terreno debe ser aislada de acuerdo con los requisitos de la categoría de muros sobre el nivel de terreno de la Tabla 50.

#### **j. Aislamiento de muros bajo el nivel de terreno**

Los muros bajo el nivel de terreno deben tener un valor mínimo R nominal de aislamiento que no sea menor que los valores especificados en la Tabla 50.

#### **k. Elementos translúcidos**

Los elementos translúcidos deben cumplir con los valores establecidos de factor máximo U y coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC), especificados en la Tabla 50.

#### **l. Área de elementos translúcidos**

El área total de elementos translúcidos verticales debe ser menor que el 40% del área neta del muro.

El área total de elementos translúcidos horizontales (lucernarios o tragaluces) debe ser menor que el 5% del área neta del techo.

Factor máximo U de elementos translúcidos. Los elementos translúcidos deben tener un factor máximo U que no sea mayor que los valores especificados en las tablas 4 a 9 para el área de elementos translúcidos apropiada<sup>78</sup>.

**Tabla 51. Guía para el cálculo del factor mínimo R**

	Material	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) W/(m.K)
<b>Estructura</b>	acero	47-58
	madera laminada	0,047
	hormigón armado	1,40
	hormigón pretensado	1,40
<b>Envolturas de alto rendimiento (paredes y cielo raso)</b>	ladrillo	0,80
	paneles hormigón prefabricado	1,40
	piedra	0,55
	paneles fibrocemento	0,93
	paneles yeso-cartón	0,29-0,58
<b>Envolturas de alto rendimiento (techo)</b>	vidrio	0,81
	cielo raso yeso-cartón	0,29-0,58
	cielo raso enduelado de madera	0,209
<b>Pisos</b>	cubierta con material de tierra	0,76
	hormigón pulido	1,70
<b>Aislantes</b>	porcelanato	0,81
	fibra vidrio	0,035
	lana mineral	0,036-0,040
	espuma de poliuretano	0,029

*Fuente: Recuperado de NEC-HS-EE, p.12*

### m. Propiedades higrótérmicas de materiales de construcción

Las propiedades necesarias para realizar un análisis térmico de una edificación son la conductividad térmica ( $\lambda$ ), calor específico ( $C_p$ ) y la densidad ( $d$ ). Estos parámetros pueden ser usados en cálculos manuales o en programas de simulación energética de edificaciones para analizar el comportamiento térmico de la vivienda como una herramienta de prediseño para arquitectos e ingenieros<sup>79</sup>. En la NEC-HS-EE encontramos la tabla de propiedades térmicas de materiales creada

<sup>78</sup> Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, 2018).

<sup>79</sup> Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, 2018

a partir de datos internacionales<sup>80</sup> y otras bases de información sobre materiales de construcción, detalladas en la Tabla 52.

**Tabla 52. Propiedades térmicas de los materiales a partir de la revisión literaria**

Tipo de material	Material	$\lambda$ (W/m.K)	Cp (J/kg K)	d (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Piedra</b>	Piedra – piedra compacta	3.49	840	2880
	Madera laminada	3.50	880	2750
	Hormigón armado	1.83	712	2200
<b>Asbestos, hormigón, bloques de hormigón</b>	Hormigón	1.49	837	2220
	Concreto de mediana densidad	1.35	1000	1800
	Hormigón armado	1.63	1050	2400
	Asbesto	0.36	1050	1500
	Fibro cemento	0.93	1250	2000
	Bloque de concreto	0.62	840	1040
	Concreto muy baja densidad	0.05	-	305
	Bloque de concreto	0.49	-	-
	Bloque hormigón celular vapor L	0.35	-	600
	Bloque hormigón celular vapor M	0.41	-	800
	Bloque hueco hormigón L	0.44	-	1000
	Bloque hormigón celular vapor P	0.47	-	1000
	Bloque hueco hormigón M	0.49	-	1200
	Bloque hueco hormigón P	0.56	-	1400
	Bloque hormigón macizo	0.33	1050	1000
	Bloque hormigón ligero	0.56	1050	1400
	<b>Materiales aislantes</b>	Lana mineral (panel)	0.042	1030
Lana mineral (manta/rollo)		0.038	1030	25
Poliestireno expandido (EPS)		0.04	1450	15
Poliestireno extruido (XEPS)		0.035	1400	40
Espuma de poliuretano		0.025	1400	30
Espuma de urea formaldehído (UF)		0.04	1400	10
Fibra de vidrio (panel)		0.046 a 0.048	800	7.5 a 8.2
		0.036 a 0.037	800	32 a 37
Lana de roca o lana de escoria (panel)		0.033 a 0.035	800	45
Celulosa en spray para cavidades en paredes		0.039 a 0.040	-	26 a 42
<b>Ladrillos, adobes</b>	Fibra de vidrio en spray para cavidades en paredes o áticos	0.039 a 0.042	-	16
		0.033 a 0.037	-	29 a 37
	Ladrillo común	0.80	840	1800
	Ladrillo de sílice	1.07	-	1900
	Ladrillo de magnesita	2.68	1130	2000

<sup>80</sup> como la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, la base de datos de origen británico que está incluida en la librería del programa de simulación energética Design Builder

	Ladrillo macizo	0.87	1330	1800
	Ladrillo aireado	0.30	840	1000
	Ladrillo quemado	0.85	840	1500
	Ladrillo	0.75	880	1730
	Adobe	0.58	850	1280
	Ladrillo hueco	0.49	-	1200
	Ladrillo perforado	0.76	-	1600
	Ladrillo sílice calcáreo	0.79	-	1600
	Ladrillo cerámico macizo	0.87	-	1800
<b>Yesos</b>	Gypsum	0.25	1000	900
	Placas de escayola	0.3	-	800
	Mortero de yeso	0.76	-	1000
	Placas de yeso	0.29 – 0.58	-	600-1200
	Yeso	0.81	837	1800
<b>Madera</b>	Maderas frondosas	0.21	-	800
	Maderas de coníferas	0.14	-	600
	Contrachapado	0.14	-	600
	Plywood 19.0 mm	0.10	1880	450
	Tablero de partículas de madera	0.14	1700	600
	Tablero aglomerado de partículas	0.08	-	650
	Tableros de fibra orientada-OSB	0.13	1700	650
	Madera de roble	0.19	2390	700
	Madera	0.13	1381	840
	Madera de abedul	0.14	1884	650
	Madera de alerce	0.11	1298	650
	Madera de arce	0.34	1591	750
	Madera de chopo	0.15	1340	650
	Madera de fresno	0.34	1591	750
	Madera de haya	0.14	1340	800
	Madera de haya blanca	0.14	1340	700
	Madera de pino	0.16	1298	650
	Madera de pino blanco	0.11	1465	550
	Madera de roble	0.20	2386	850
	<b>Plásticos</b>	Policarbonato	0.19-0.22	1200

Nota:  $\lambda$  es la conductividad térmica de los materiales;  $C_p$  es el calor específico del material;  $d$  es la densidad del material

Fuente: Recuperado de NEC-HS-EE, p.12

Es importante tener en cuenta que al momento de constituir los paquetes constructivos si existiesen otros materiales que no constan en la Tabla 52. se debe calcular su transmitancia térmica (U) conforme a la norma ISO 6946:2007, “Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation Method”, con el fin de demostrar el cumplimiento de las exigencias

prescriptivas, proceso con el que se ha seguido para su determinación de forma experimental con el caso del LTT.

## Evaluación del Rendimiento Energético

Caso base sin aplicación del material

### Valores Clave

#### Datos generales del proyecto

Nombre Proyecto:	VIVIENDA TI...
Ubicación Ciudad:	
Latitud:	4° 0' 4" S
Longitud:	79° 14' 8" O
Altitud:	2206,00 m
Origen de Datos Climáticos:	Loja ...1).tm2
Fecha de Evaluación:	8/6/2023 21:41

#### Coefficientes de transfer.

Valor U	[W/m²K]
Promedio Edificio Entero:	<b>3,59</b>
Pavimentos:	<b>2,83 - 2,83</b>
Externo:	<b>2,90 - 4,59</b>
Subterráneo:	--
Aberturas:	<b>2,11 - 7,09</b>

#### Datos de geometría del edificio

Área bruta de la planta:	<b>97,61</b>	m²
Área de Suelo Tratado:	<b>88,56</b>	m²
Área del Envolverte Exterior:	<b>266,38</b>	m²
Volumen ventilado:	<b>237,61</b>	m³
Ratio acristalamiento:	<b>2</b>	%

#### Valores Anuales Específicos

Energía calorífica Neta:	<b>1,63</b>	kWh/m²a
Energía refrigerante Neta:	<b>0,00</b>	kWh/m²a
Energía Neta Total:	<b>1,63</b>	kWh/m²a
Consumo de Energía:	<b>220,47</b>	kWh/m²a
Consumo de Combustible:	<b>220,47</b>	kWh/m²a
Energía Primaria:	<b>442,72</b>	kWh/m²a
Coste Combustible:	<b>14,44</b>	USD/m²a
Emisión CO <sub>2</sub> :	<b>43,06</b>	kg/m²a

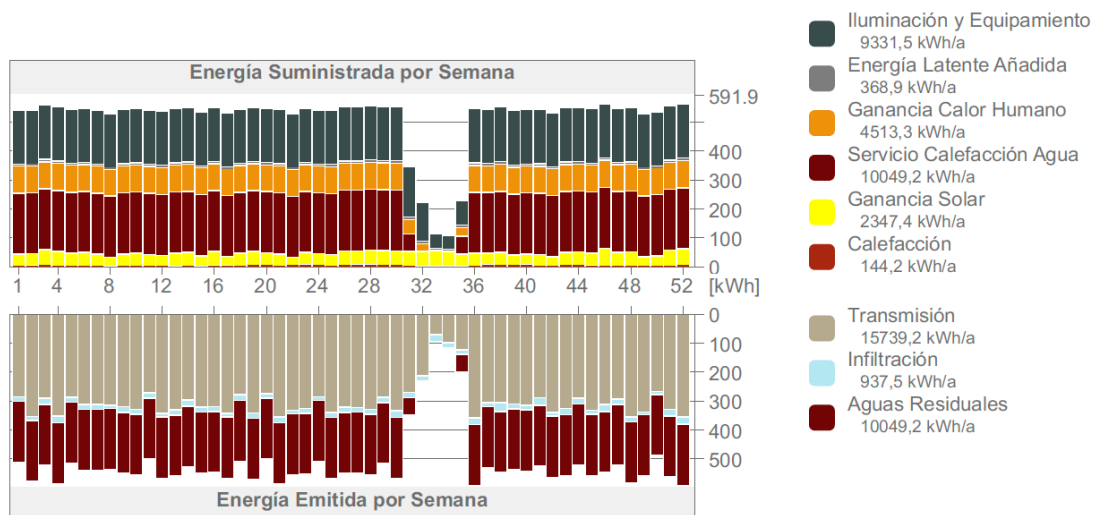
#### Datos de rendimiento de la estructura

Infiltración a 50Pa:	<b>15,53</b>	AAH
----------------------	--------------	-----

#### Días-Grado

Calefacción (HDD):	<b>1069,75</b>
Refrigeración (CDD):	<b>2189,40</b>

### Balance Energético del Proyecto



### Bloques Térmicos

Bloque Térmico	Zonas Asignado	Perfil de Operación	Área Bruta de la m²	Volumen m³
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	1	COCINA SALA R...	15,78	37,70
002 DORMITORIOS	2	DORMITORIOS 1	19,45	45,36
003 BAÑOS	1	BAÑOS RESIDE...	2,23	4,89
001 CASAS	2	Residencial	60,15	149,66
<b>Total:</b>	<b>6</b>		<b>97,61</b>	<b>237,61</b>

## Evaluación del Rendimiento Energético

[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]

### 001 COCINA SALA RESIDENCIAL - Valores Clave

<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	15,78	m <sup>2</sup>	Pavimentos:		2,83 - 2,83	
Área suelo tratado	14,38	m <sup>2</sup>	Externo:		2,90 - 4,59	
Área de estruct. compleja:	41,69	m <sup>2</sup>	Subterráneo:		-	
Volumen ventilado:	37,70	m <sup>3</sup>	Aberturas:		2,11 - 6,27	
Ratio acristalamiento:	8	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 05):	11,72	°C	Calefacción:		144,16	kWh
Media Anual:	20,90	°C	Refrigeración:		0,00	kWh
Max. (18:00 Dic 20):	38,99	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	182	hrs/a	Calefacción (07:00 Ene 16):		1,54	kW
Refrigeración:	291	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):		0,00	kW

### 002 DORMITORIOS - Valores Clave

<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	19,45	m <sup>2</sup>	Pavimentos:		2,83 - 2,83	
Área suelo tratado	17,31	m <sup>2</sup>	Externo:		2,90 - 4,59	
Área de estruct. compleja:	50,24	m <sup>2</sup>	Subterráneo:		-	
Volumen ventilado:	45,36	m <sup>3</sup>	Aberturas:		6,27 - 7,09	
Ratio acristalamiento:	6	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 05):	10,81	°C	Calefacción:		0,00	kWh
Media Anual:	19,98	°C	Refrigeración:		0,00	kWh
Max. (18:00 May 21):	34,57	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	948	hrs/a	Calefacción (01:00 Ene 01):		0,00	kW
Refrigeración:	269	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):		0,00	kW

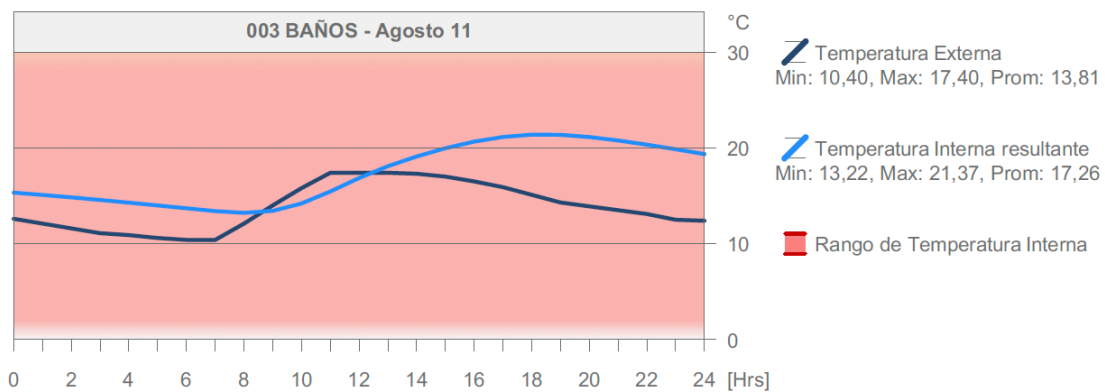
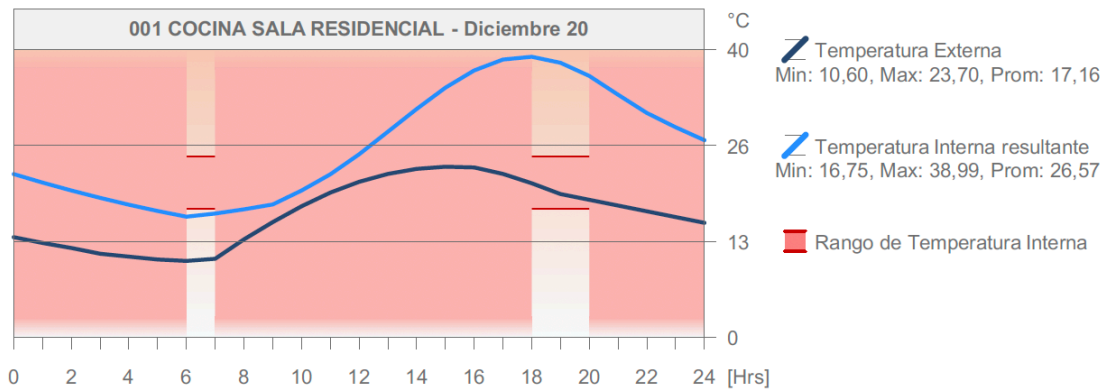
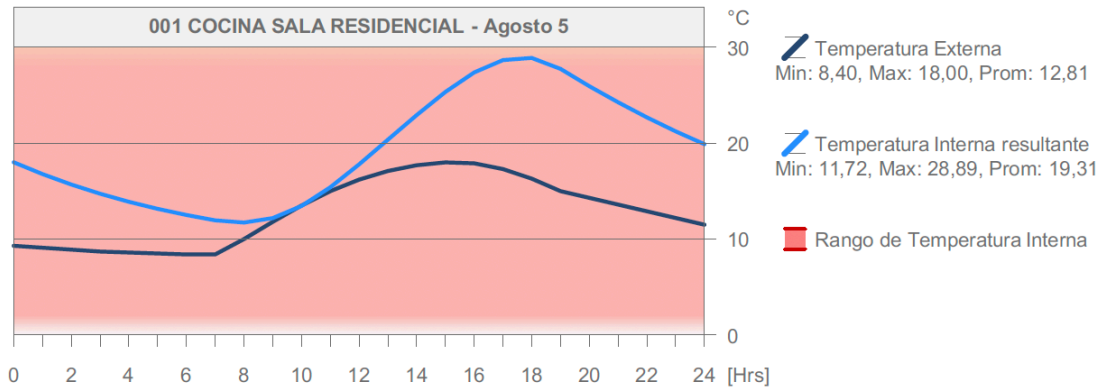
### 003 BAÑOS - Valores Clave

<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	2,23	m <sup>2</sup>	Pavimentos:		2,83 - 2,83	
Área suelo tratado	1,87	m <sup>2</sup>	Externo:		2,90 - 4,59	
Área de estruct. compleja:	4,71	m <sup>2</sup>	Subterráneo:		-	
Volumen ventilado:	4,89	m <sup>3</sup>	Aberturas:		-	
Ratio acristalamiento:	0	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 11):	13,22	°C	Calefacción:		0,00	kWh
Media Anual:	21,17	°C	Refrigeración:		0,00	kWh
Max. (21:00 Dic 20):	35,63	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	1	hrs/a	Calefacción (01:00 Ene 01):		0,00	kW
Refrigeración:	404	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):		0,00	kW

## Evaluación del Rendimiento Energético

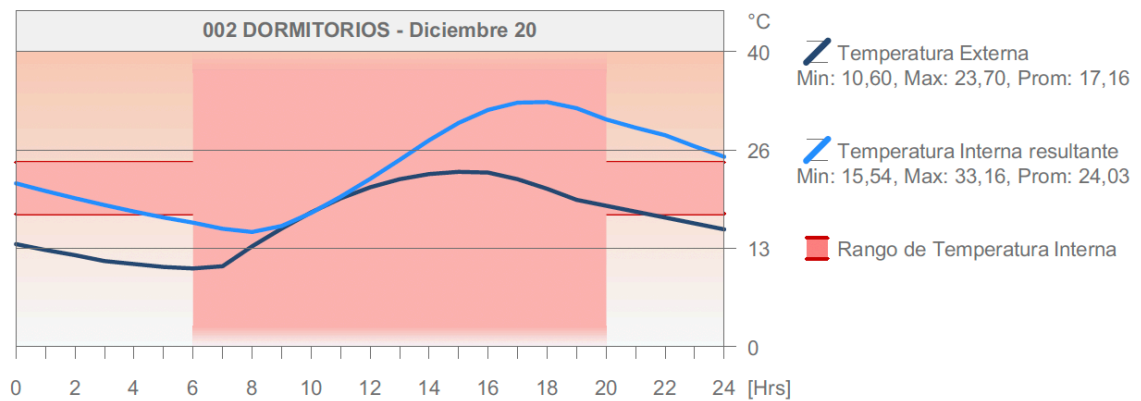
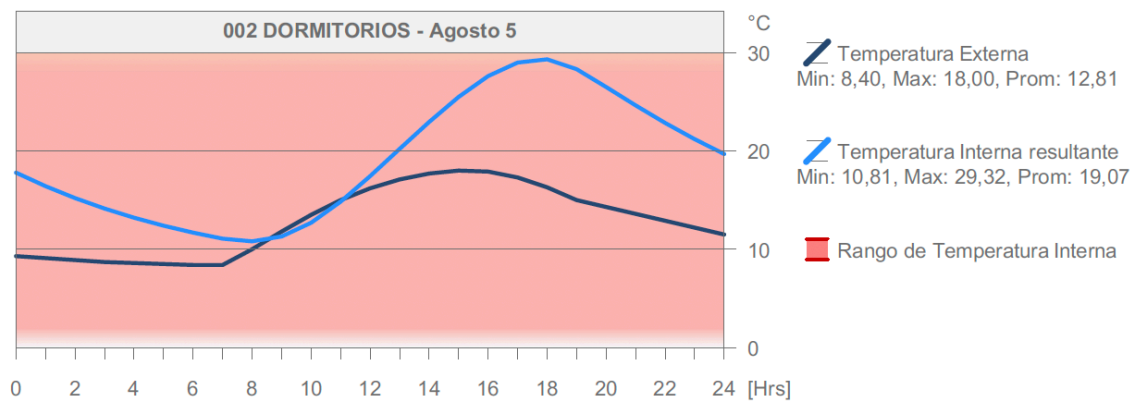
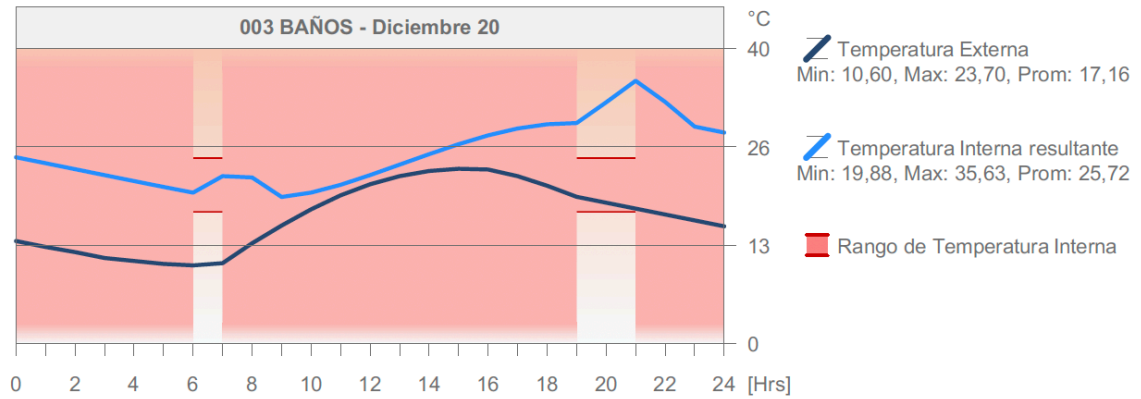
[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]

### Perfil de Temperatura Diaria



## Evaluación del Rendimiento Energético

[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]



## Evaluación del Rendimiento Energético

[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]

### Datos de Diseño HVAC

Bloque Térmico	Demanda de		Demanda de		Interno	
	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Min. [°C]	Max. [°C]
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	144	1.5 07:00 Ene 16	0	0.0 --	11.7 08:00 Ago 05	39.0 18:00 Dic 20
002 DORMITORIOS	0	0.0 --	0	0.0 --	10.8 08:00 Ago 05	34.6 18:00 May 21
003 BAÑOS	0	0.0 --	0	0.0 --	13.2 08:00 Ago 11	35.6 21:00 Dic 20
001 CASAS	0	0.0 --	0	0.0 --	9.7 07:00 Ago 05	42.7 17:00 Dic 20
<b>Todos los Bloques Térmicos:</b>	<b>144</b>	<b>1.5</b> 07:00 Ene 16	<b>0</b>	<b>0.0</b> --		

Número de Horas Usadas en el Año:

Calefacción: 259 hrs

Refrigeración: 0 hrs

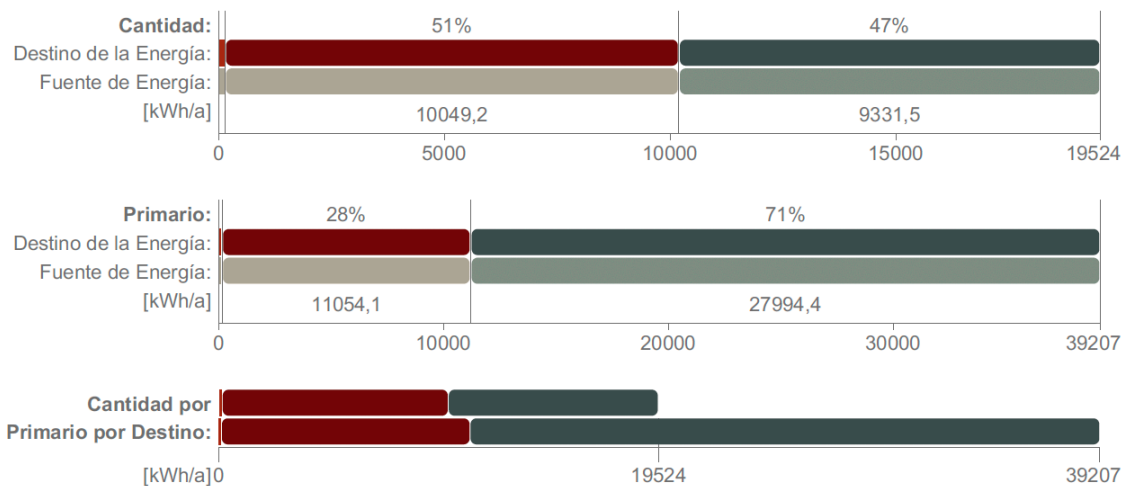
Horas de carga no satisfechas en el año:

Calefacción: 3227 hrs

Refrigeración: 725 hrs

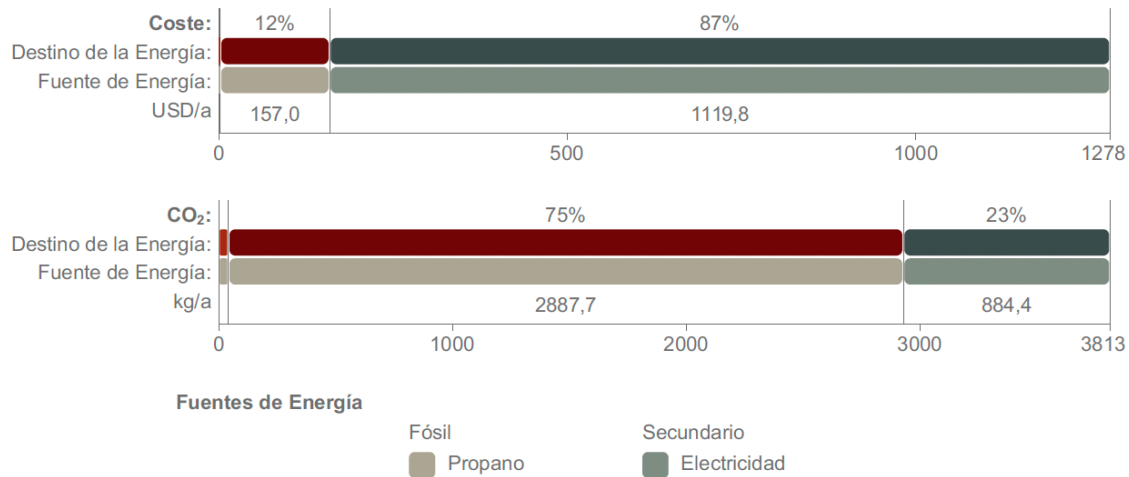
### Consumo de energía por Objetivos

Nombre Destino	Energía			CO <sub>2</sub> Emisión kg/a
	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a	Coste USD/a	
Calefacción	144	158	2	41
Refrigeración	0	0	0	0
Servicio de Agua Caliente	10049	11054	156	2887
Ventiladores	0	0	0	0
Iluminación & aparatos	9331	27994	1119	884
<b>Total:</b>	<b>19524</b>	<b>39207</b>	<b>1278</b>	<b>3813</b>



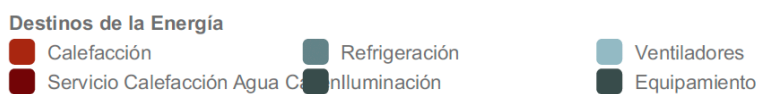
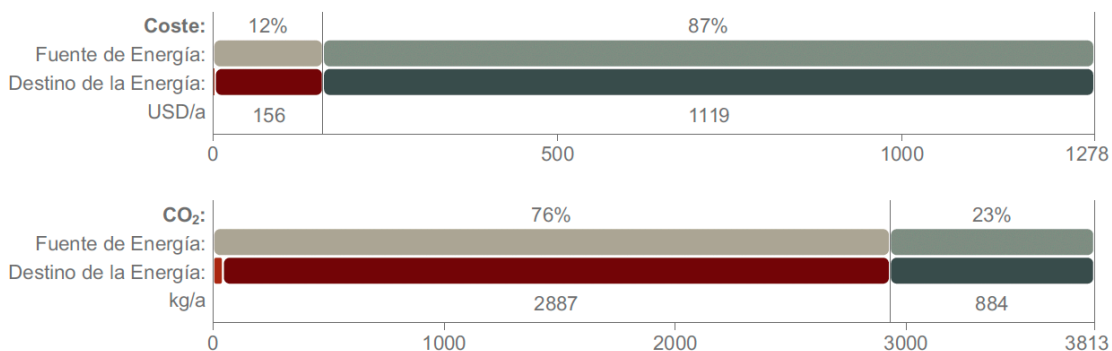
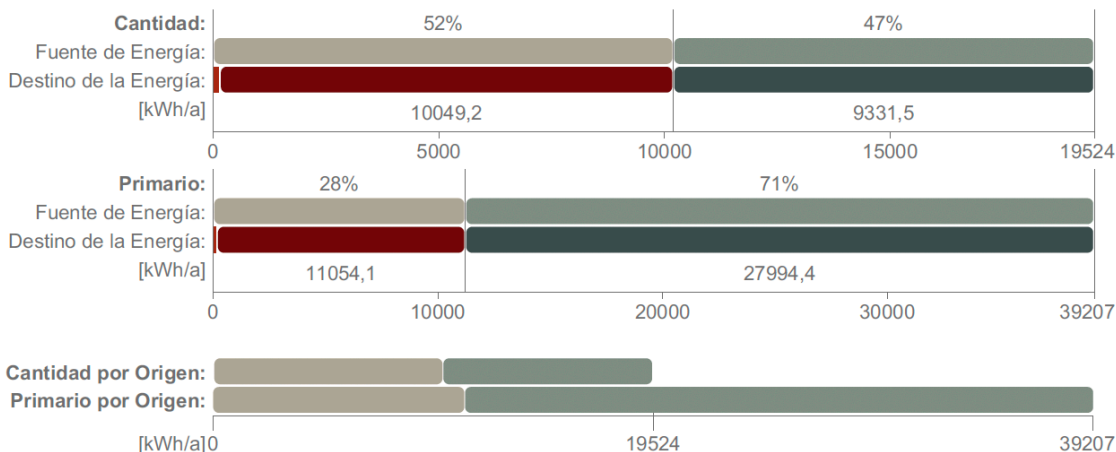
## Evaluación del Rendimiento Energético

[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]



### Consumo de Energía por Fuentes

Tipo Fuente	Energía				Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
	Nombre de Origen	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a	Coste USD/a	
Fósil	Propano	10193	11212	159	2929
Secundario	Electricidad	9331	27994	1119	884
Total:		<b>19524</b>	<b>39207</b>	<b>1278</b>	<b>3813</b>



### Impacto Medioambiental

Tipo Fuente	Nombre de Origen	Energía Primaria kWh/a	Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
Fósil	Propano	11212	2929
Secundario	Electricidad	27994	884
Total:		<b>39206</b>	<b>3813</b>


## Evaluación del Rendimiento Energético

[Número de Proyecto] [Nombre Proyecto]


### Resumen del Sistema Renovable de Edificación

Sistema de Construcción	Energía Anual Generada kWh	Coste de la Energía USD
Energía Renovable LEED Total:	0	0
Total:	0	0


### Rendimiento de Base

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
--


### Costes de Energía Base

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
--

### Tabla de Clasificación del Rendimiento

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
--

### Consumos y Ahorros de Energía

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
--

### Mensajes de Aviso

Alertas	
Propuesta de Diseño	
1	Horas de carga no satisfechas, Calefacción:3227, Refrigeración:725

## Evaluación del Rendimiento Energético

Aplicación de LTT - Fachaleta - 4cm

### Valores Clave

#### Datos generales del proyecto

Nombre Proyecto:	APLICACIÓN ...
Ubicación Ciudad:	
Latitud:	4° 0' 4" S
Longitud:	79° 14' 8" O
Altitud:	2206,00 m
Origen de Datos Climáticos:	Loja_A...(1).tm2
Fecha de Evaluación:	13/6/2023 20:21

#### Coefficientes de transfer.

Valor U	[W/m²K]
Promedio Edificio Entero:	3,57
Pavimentos:	2,83 - 2,83
Externo:	2,60 - 4,59
Subterráneo:	--
Aberturas:	2,11 - 7,09

#### Datos de geometría del edificio

Área bruta de la planta:	97,57	m²
Área de Suelo Tratado:	88,10	m²
Área del Envoltente Exterior:	265,44	m²
Volumen ventilado:	236,41	m³
Ratio acristalamiento:	2	%

#### Valores Anuales Especificos

Energía calorífica Neta:	1,49	kWh/m²a
Energía refrigerante Neta:	0,00	kWh/m²a
Energía Neta Total:	1,49	kWh/m²a
Consumo de Energía:	218,48	kWh/m²a
Consumo de Combustible:	218,48	kWh/m²a
Energía Primaria:	440,67	kWh/m²a
Coste Combustible:	14,42	USD/m²a
Emisión CO <sub>2</sub> :	42,47	kg/m²a

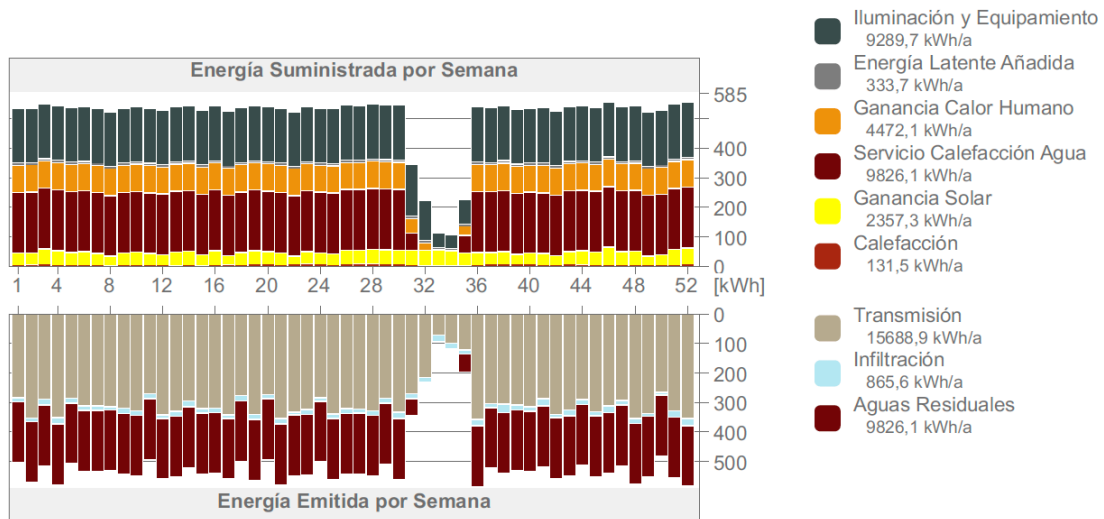
#### Datos de rendimiento de la estructura

Infiltración a 50Pa:	14,70	AAH
----------------------	-------	-----

#### Días-Grado

Calefacción (HDD):	1069,75
Refrigeración (CDD):	2189,40

### Balance Energético del Proyecto



### Bloques Térmicos

Bloque Térmico	Zonas Asignado	Perfil de Operación	Área Bruta de la m²	Volumen m³
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	1	COCINA SALA R...	15,73	37,23
002 DORMITORIOS	2	DORMITORIOS 1	19,47	44,73
003 BAÑOS	1	BAÑOS RESIDE...	2,22	4,78
001 CASAS	2	Residencial	60,15	149,66
<b>Total:</b>	<b>6</b>		<b>97,57</b>	<b>236,41</b>

## Evaluación del Rendimiento Energético

**001 COCINA SALA RESIDENCIAL - Valores Clave**

<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	15,73	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	2,83 - 2,83		
Área suelo tratado	14,20	m <sup>2</sup>	Externo:	2,60 - 4,59		
Área de estruct. compleja:	41,33	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	37,23	m <sup>3</sup>	Aberturas:	2,11 - 6,27		
Ratio acristalamiento:	8	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 05):	11,91	°C	Calfacción:	131,49		kWh
Media Anual:	20,93	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (18:00 Dic 20):	38,70	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calfacción:	171	hrs/a	Calfacción (07:00 Ene 16):	1,48		kW
Refrigeración:	286	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

**002 DORMITORIOS - Valores Clave**

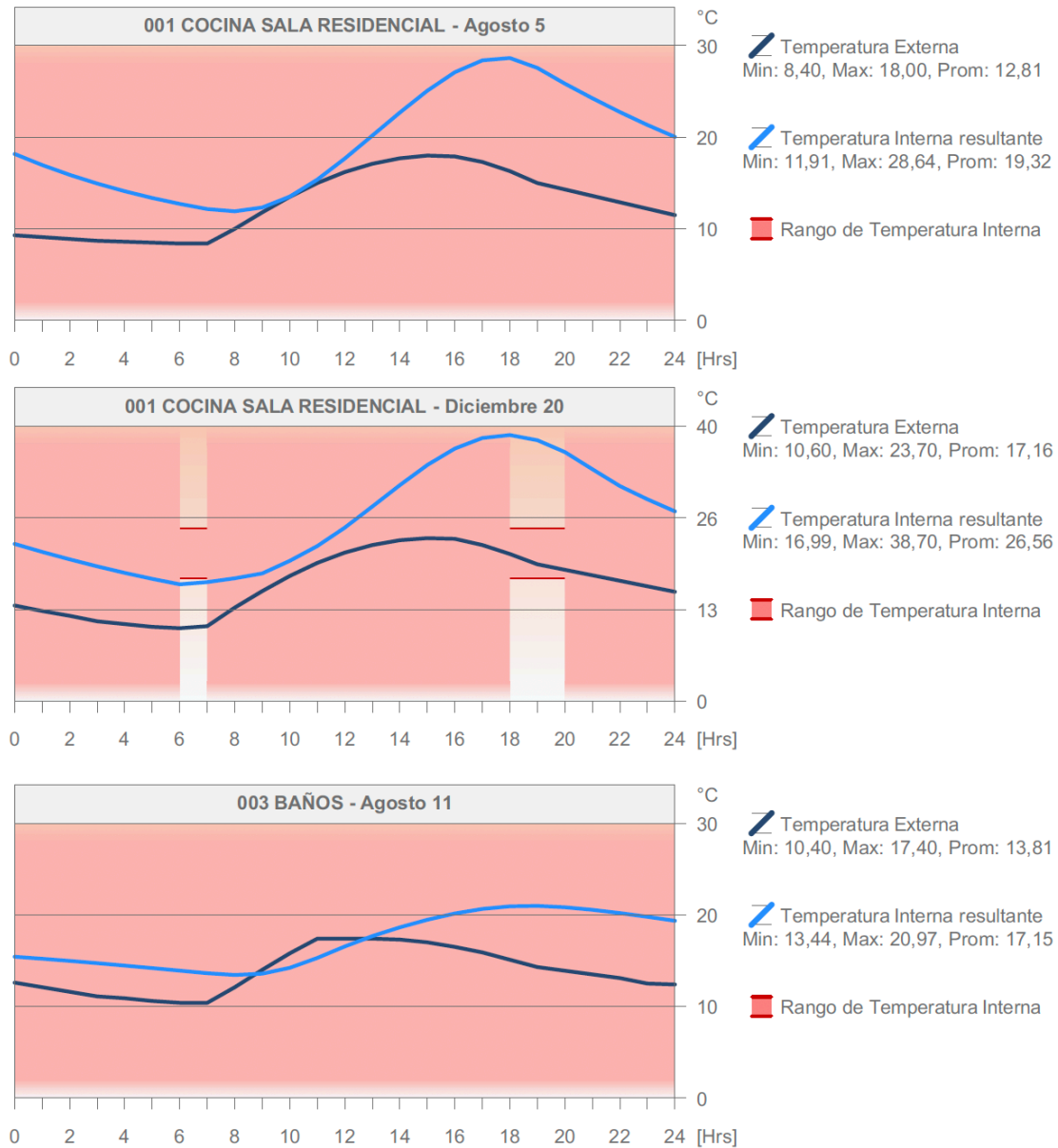
<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	19,47	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	2,83 - 2,83		
Área suelo tratado	17,07	m <sup>2</sup>	Externo:	2,60 - 4,59		
Área de estruct. compleja:	49,80	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	44,73	m <sup>3</sup>	Aberturas:	6,27 - 7,09		
Ratio acristalamiento:	6	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 05):	11,10	°C	Calfacción:	0,00		kWh
Media Anual:	20,01	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (18:00 May 21):	34,21	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calfacción:	863	hrs/a	Calfacción (01:00 Ene 01):	0,00		kW
Refrigeración:	265	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

**003 BAÑOS - Valores Clave**

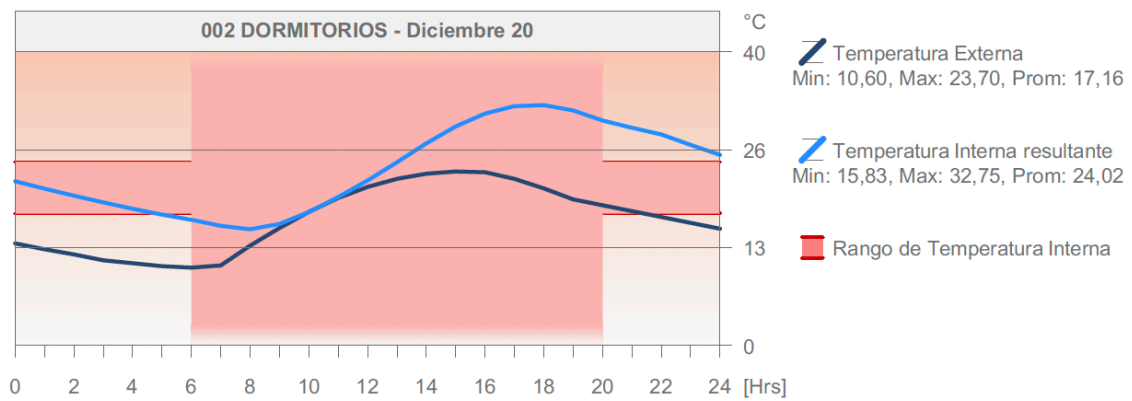
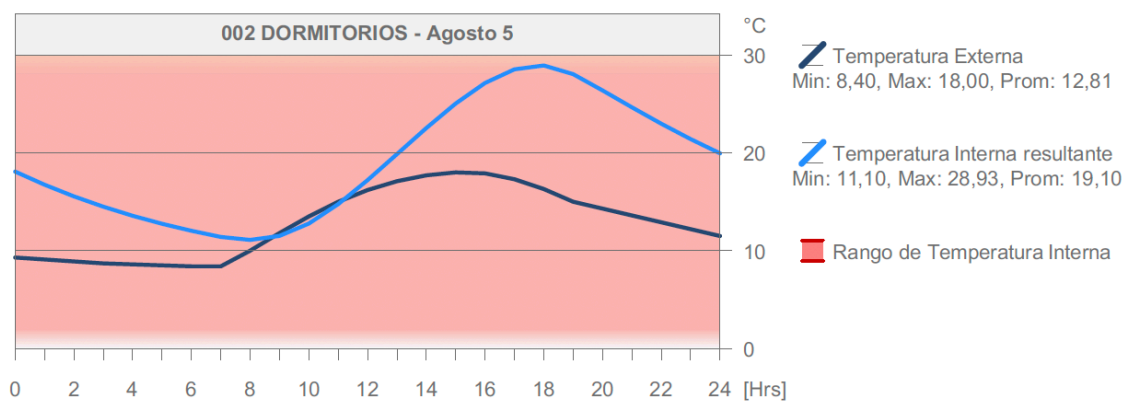
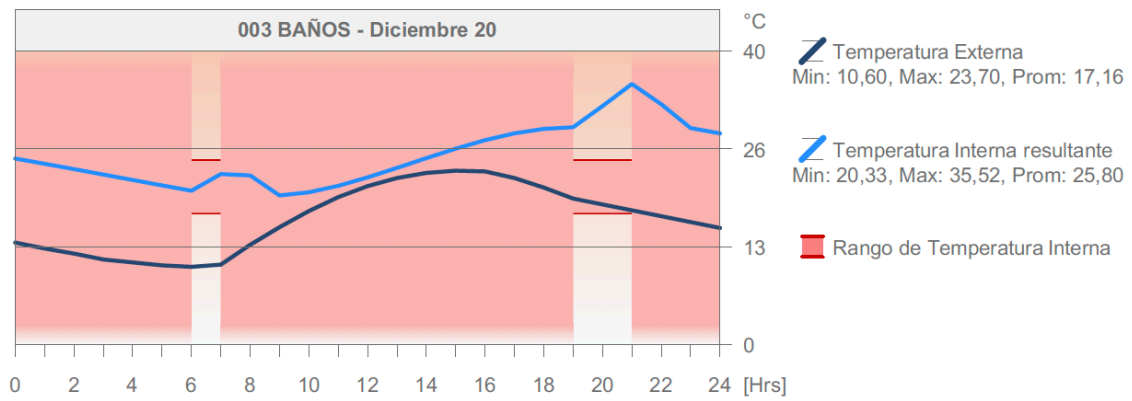
<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	2,22	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	2,83 - 2,83		
Área suelo tratado	1,83	m <sup>2</sup>	Externo:	2,60 - 4,59		
Área de estruct. compleja:	4,56	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	4,78	m <sup>3</sup>	Aberturas:	-		
Ratio acristalamiento:	0	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 11):	13,44	°C	Calfacción:	0,00		kWh
Media Anual:	21,32	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (21:00 Oct 11):	35,59	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calfacción:	1	hrs/a	Calfacción (01:00 Ene 01):	0,00		kW
Refrigeración:	411	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

## Evaluación del Rendimiento Energético

### Perfil de Temperatura Diaria



## Evaluación del Rendimiento Energético



## Evaluación del Rendimiento Energético

## Datos de Diseño HVAC

Bloque Térmico	Demanda de		Demanda de		Interno	
	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Min. [°C]	Max. [°C]
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	131	1.5 07:00 Ene 16	0	0.0 --	11.9 08:00 Ago 05	38.7 18:00 Dic 20
002 DORMITORIOS	0	0.0 --	0	0.0 --	11.1 08:00 Ago 05	34.2 18:00 May 21
003 BAÑOS	0	0.0 --	0	0.0 --	13.4 08:00 Ago 11	35.6 21:00 Oct 11
001 CASAS	0	0.0 --	0	0.0 --	9.7 07:00 Ago 05	42.6 17:00 Dic 20
<b>Todos los Bloques Térmicos:</b>	<b>131</b>	<b>1.5</b> 07:00 Ene 16	<b>0</b>	<b>0.0</b> --		

## Número de Horas Usadas en el Año:

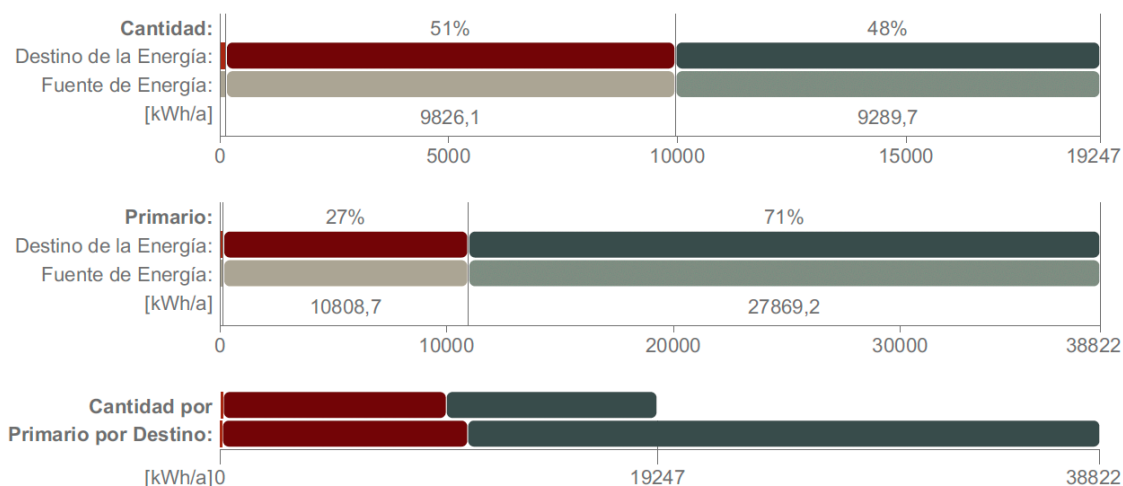
Calefacción: 254 hrs  
Refrigeración: 0 hrs

## Horas de carga no satisfechas en el año:

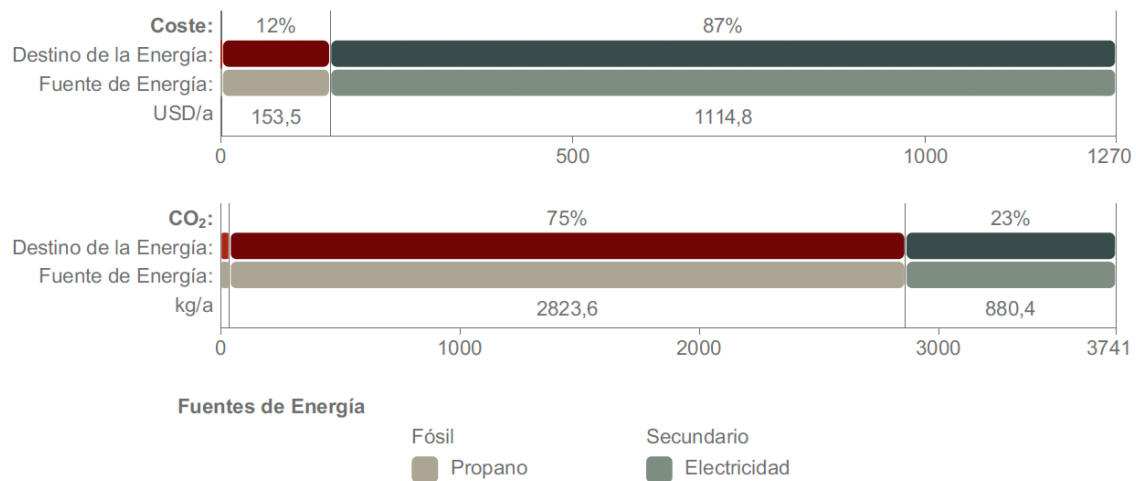
Calefacción: 3230 hrs  
Refrigeración: 727 hrs

## Consumo de energía por Objetivos

Nombre Destino	Energía			CO <sub>2</sub> Emisión kg/a
	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a	Coste USD/a	
Calefacción	131	144	2	37
Refrigeración	0	0	0	0
Servicio de Agua Caliente	9826	10808	153	2823
Ventiladores	0	0	0	0
Iluminación & aparatos	9289	27869	1114	880
<b>Total:</b>	<b>19247</b>	<b>38822</b>	<b>1270</b>	<b>3741</b>



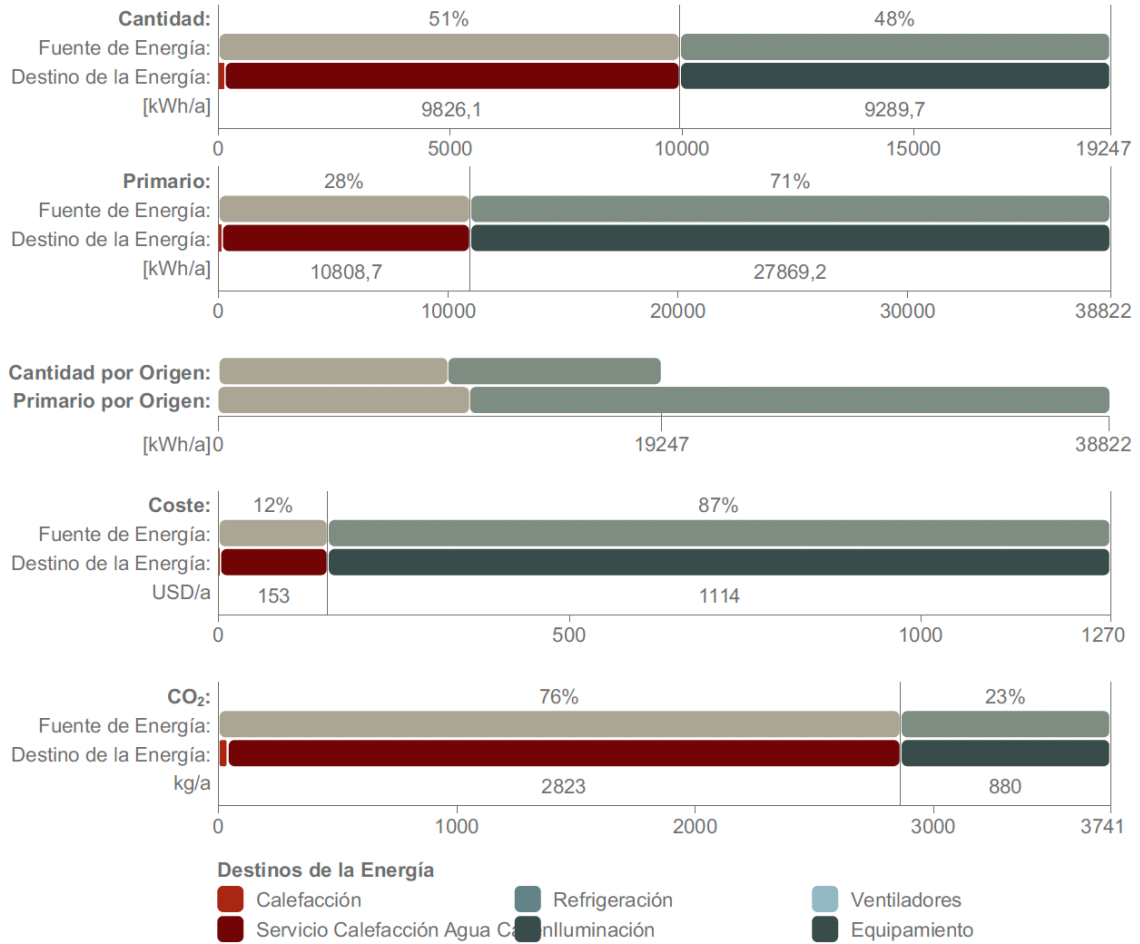
## Evaluación del Rendimiento Energético



## Evaluación del Rendimiento Energético

### Consumo de Energía por Fuentes

Tipo Fuente	Energía			Coste USD/a	Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
	Nombre de Origen	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a		
Fósil	Propano	9957	10953	155	2861
Secundario	Electricidad	9289	27869	1114	880
Total:		<b>19247</b>	<b>38822</b>	<b>1270</b>	<b>3741</b>



### Impacto Medioambiental


Tipo Fuente	Nombre de Origen	Energía Primaria kWh/a	Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
Fósil	Propano	10953	2861
Secundario	Electricidad	27869	880
Total:		<b>38822</b>	<b>3741</b>

## Evaluación del Rendimiento Energético

### Resumen del Sistema Renovable de Edificación

Sistema de Construcción	Energía Anual Generada kWh	Coste de la Energía USD
Energía Renovable LEED Total:	0	0
Total:	0	0


### Rendimiento de Base

 Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Costes de Energía Base

 Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Tabla de Clasificación del Rendimiento

 Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Consumos y Ahorros de Energía

 Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Mensajes de Aviso

Alertas	
Propuesta de Diseño	
1	Horas de carga no satisfechas, Calefacción:3230, Refrigeración:727

## Evaluación del Rendimiento Energético

Aplicación LTT 4cm en pisos

### Valores Clave

#### Datos generales del proyecto

Nombre Proyecto:	APLICACION ...
Ubicación Ciudad:	
Latitud:	4° 0' 4" S
Longitud:	79° 14' 8" O
Altitud:	2206,00 m
Origen de Datos Climáticos:	Loja_A...(1).tm2
Fecha de Evaluación:	13/6/2023 20:30

#### Coefficientes de transfer.

Valor U	[W/m²K]
Promedio Edificio Entero:	3,59
Pavimentos:	--
Externo:	2,90 - 4,59
Subterráneo:	--
Aberturas:	2,11 - 7,09

#### Datos de geometría del edificio

Área bruta de la planta:	97,64	m²
Área de Suelo Tratado:	88,57	m²
Área del Envoltente Exterior:	266,55	m²
Volumen ventilado:	237,65	m³
Ratio acristalamiento:	2	%

#### Valores Anuales Especificos

Energía calorífica Neta:	2,17	kWh/m²a
Energía refrigerante Neta:	0,00	kWh/m²a
Energía Neta Total:	2,17	kWh/m²a
Consumo de Energía:	220,97	kWh/m²a
Consumo de Combustible:	220,97	kWh/m²a
Energía Primaria:	443,24	kWh/m²a
Coste Combustible:	14,45	USD/m²a
Emisión CO <sub>2</sub> :	43,21	kg/m²a

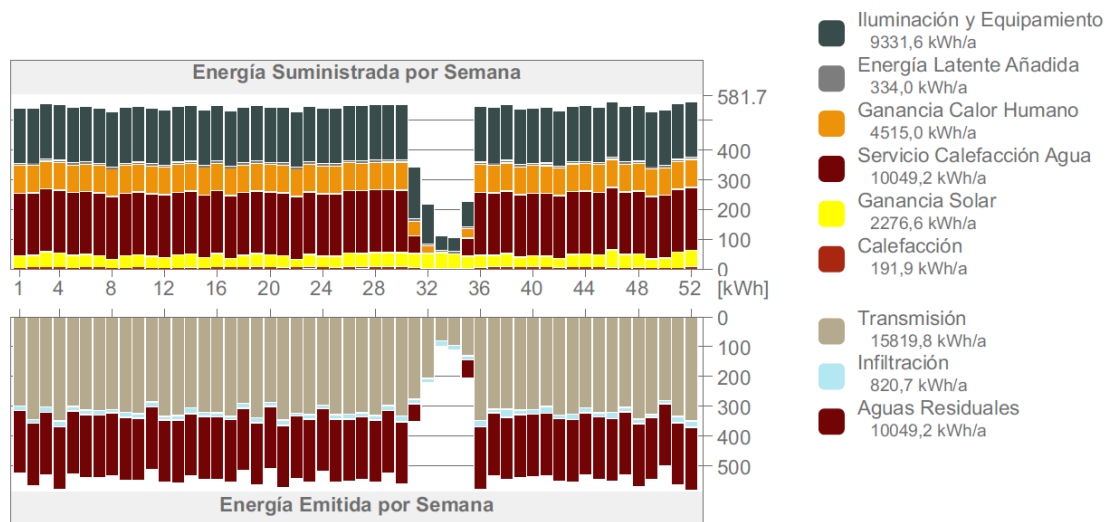
#### Datos de rendimiento de la estructura

Infiltración a 50Pa:	15,54	AAH
----------------------	-------	-----

#### Días-Grado

Calefacción (HDD):	1069,75
Refrigeración (CDD):	2189,40

### Balance Energético del Proyecto



### Bloques Térmicos

Bloque Térmico	Zonas Asignado	Perfil de Operación	Área Bruta de la m²	Volumen m³
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	1	COCINA SALA R...	15,78	37,70
002 DORMITORIOS	2	DORMITORIOS 1	19,48	45,40
003 BAÑOS	1	BAÑOS RESIDE...	2,23	4,89
001 CASAS	2	Residencial	60,15	149,66
<b>Total:</b>	<b>6</b>		<b>97,64</b>	<b>237,65</b>

## Evaluación del Rendimiento Energético

**001 COCINA SALA RESIDENCIAL - Valores Clave**

<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	15,78	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	-		
Área suelo tratado	14,38	m <sup>2</sup>	Externo:	2,90 - 4,59		
Área de estruct. compleja:	41,64	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	37,70	m <sup>3</sup>	Aberturas:	2,11 - 6,27		
Ratio acristalamiento:	8	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (07:00 Ago 05):	10,25	°C	Calefacción:	191,89		kWh
Media Anual:	20,65	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (17:00 Dic 20):	41,15	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	258	hrs/a	Calefacción (07:00 Ene 16):	1,62		kW
Refrigeración:	319	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

**002 DORMITORIOS - Valores Clave**

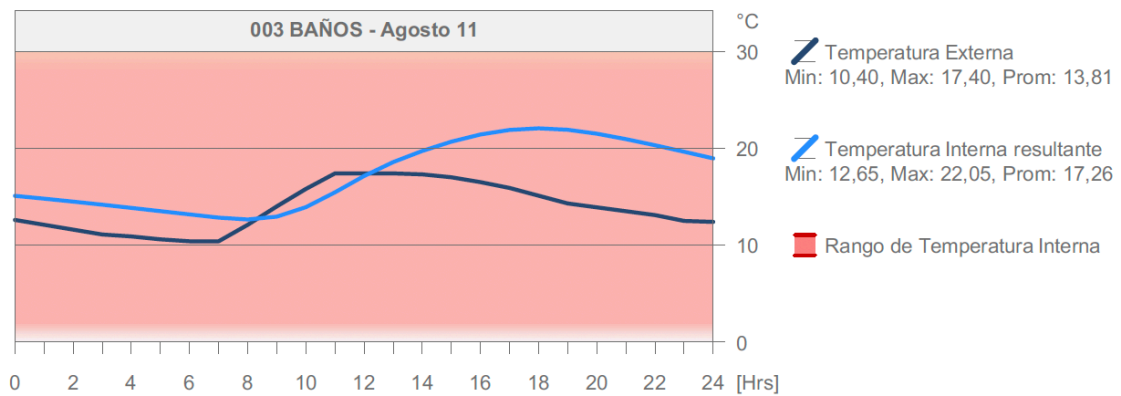
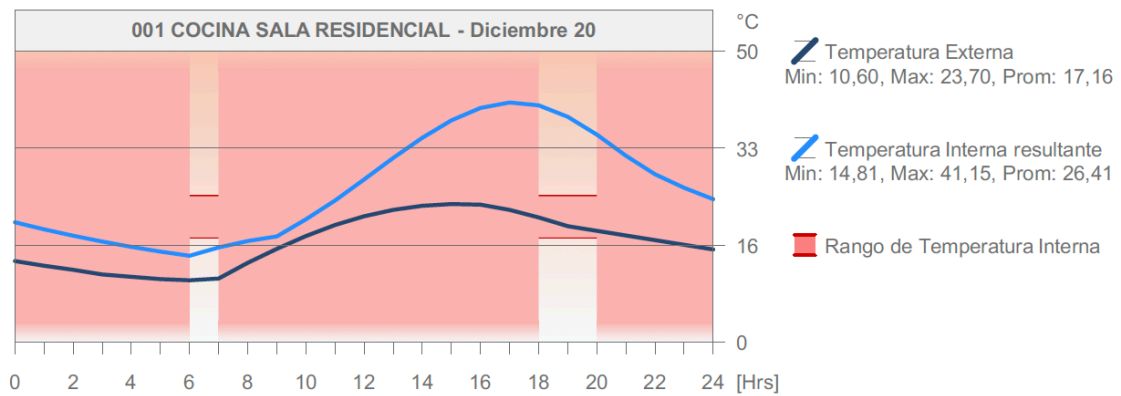
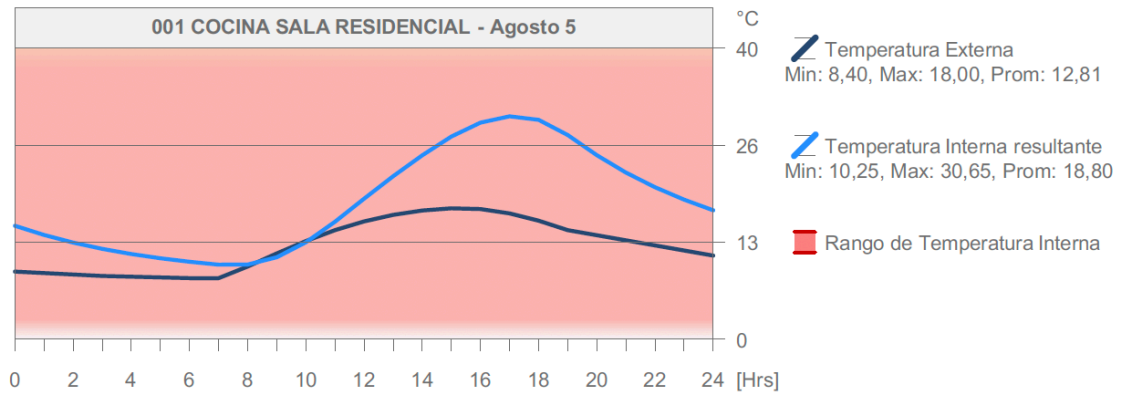
<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	19,48	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	-		
Área suelo tratado	17,32	m <sup>2</sup>	Externo:	2,90 - 4,59		
Área de estruct. compleja:	50,55	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	45,40	m <sup>3</sup>	Aberturas:	6,27 - 7,09		
Ratio acristalamiento:	6	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 05):	9,24	°C	Calefacción:	0,00		kWh
Media Anual:	19,68	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (17:00 May 21):	36,08	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	1463	hrs/a	Calefacción (01:00 Ene 01):	0,00		kW
Refrigeración:	240	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

**003 BAÑOS - Valores Clave**

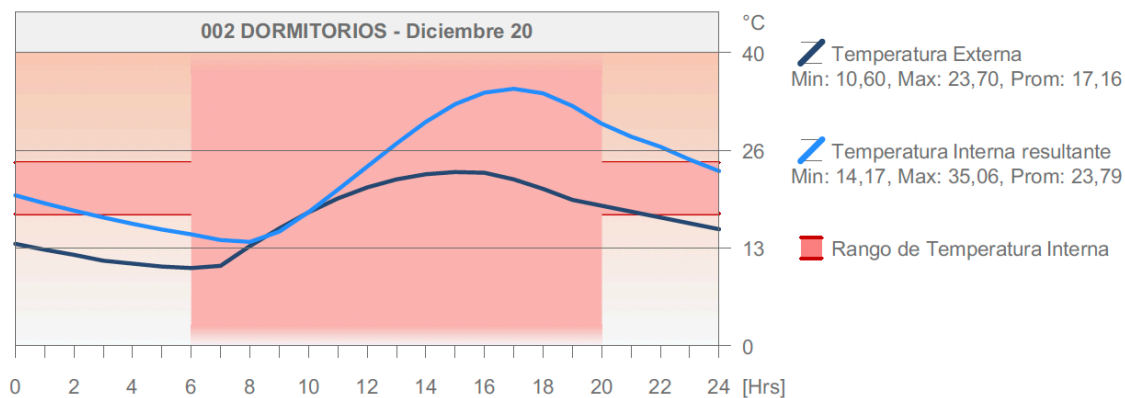
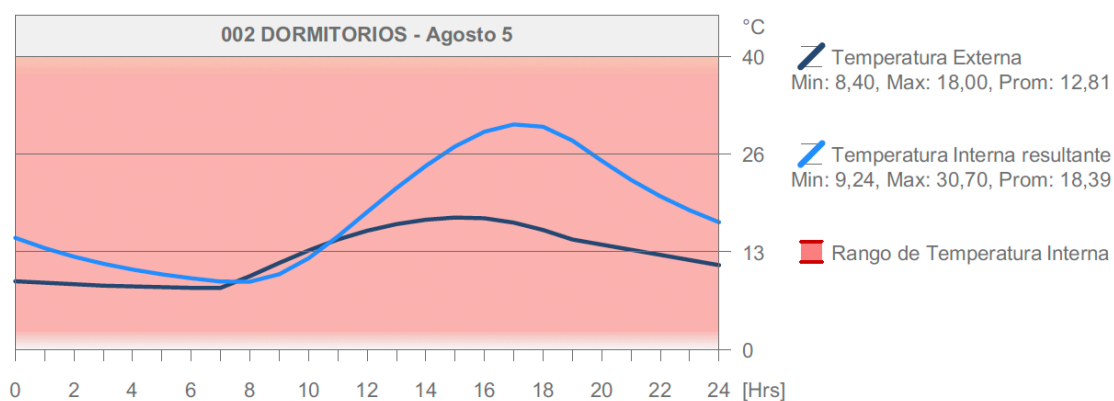
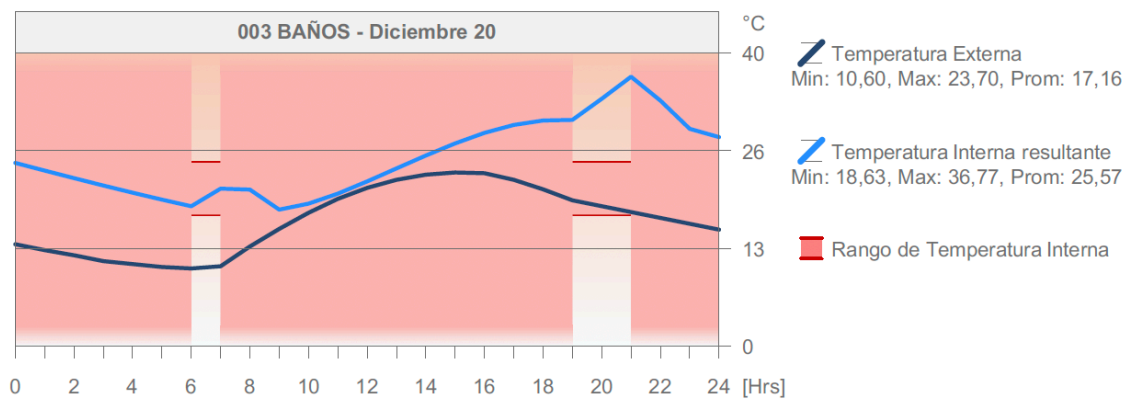
<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	2,23	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	-		
Área suelo tratado	1,87	m <sup>2</sup>	Externo:	2,90 - 4,59		
Área de estruct. compleja:	4,60	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	4,89	m <sup>3</sup>	Aberturas:	-		
Ratio acristalamiento:	0	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (09:00 Ago 02):	12,44	°C	Calefacción:	0,00		kWh
Media Anual:	20,89	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (21:00 Dic 20):	36,77	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	5	hrs/a	Calefacción (01:00 Ene 01):	0,00		kW
Refrigeración:	437	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

## Evaluación del Rendimiento Energético

### Perfil de Temperatura Diaria



## Evaluación del Rendimiento Energético



## Evaluación del Rendimiento Energético

## Datos de Diseño HVAC

Bloque Térmico	Demanda de		Demanda de		Interno	
	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Min. [°C]	Max. [°C]
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	191	1.6 07:00 Ene 16	0	0.0 --	10.3 07:00 Ago 05	41.2 17:00 Dic 20
002 DORMITORIOS	0	0.0 --	0	0.0 --	9.2 08:00 Ago 05	36.1 17:00 May 21
003 BAÑOS	0	0.0 --	0	0.0 --	12.4 09:00 Ago 02	36.8 21:00 Dic 20
001 CASAS	0	0.0 --	0	0.0 --	9.6 07:00 Ago 05	40.3 17:00 Dic 20
<b>Todos los Bloques Térmicos:</b>	<b>191</b>	<b>1.6</b> 07:00 Ene 16	<b>0</b>	<b>0.0</b> --		

## Número de Horas Usadas en el Año:

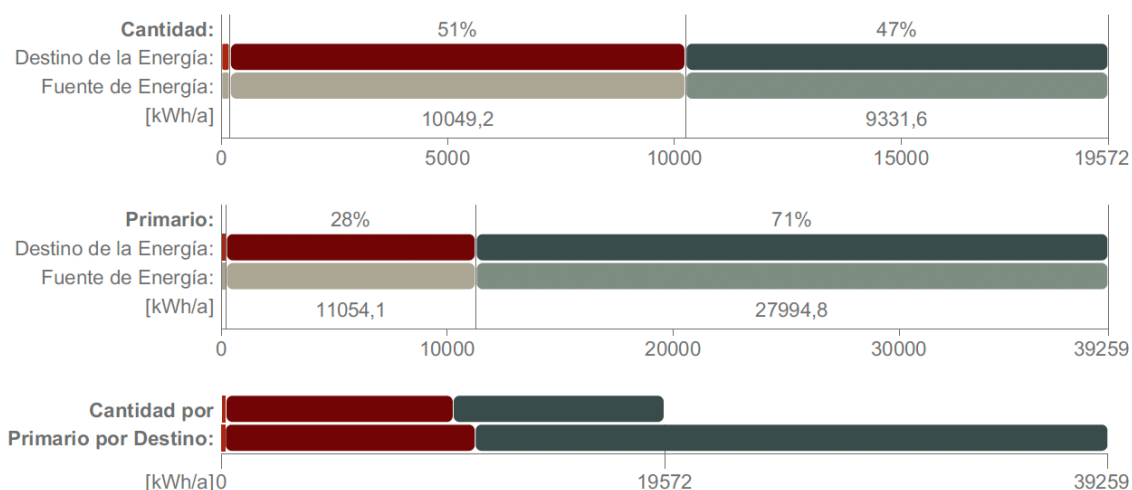
Calefacción: 290 hrs  
Refrigeración: 0 hrs

## Horas de carga no satisfechas en el año:

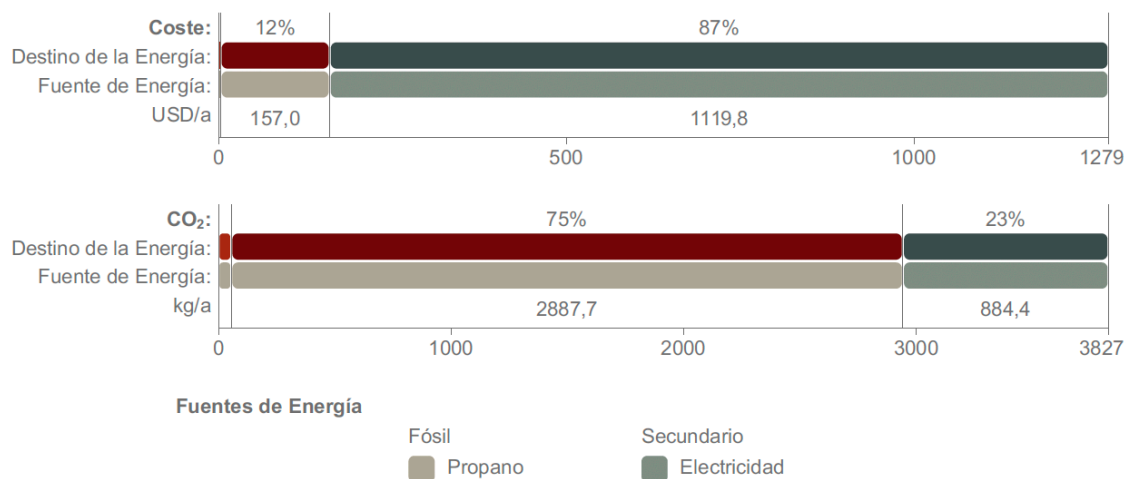
Calefacción: 3370 hrs  
Refrigeración: 782 hrs

## Consumo de energía por Objetivos

Nombre Destino	Energía			CO <sub>2</sub> Emisión kg/a
	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a	Coste USD/a	
Calefacción	191	211	2	55
Refrigeración	0	0	0	0
Servicio de Agua Caliente	10049	11054	156	2887
Ventiladores	0	0	0	0
Iluminación & aparatos	9331	27994	1119	884
<b>Total:</b>	<b>19572</b>	<b>39259</b>	<b>1279</b>	<b>3827</b>



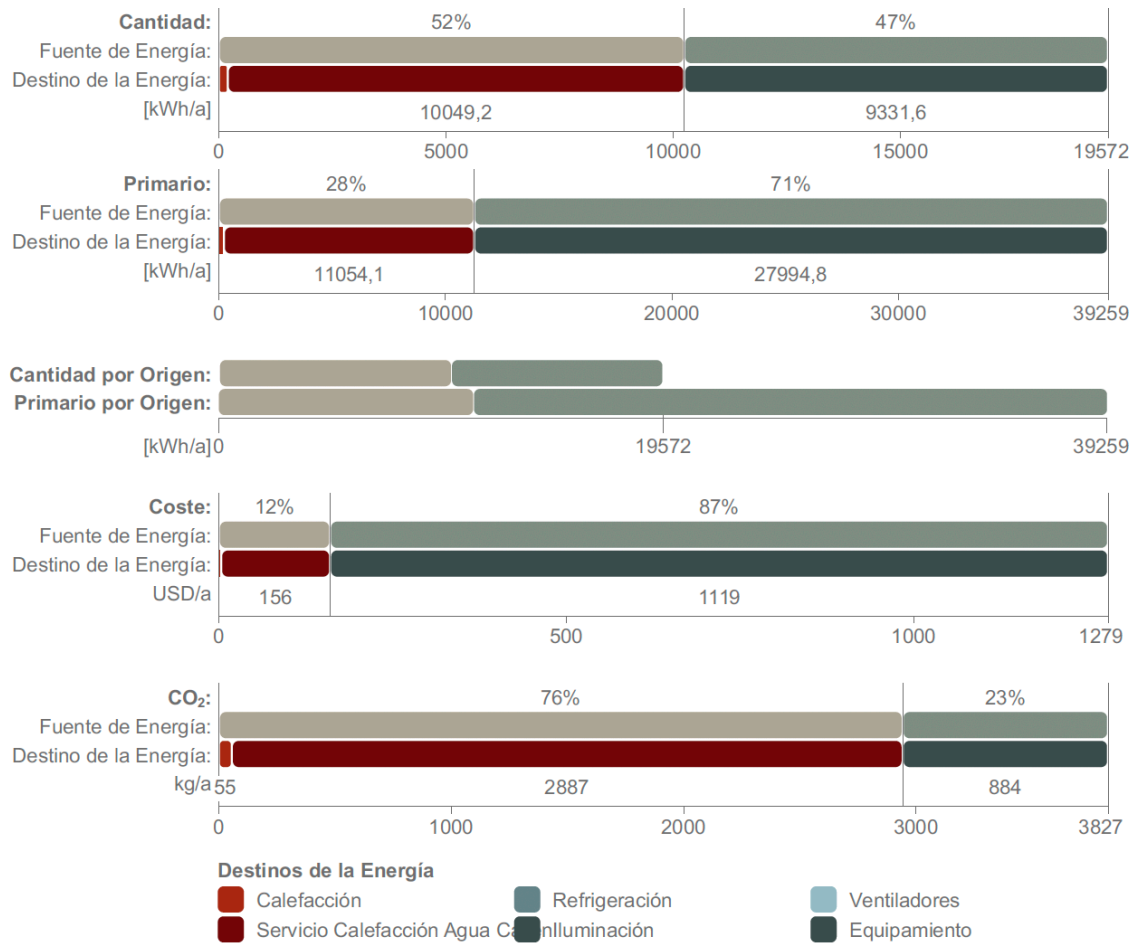
## Evaluación del Rendimiento Energético



## Evaluación del Rendimiento Energético

### Consumo de Energía por Fuentes

Tipo Fuente	Energía				Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
	Nombre de Origen	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a	Coste USD/a	
Fósil	Propano	10241	11265	159	2942
Secundario	Electricidad	9331	27994	1119	884
Total:		<b>19572</b>	<b>39259</b>	<b>1279</b>	<b>3827</b>



### Impacto Medioambiental


Tipo Fuente	Nombre de Origen	Energía Primaria kWh/a	Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
Fósil	Propano	11265	2942
Secundario	Electricidad	27994	884
Total:		<b>39259</b>	<b>3826</b>

## Evaluación del Rendimiento Energético


### Resumen del Sistema Renovable de Edificación

Sistema de Construcción	Energía Anual Generada kWh	Coste de la Energía USD
Energía Renovable LEED Total:	0	0
Total:	0	0

### Rendimiento de Base

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
--

### Costes de Energía Base

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
--

### Tabla de Clasificación del Rendimiento

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
---

### Consumos y Ahorros de Energía

 Los Datos Están Incompletos Se Requiere Definir un Edificio de Referencia
--

### Mensajes de Aviso

Alertas	
Propuesta de Diseño	
1	Horas de carga no satisfechas, Calefacción:3370, Refrigeración:782

## Evaluación del Rendimiento Energético

Aplicación de LTT 4cm, en envoltente y en pisos

### Valores Clave

#### Datos generales del proyecto

Nombre Proyecto:	APLICACIÓN ...
Ubicación Ciudad:	
Latitud:	4° 0' 4" S
Longitud:	79° 14' 8" O
Altitud:	2206,00 m
Origen de Datos Climáticos:	Loja_A...(1).tm2
Fecha de Evaluación:	13/6/2023 20:26

#### Coefficientes de transfer.

Valor U	[W/m²K]
Promedio Edificio Entero:	3,57
Pavimentos:	2,70 - 2,70
Externo:	2,60 - 4,59
Subterráneo:	--
Aberturas:	2,11 - 7,09

#### Datos de geometría del edificio

Área bruta de la planta:	97,57	m²
Área de Suelo Tratado:	88,10	m²
Área del Envoltente Exterior:	265,15	m²
Volumen ventilado:	236,41	m³
Ratio acristalamiento:	2	%

#### Valores Anuales Específicos

Energía calorífica Neta:	1,51	kWh/m²a
Energía refrigerante Neta:	0,00	kWh/m²a
Energía Neta Total:	1,51	kWh/m²a
Consumo de Energía:	218,50	kWh/m²a
Consumo de Combustible:	218,50	kWh/m²a
Energía Primaria:	440,69	kWh/m²a
Coste Combustible:	14,42	USD/m²a
Emisión CO <sub>2</sub> :	42,48	kg/m²a

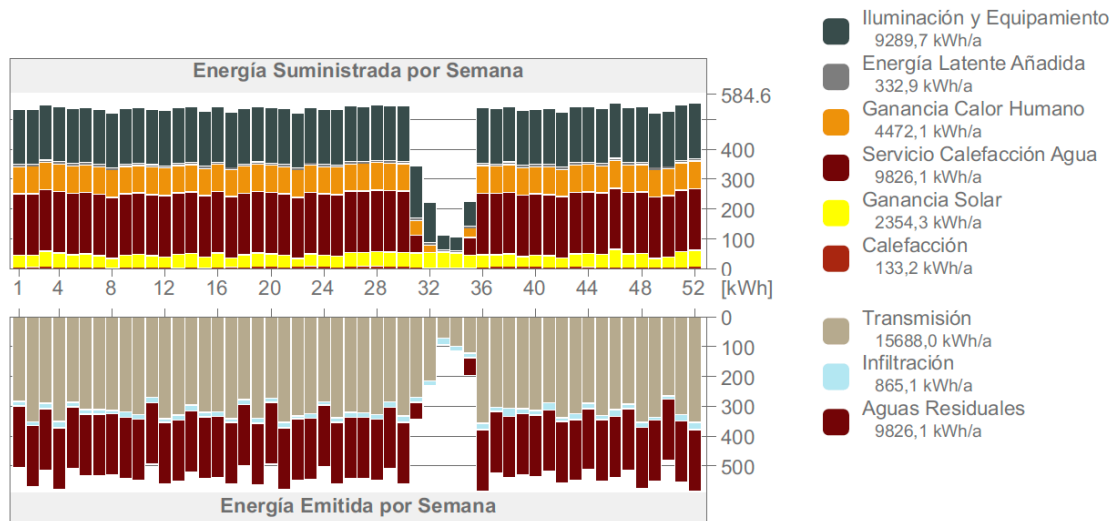
#### Datos de rendimiento de la estructura

Infiltración a 50Pa:	14,69	AAH
----------------------	-------	-----

#### Días-Grado

Calefacción (HDD):	1069,75
Refrigeración (CDD):	2189,40

### Balance Energético del Proyecto



### Bloques Térmicos

Bloque Térmico	Zonas Asignado	Perfil de Operación	Área Bruta de la m²	Volumen m³
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	1	COCINA SALA R...	15,73	37,23
002 DORMITORIOS	2	DORMITORIOS 1	19,47	44,73
003 BAÑOS	1	BAÑOS RESIDE...	2,22	4,78
001 CASAS	2	Residencial	60,15	149,66
<b>Total:</b>	<b>6</b>		<b>97,57</b>	<b>236,41</b>

## Evaluación del Rendimiento Energético

**001 COCINA SALA RESIDENCIAL - Valores Clave**

<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	15,73	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	2,70	- 2,70	
Área suelo tratado	14,20	m <sup>2</sup>	Externo:	2,60	- 4,59	
Área de estruct. compleja:	41,22	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	37,23	m <sup>3</sup>	Aberturas:	2,11	- 6,27	
Ratio acristalamiento:	8	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 05):	11,85	°C	Calefacción:	133,25		kWh
Media Anual:	20,93	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (18:00 Dic 20):	38,88	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	176	hrs/a	Calefacción (07:00 Ene 16):	1,48		kW
Refrigeración:	290	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

**002 DORMITORIOS - Valores Clave**

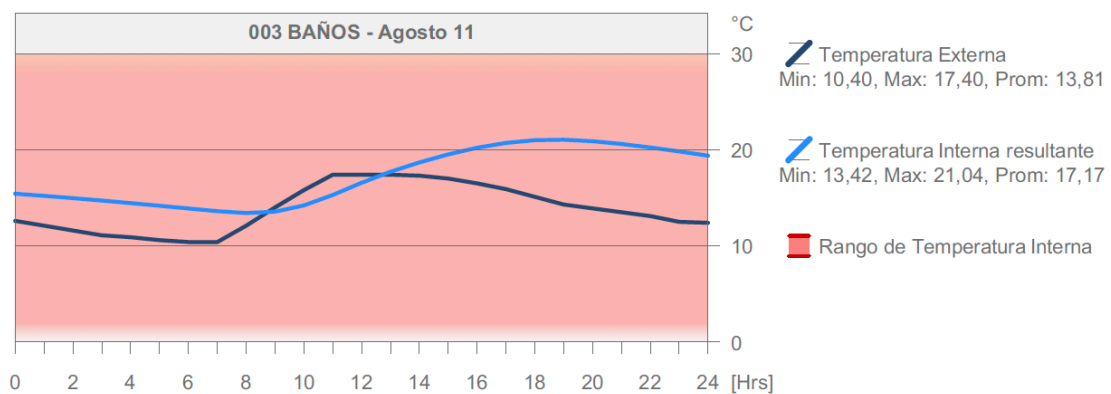
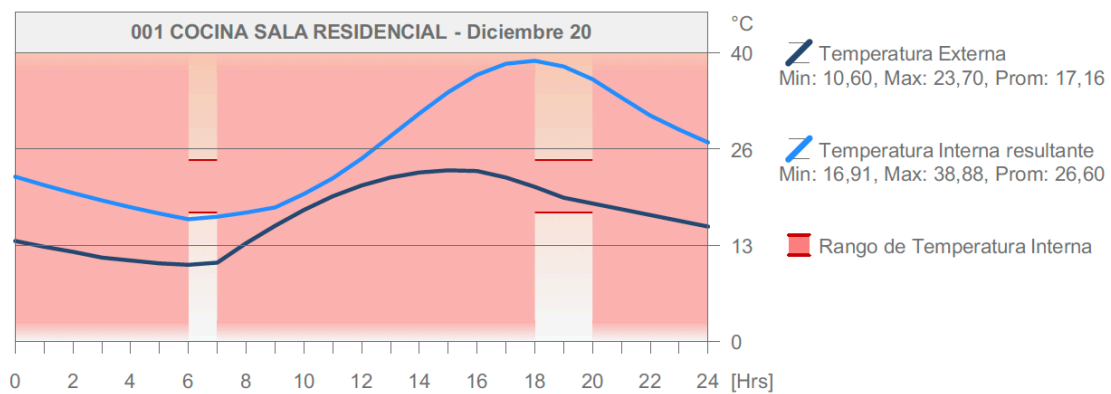
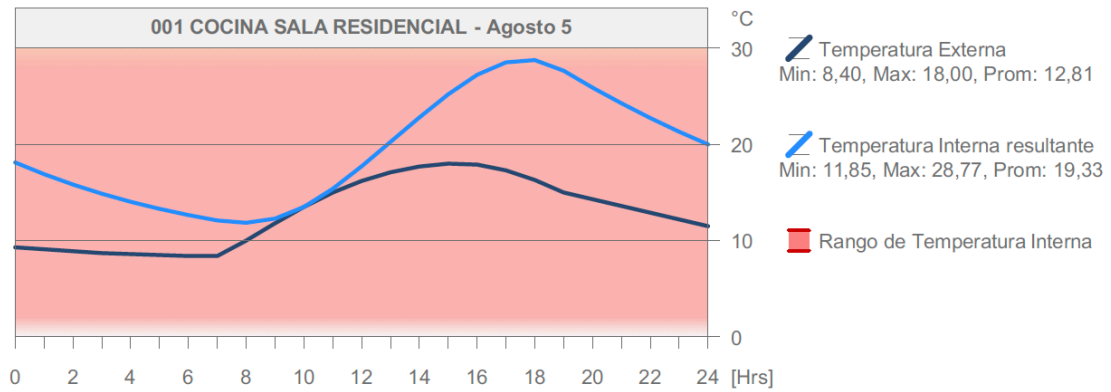
<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	19,47	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	2,70	- 2,70	
Área suelo tratado	17,07	m <sup>2</sup>	Externo:	2,60	- 4,59	
Área de estruct. compleja:	49,64	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	44,73	m <sup>3</sup>	Aberturas:	6,27	- 7,09	
Ratio acristalamiento:	6	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 05):	11,03	°C	Calefacción:	0,00		kWh
Media Anual:	20,01	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (18:00 May 21):	34,33	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	872	hrs/a	Calefacción (01:00 Ene 01):	0,00		kW
Refrigeración:	267	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

**003 BAÑOS - Valores Clave**

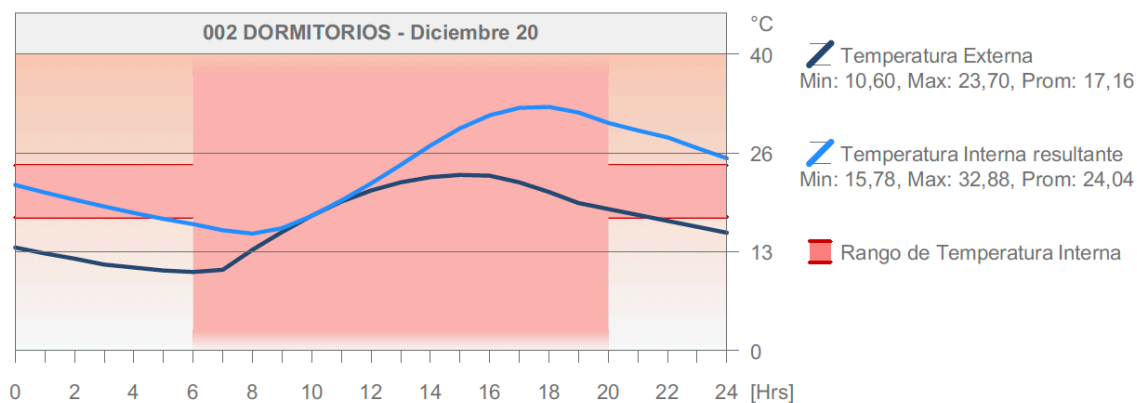
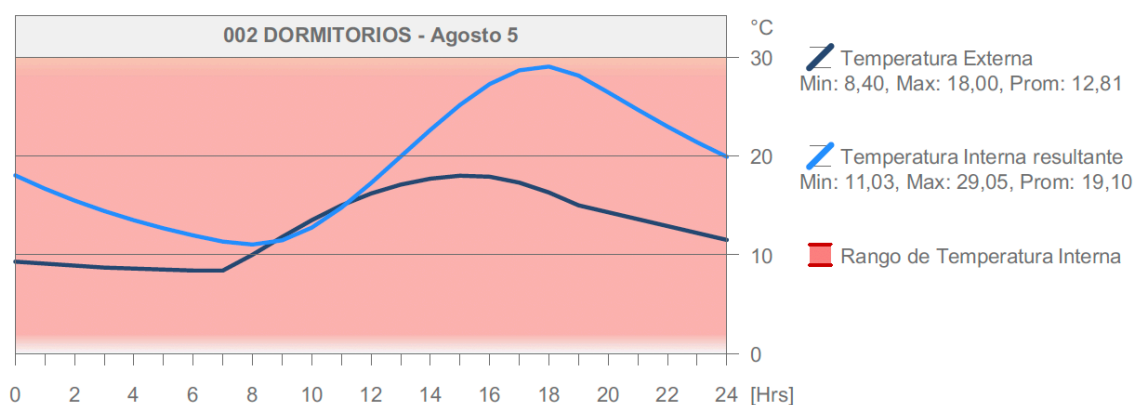
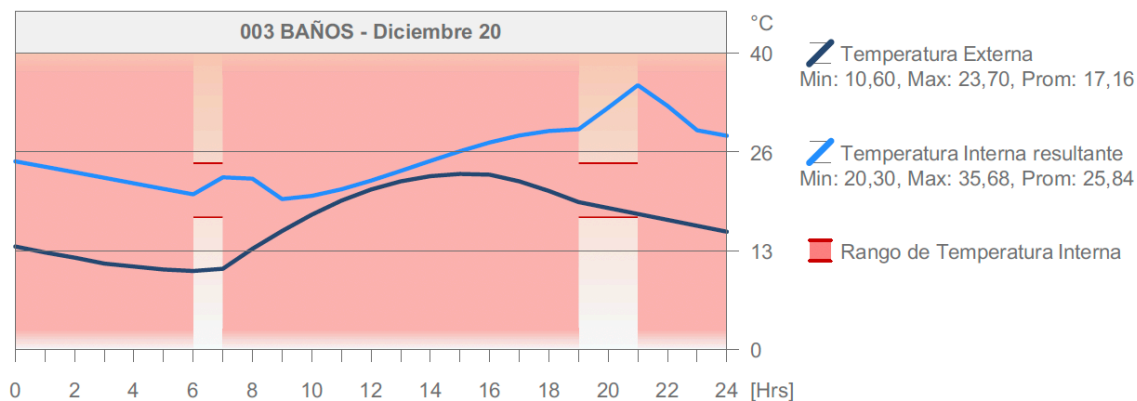
<b>Datos de la Geometría</b>			<b>Coefficientes de transfer.</b>		Valor U	[W/m <sup>2</sup> K]
Área bruta de la planta:	2,22	m <sup>2</sup>	Pavimentos:	2,70	- 2,70	
Área suelo tratado	1,83	m <sup>2</sup>	Externo:	2,60	- 4,59	
Área de estruct. compleja:	4,53	m <sup>2</sup>	Subterráneo:	-		
Volumen ventilado:	4,78	m <sup>3</sup>	Aberturas:	-		
Ratio acristalamiento:	0	%				
<b>Temperatura Interna</b>			<b>Provisiones Anuales</b>			
Min. (08:00 Ago 11):	13,42	°C	Calefacción:	0,00		kWh
Media Anual:	21,34	°C	Refrigeración:	0,00		kWh
Max. (21:00 Oct 11):	35,74	°C				
<b>Horas de carga no satisfechas</b>			<b>Picos de Carga</b>			
Calefacción:	1	hrs/a	Calefacción (01:00 Ene 01):	0,00		kW
Refrigeración:	417	hrs/a	Refrigeración (01:00 Ene 01):	0,00		kW

## Evaluación del Rendimiento Energético

### Perfil de Temperatura Diaria



## Evaluación del Rendimiento Energético



## Evaluación del Rendimiento Energético

### Datos de Diseño HVAC

Bloque Térmico	Demanda de		Demanda de		Interno	
	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Anualment [kWh]	Por Horas Pico [kW]	Min. [°C]	Max. [°C]
001 COCINA SALA RESIDENCIAL	133	1.5 07:00 Ene 16	0	0.0 --	11.9 08:00 Ago 05	38.9 18:00 Dic 20
002 DORMITORIOS	0	0.0 --	0	0.0 --	11.0 08:00 Ago 05	34.3 18:00 May 21
003 BAÑOS	0	0.0 --	0	0.0 --	13.4 08:00 Ago 11	35.7 21:00 Oct 11
001 CASAS	0	0.0 --	0	0.0 --	9.7 07:00 Ago 05	42.6 17:00 Dic 20
<b>Todos los Bloques Térmicos:</b>	<b>133</b>	<b>1.5</b> 07:00 Ene 16	<b>0</b>	<b>0.0</b> --		

#### Número de Horas Usadas en el Año:

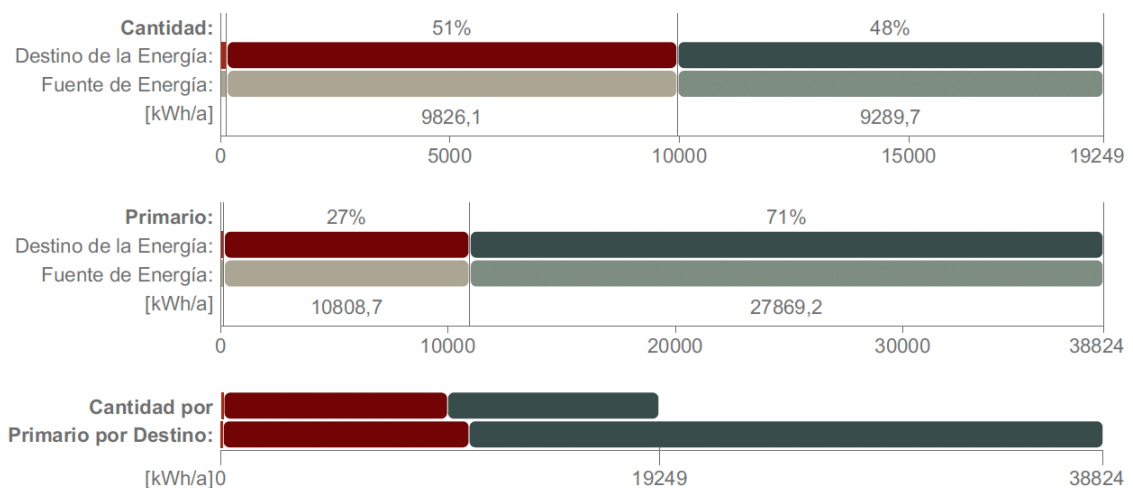
Calefacción: 255 hrs  
Refrigeración: 0 hrs

#### Horas de carga no satisfechas en el año:

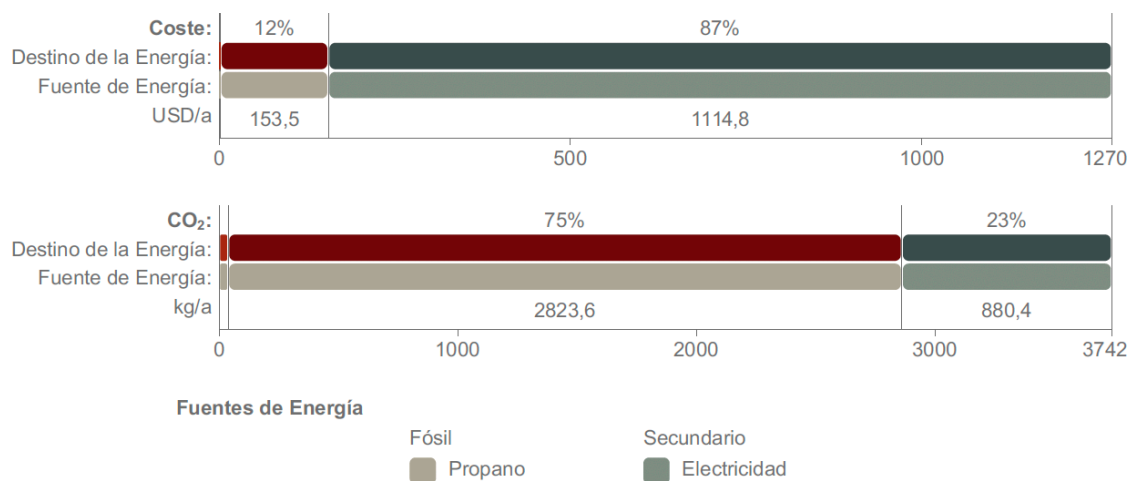
Calefacción: 3229 hrs  
Refrigeración: 737 hrs

### Consumo de energía por Objetivos

Nombre Destino	Energía			CO <sub>2</sub> Emisión kg/a
	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a	Coste USD/a	
Calefacción	133	146	2	38
Refrigeración	0	0	0	0
Servicio de Agua Caliente	9826	10808	153	2823
Ventiladores	0	0	0	0
Iluminación & aparatos	9289	27869	1114	880
<b>Total:</b>	<b>19249</b>	<b>38824</b>	<b>1270</b>	<b>3742</b>



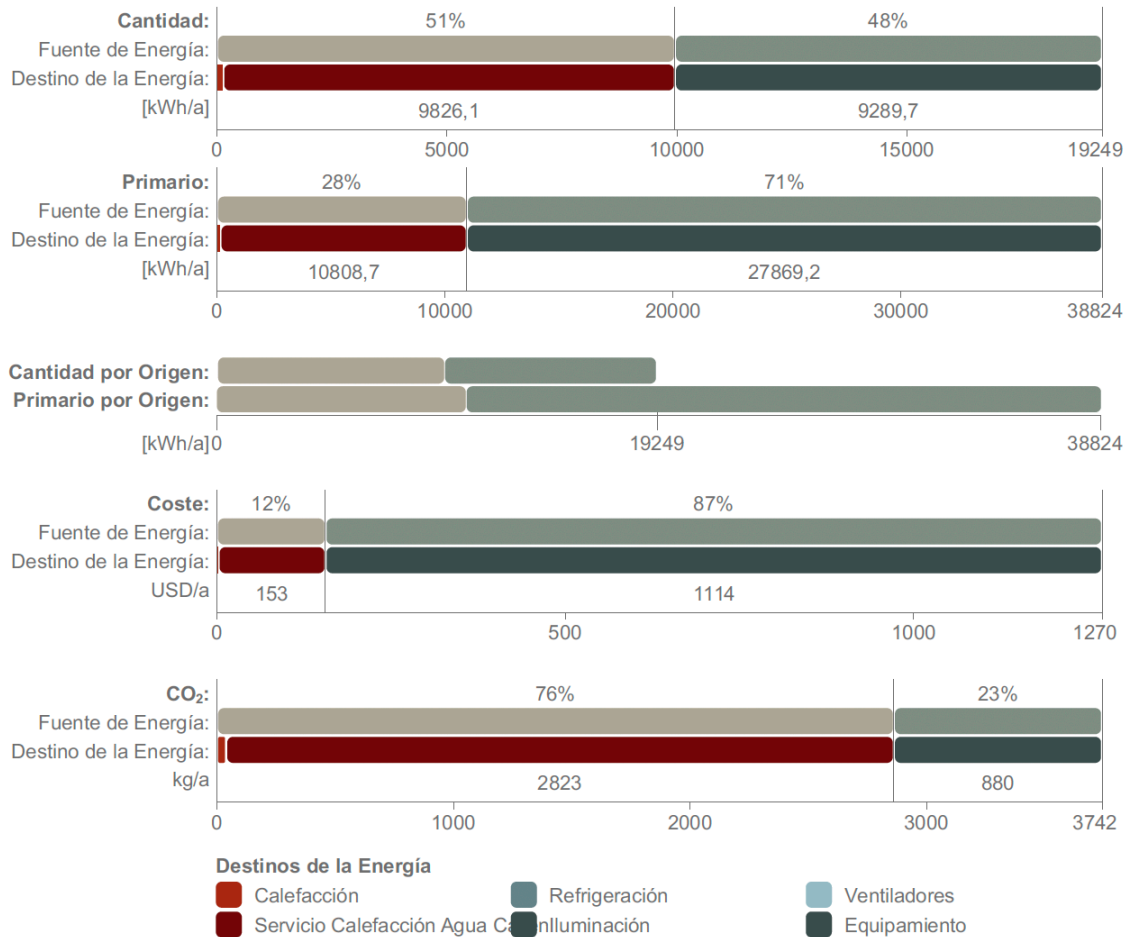
## Evaluación del Rendimiento Energético



## Evaluación del Rendimiento Energético

### Consumo de Energía por Fuentes

Tipo Fuente	Energía			Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
	Nombre de Origen	Cantidad kWh/a	Primario kWh/a	
Fósil	Propano	9959	10955	2861
Secundario	Electricidad	9289	27869	880
Total:		<b>19249</b>	<b>38824</b>	<b>3742</b>



### Impacto Medioambiental

Tipo Fuente	Nombre de Origen	Energía Primaria kWh/a	Emisión CO <sub>2</sub> kg/a
Fósil	Propano	10955	2861
Secundario	Electricidad	27869	880
Total:		<b>38824</b>	<b>3741</b>

## Evaluación del Rendimiento Energético

### Resumen del Sistema Renovable de Edificación

Sistema de Construcción	Energía Anual Generada kWh	Coste de la Energía USD
Energía Renovable LEED Total:	0	0
Total:	0	0

### Rendimiento de Base



Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Costes de Energía Base



Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Tabla de Clasificación del Rendimiento



Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Consumos y Ahorros de Energía



Los Datos Están Incompletos  
Se Requiere Definir un Edificio de Referencia

### Mensajes de Aviso

Alertas	
Propuesta de Diseño	
1	Horas de carga no satisfechas, Calefacción:3229, Refrigeración:737

**Tabla 53. Parámetros de Resistencia y Optimización en Compuestos de Ceniza de Café, Ceniza de Arroz y Cemento Bajo Diferentes Condiciones**

Ensayo	Componente	% material	Molaridad	Contenido de solución (%)	Temperatura (°C)	Presión de moldeo (N) / 5000lb	Resistencia a compresión diametral Rt(kg/cm <sup>2</sup> )	W(kg)	Factor de Optimización (MPa/kg)
1	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,15	0,10	2,09
2	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,33	0,10	2,26
3	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	1,95	0,10	1,88
4	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	1,42	0,10	1,37
5	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	150	22241	2,32	0,10	2,25
6	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	150	22241	2,24	0,10	2,16
7	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	150	22241	2,69	0,10	2,61
8	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	150	22241	2,13	0,10	2,07
9	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,65	0,10	2,56
10	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,84	0,10	2,77
11	ceniza de café	5,00	5,00	26,00	110	22241	2,45	0,10	2,38
12	ceniza de café	5,00	5,00	26,00	110	22241	2,56	0,10	2,48
13	ceniza de café	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,31	0,10	3,24
14	ceniza de café	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,09	0,10	3,01
15	ceniza de café	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,13	0,10	3,06
16	ceniza de café	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,32	0,10	3,23
17	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	7,57	0,10	7,28
18	ceniza de café	2,50	5,00	26,00	110	22241	7,87	0,11	7,30
19	ceniza de café	2,50	7,50	26,00	110	22241	8,12	0,11	7,54
20	ceniza de café	2,50	7,50	26,00	110	22241	5,96	0,11	5,54
21	ceniza de café	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,46	0,10	4,32
22	ceniza de café	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,45	0,10	4,18
23	ceniza de café	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,12	0,11	3,85
24	ceniza de café	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,01	0,10	3,76
25	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	110	22241	6,73	0,11	5,99
26	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	110	22241	7,00	0,11	6,33
27	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	110	22241	5,23	0,11	4,76
28	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	110	22241	6,78	0,11	6,11
29	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	150	22241	5,79	0,10	5,58
30	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	150	22241	4,73	0,10	4,49
31	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	150	22241	4,05	0,10	3,89
32	ceniza de café	5,00	7,50	26,00	150	22241	5,03	0,10	4,87
33	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	110	22241	1,22	0,12	1,04
34	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	110	22241	3,70	0,12	3,06
35	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	110	22241	3,12	0,11	2,67
36	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	110	22241	5,01	0,11	4,28
37	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	150	22241	3,84	0,11	3,56
38	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	150	22241	3,45	0,11	3,23
39	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	150	22241	3,37	0,10	3,15
40	ceniza de café	2,50	10,00	26,00	150	22241	4,48	0,10	4,21
41	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	110	22241	3,08	0,12	2,63
42	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	110	22241	3,21	0,12	2,71

43	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	110	22241	3,68	0,11	3,19
44	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	110	22241	0,00	0,12	0,00
45	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	150	22241	2,49	0,10	2,38
46	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	150	22241	3,62	0,10	3,40
47	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	150	22241	4,36	0,10	4,13
48	ceniza de café	5,00	10,00	26,00	150	22241	2,44	0,10	2,29
49	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	110	22241	3,24	0,10	3,15
50	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	110	22241	4,64	0,10	4,50
51	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,16	0,10	2,09
52	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	110	22241	3,17	0,10	3,07
53	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	150	22241	2,26	0,10	2,19
54	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	150	22241	4,01	0,10	3,87
55	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	150	22241	2,24	0,10	2,15
56	ceniza de arroz	2,50	5,00	26,00	150	22241	4,12	0,10	4,00
57	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	110	22241	4,14	0,10	4,00
58	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	110	22241	3,75	0,10	3,62
59	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	110	22241	4,09	0,10	3,96
60	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	110	22241	3,96	0,10	3,85
61	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	150	22241	4,25	0,10	4,10
62	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,57	0,10	3,50
63	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,24	0,10	3,15
64	ceniza de arroz	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,46	0,10	3,35
65	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	110	22241	2,60	0,11	2,40
66	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	110	22241	5,34	0,11	4,91
67	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	110	22241	5,12	0,10	4,79
68	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	110	22241	6,10	0,11	5,65
69	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,21	0,10	3,97
70	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,08	0,11	3,77
71	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,80	0,10	4,51
72	ceniza de arroz	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,55	0,10	4,26
73	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	110	22241	6,41	0,10	6,01
74	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	110	22241	9,11	0,10	8,51
75	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	110	22241	6,03	0,10	5,65
76	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	110	22241	5,94	0,10	5,56
77	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	150	22241	5,28	0,10	5,04
78	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	150	22241	6,36	0,10	6,03
79	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	150	22241	9,28	0,10	8,70
80	ceniza de arroz	5,00	7,50	26,00	150	22241	9,64	0,10	9,16
81	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	110	22241	8,05	0,11	7,28
82	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	110	22241	4,64	0,11	4,25
83	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	110	22241	4,89	0,11	4,44
84	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	110	22241	6,03	0,11	5,52
85	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	150	22241	5,21	0,11	4,85
86	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	150	22241	5,44	0,10	5,10
87	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	150	22241	5,23	0,10	4,92
88	ceniza de arroz	2,50	10,00	26,00	150	22241	4,90	0,10	4,58
89	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	110	22241	7,25	0,11	6,45
90	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	110	22241	8,10	0,11	7,32
91	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	110	22241	8,78	0,11	7,85
92	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	110	22241	7,15	0,11	6,40
93	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	150	22241	7,54	0,10	7,06

94	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	150	22241	6,70	0,10	6,32
95	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	150	22241	7,07	0,10	6,64
96	ceniza de arroz	5,00	10,00	26,00	150	22241	6,73	0,10	6,34
97	cemento	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,52	0,11	2,34
98	cemento	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,52	0,10	2,35
99	cemento	2,50	5,00	26,00	110	22241	2,17	0,10	2,09
100	cemento	2,50	5,00	26,00	110	22241	3,02	0,10	2,83
101	cemento	2,50	5,00	26,00	150	22241	1,36	0,10	1,28
102	cemento	2,50	5,00	26,00	150	22241	1,32	0,11	1,23
103	cemento	2,50	5,00	26,00	150	22241	1,14	0,10	1,07
104	cemento	2,50	5,00	26,00	150	22241	1,33	0,11	1,24
105	cemento	5,00	5,00	26,00	110	22241	4,32	0,11	3,96
106	cemento	5,00	5,00	26,00	110	22241	4,58	0,11	4,22
107	cemento	5,00	5,00	26,00	110	22241	3,98	0,11	3,67
108	cemento	5,00	5,00	26,00	110	22241	3,73	0,11	3,42
109	cemento	5,00	5,00	26,00	150	22241	2,29	0,10	2,16
110	cemento	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,88	0,10	3,65
111	cemento	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,22	0,10	3,02
112	cemento	5,00	5,00	26,00	150	22241	3,31	0,10	3,11
113	cemento	2,50	7,50	26,00	110	22241	4,72	0,11	4,38
114	cemento	2,50	7,50	26,00	110	22241	2,86	0,10	2,68
115	cemento	2,50	7,50	26,00	110	22241	6,02	0,10	5,78
116	cemento	2,50	7,50	26,00	110	22241	4,90	0,10	4,59
117	cemento	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,74	0,10	4,46
118	cemento	2,50	7,50	26,00	150	22241	4,72	0,11	4,37
119	cemento	2,50	7,50	26,00	150	22241	3,88	0,10	3,63
120	cemento	2,50	7,50	26,00	150	22241	5,51	0,11	5,13
121	cemento	5,00	7,50	26,00	110	22241	11,74	0,11	10,78
122	cemento	5,00	7,50	26,00	110	22241	11,48	0,11	10,57
123	cemento	5,00	7,50	26,00	110	22241	11,28	0,11	10,39
124	cemento	5,00	7,50	26,00	110	22241	8,98	0,11	8,23
125	cemento	5,00	7,50	26,00	150	22241	9,36	0,10	8,80
126	cemento	5,00	7,50	26,00	150	22241	7,71	0,10	7,26
127	cemento	5,00	7,50	26,00	150	22241	8,49	0,10	7,97
128	cemento	5,00	7,50	26,00	150	22241	8,97	0,10	8,42
129	cemento	2,50	10,00	26,00	110	22241	8,04	0,11	7,27
130	cemento	2,50	10,00	26,00	110	22241	4,63	0,11	4,23
131	cemento	2,50	10,00	26,00	110	22241	4,88	0,11	4,42
132	cemento	2,50	10,00	26,00	110	22241	6,03	0,11	5,52
133	cemento	2,50	10,00	26,00	150	22241	5,20	0,11	4,84
134	cemento	2,50	10,00	26,00	150	22241	5,44	0,10	5,10
135	cemento	2,50	10,00	26,00	150	22241	5,22	0,10	4,91
136	cemento	2,50	10,00	26,00	150	22241	4,93	0,10	4,61
137	cemento	5,00	10,00	26,00	110	22241	3,94	0,11	3,50
138	cemento	5,00	10,00	26,00	110	22241	4,36	0,11	3,94
139	cemento	5,00	10,00	26,00	110	22241	4,77	0,11	4,26
140	cemento	5,00	10,00	26,00	110	22241	3,88	0,11	3,47
141	cemento	5,00	10,00	26,00	150	22241	4,08	0,10	3,82
142	cemento	5,00	10,00	26,00	150	22241	3,63	0,10	3,43
143	cemento	5,00	10,00	26,00	150	22241	7,07	0,10	6,63
144	cemento	5,00	10,00	26,00	150	22241	6,72	0,10	6,33

