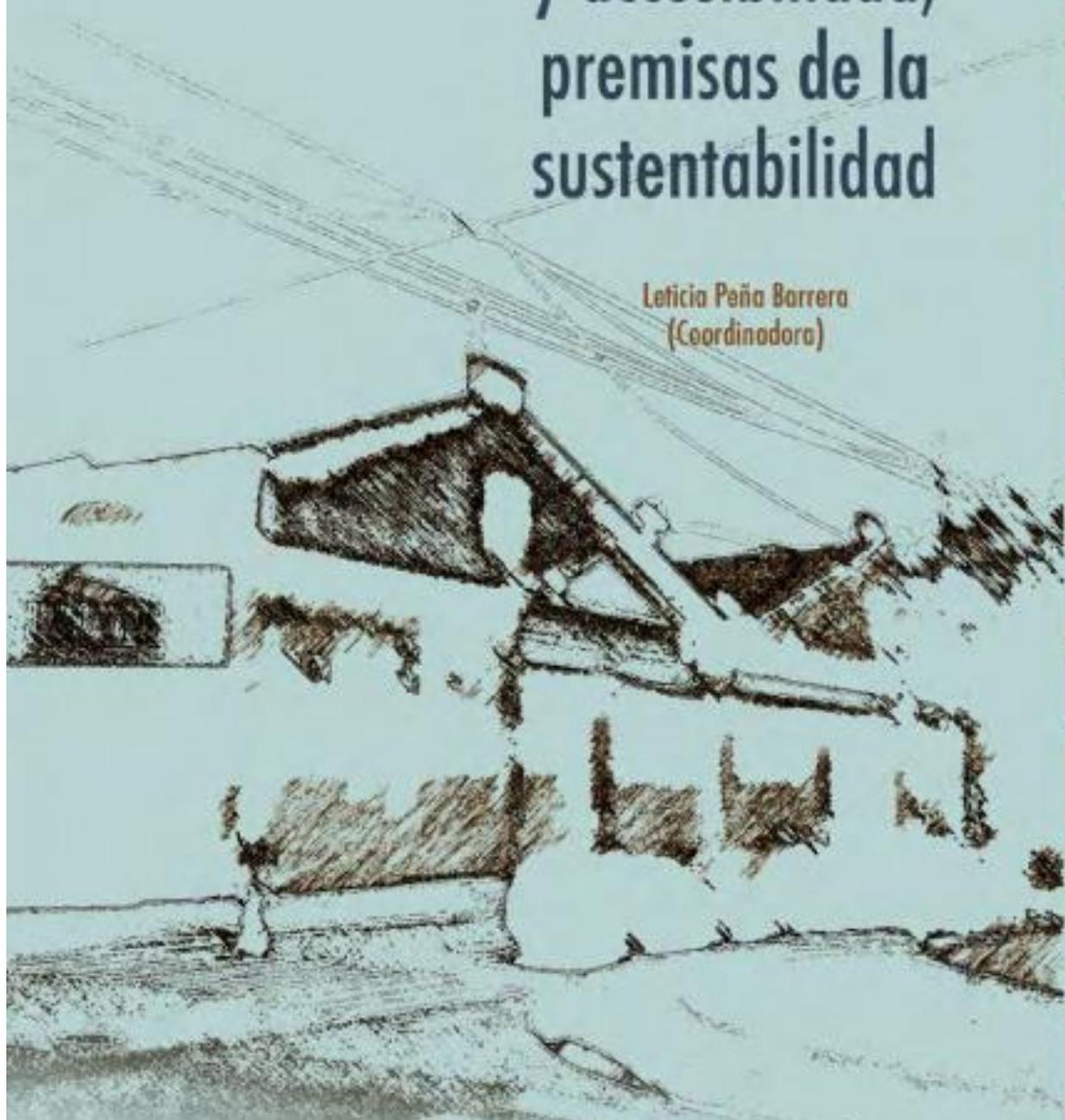


INVESTIGACIÓN EN ARQUITECTURA Habitabilidad y accesibilidad, premisas de la sustentabilidad

Leticia Peña Barrera
(Coordinadora)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Juan Ignacio Camargo Nassar
Rector

Daniel Constandse Cortez
Secretario General

Guadalupe Gaytán Aguirre
Directora del Instituto de Arquitectura Diseño y Arte

Jesús Meza Vega
Director General de Comunicación Universitaria

D.R. © Leticia Peña Barrera (por coordinación)

© 2023 Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,
Avenida Plutarco Elías Calles #1210,
Fovissste Chamizal C.P. 32310
Ciudad Juárez, Chihuahua, México
Tel: +52 (656) 688 2100 al 09



Investigación en arquitectura : habitabilidad y accesibilidad, premisas de la sustentabilidad / Coordinadora Leticia Peña Barrera.– Primera edición. -- Ciudad Juárez, Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2023.-- 395 páginas; 22 centímetros.

ISBN: 978-607-520-463-5

Contenido: Presentación.— Introducción.— Parte 1. Paisaje de la ciudad sustentable. Capítulo 1. Parque agrario: una experiencia valiosa en un marco de gestión interjurisdiccional en construcción / Graciela Mantovani, Mirta Soljet y Victoria García.— Capítulo 2. Área natural protegida urbana u oblitopia. Caso: Fuentes brotantes de Tlalpan, Ciudad de México / Alejandro Cabeza Pérez.— Capítulo 3. Una paleta vegetal para el disfrute universal de los jardines / Rocio López de Juambelz, Amarantha Arellano Rivas y Javier Jasso Arvizu.— Parte 2. Accesibilidad. Capítulo 4. Aplicación háptica en la movilidad urbana de los espacios públicos mágico / Samantha Izchel Zavala Maldonado y Alberto Álvarez Vallejo.— Capítulo 5. Accesibilidad universal en los espacios públicos, caso de estudio: vialidades peatonales en Ciudad Juárez / Judith Gabriela Hernández Pérez.— Capítulo 6. Habitar, pensar, experimentar e imaginar el espacio urbano del centro de Ciudad Juárez / Ramón Leopoldo Moreno Murrieta, Ricardo Herrera Varela y René García Mancha.— Capítulo 7. El parque vecinal y la construcción del sentido del lugar de residencia en Ciudad Juárez, Chihuahua / René Ezequiel Saucedo Muñoz, Edwin Aguirre Ramírez y Alma Angélica Rodríguez Moreno.— Capítulo 8. Criterios de habitabilidad urbana para el aprovechamiento del suelo vacante en Ciudad Delicias / Jenia Mendoza Prieto y Leticia Peña Barrera.— Capítulo 9. Ámbitos e indicadores para la habitabilidad gerontológica / Kattia García-Morales y Gonzalo Bojórquez-Morales.— Parte 4. Tecnologías constructivas. Capítulo 10. Cualidades térmicas del sillar (Ignimbrita) de Arequipa, Perú / Luis Carlos Herrera Sosa, Edgar Elías Villena Montalvo y Judith Gabriela Hernández Pérez.— Capítulo 11. Análisis de un material constructivo compuesto mediante la metodología de diseño estructural / Jorge Armando Ojeda Sánchez/Jorge Armando Ojeda Sánchez.— Capítulo 12. Reutilización de los residuos de pavimentos de concreto hidráulico para la construcción de mamposterías / Eddy González García.— Capítulo 13. Evaluación de los materiales urbanos por medio del balance de radiación de la superficie del cañón urbano en Colima, México / Jorge Zepeda y Jorge Armando Ojeda.— Colofón. La enseñanza de la sustentabilidad. Capítulo 14. La formación del arquitecto en el debate de la enseñanza de la sustentabilidad en tres universidades / León Felipe Durón Morales y Leticia Peña Barrera.— Resúmenes.— Reseña de los autores.

Ciudad sustentable – Investigaciones
Espacio urbano – Accesibilidad universal – Investigaciones
Habitabilidad urbana – Investigaciones
Tecnología constructiva – Investigaciones
Sustentabilidad – Enseñanza de la arquitectura
Accesibilidad y sustentabilidad – Impacto

LC – NA2542.36 ISB 2023

Primera edición, 2023

Disponible en: elibros.uacj.mx

La edición, diseño y producción editorial de este documento estuvieron a cargo de la Dirección General de Comunicación Universitaria, a través de la Subdirección de Editorial y Publicaciones.

Coordinación editorial: Mayola Renova

Corrección: Elsa Aguirre González

Diseño de cubierta: Karla María Rascón González

Diagramación: Karla María Rascón González

Índice

PRESENTACIÓN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	15

PARTE 1. PAISAJE DE LA CIUDAD SUSTENTABLE

CAPÍTULO 1. PARQUE AGRARIO: UNA EXPERIENCIA VALORABLE EN UN MARCO DE GESTIÓN INTERJURISDICCIONAL EN CONSTRUCCIÓN.

Graciela Mantovani, Mirta Soijet y Victoria García

Universidad Nacional del Litoral (UNL), Argentina..... 27

CAPÍTULO 2. ÁREA NATURAL PROTEGIDA URBANA U OBLITOPIA. CASO: FUENTES BROTTANTES DE TLALPAN, CIUDAD DE MÉXICO.

Alejandro Cabeza Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)..... 43

CAPÍTULO 3. UNA PALETA VEGETAL PARA EL DISFRUTE UNIVERSAL DE LOS JARDINES.

Rocío López de Juambelz, Amaranta Arellano Rivas y Javier Jasso Arvizu.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)..... 71

PARTE 2. ACCESIBILIDAD

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN HÁPTICA EN LA MOVILIDAD URBANA DE LOS ESPACIOS PÚBLICOS DE LOS PUEBLOS MÁGICOS.

Samanta Ischel Zavalza Maldonado y Alberto Álvarez Vallejo.

Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex)..... 107

PARTE 4. TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS

CAPÍTULO 10. CUALIDADES TÉRMICAS DEL SILLAR (IGNIMBRITA) DE AREQUIPA, PERÚ

Luis Carlos Herrera Sosa, Edgar Elías Villena Montalvo y

Judith Gabriela Hernández Pérez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) y Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú (UNSAA)247

CAPÍTULO 11. ANÁLISIS DE UN MATERIAL CONSTRUCTIVO COMPUESTO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO CONSTRUCTAL.

Jorge Armando Ojeda Sánchez.

Universidad de Colima (UCOL).....265

CAPÍTULO 12. REUTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MAMPOSTERÍAS

Eddy González García

Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).....281

CAPÍTULO 13. EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES URBANOS POR MEDIO DEL BALANCE DE RADIACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL CAÑÓN URBANO EN COLIMA, MÉXICO

Jorge Zepeda y Jorge Armando Ojeda

Universidad de Colima (UCOL)..... 301

COLOFÓN. LA ENSEÑANZA DE LA SUSTENTABILIDAD

CAPÍTULO 14. LA FORMACIÓN DEL ARQUITECTO EN EL DEBATE DE LA ENSEÑANZA DE LA SUSTENTABILIDAD EN TRES UNIVERSIDADES

León Felipe Durón Morales y Leticia Peña Barrera.

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)..... 335

RESÚMENES 365

RESEÑA DE LOS AUTORES..... 381



Capítulo 10

Cualidades térmicas del sillar (ignimbrita) de Arequipa, Perú

*Luis Carlos Herrera Sosa, Edgar Elías Villena Montalvo y
Judith Gabriela Hernández Pérez*

El presente documento muestra los resultados del análisis térmico que se realizó al material de construcción denominado sillar, enmarcado dentro del proyecto de investigación: “Evaluación del comportamiento térmico del sillar de la provincia de Arequipa, para su aplicación como material de construcción que permita reducir el consumo energético y optimizar el uso de energías pasivas”, financiado por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.

El sillar es una piedra de origen volcánico que se ha utilizado históricamente en las edificaciones de Arequipa. Su uso ha sido para diversos componentes constructivos de cubiertas, muros, pisos e incluso ornamental.

En los muros se ha utilizado esencialmente de dos maneras: de canto 0.19 m y de sogá 0.30 m de espesor. Estos acomodos del material tienen su sustento principal por razones de resistencia mecánica y no por considerar sus

propiedades térmicas, excepto por lo que el conocimiento empírico del material y la tradición heredada refiere.

El objetivo de este proyecto de investigación fue conocer y obtener los valores de conductividad, resistencia térmica y calor específico, para poder calcular la transmitancia térmica, resistencia térmica, amortiguamiento y tiempo de retraso del material. Con los resultados, comparar si el sillar cumple con lo que la normatividad vigente en aspectos térmicos de Arequipa solicita, y para lograrlo se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Obtener los valores térmicos de conductividad, calor específico y densidad del sillar.
- Calcular la transmitancia y resistencia térmica del sillar y verificar si cumple con la normatividad vigente del Perú.
- Calcular el tiempo de retardo y amortiguamiento del sillar para conocer el efecto de la inercia térmica del material.

ANTECEDENTES

El departamento de Arequipa se encuentra al sur de Perú. Limita al norte con Ayacucho, Apurímac y Cuzco; al este con Puno; al sureste, con Moquegua; al oeste con el océano Pacífico y al noroeste con Ica. Su capital, la ciudad de Arequipa, se ubica en las coordenadas geográficas de 16° 23' 56" latitud sur, 71° 32' 13" longitud oeste y a una altitud media de 2335 m s. n. m. (ver Figura 1).

En el Reglamento Nacional de Edificaciones (Instituto de Control y Gerencia [ICG], 2016), la ciudad de Arequipa se localiza en la zona climática 4-Mesoandino. Esta zona se caracteriza por tener un clima de semifrío a frío, con terreno semiseco a lluvioso. Presenta temperaturas promedio anuales de 12 °C, humedades relativas de 30 a 50 % y una precipitación pluvial de 3000 a 4000 mm en promedio. De acuerdo con la caracterización climática de Köppen, se ubica en Dwb.

Figura 1. Localización de la ciudad de Arequipa



Fuente: elaboración propia.

El diagnóstico bioclimático de Arequipa define dos temporadas climáticas: temporada de verano y temporada de invierno. La primera temporada tiene una duración de diciembre a marzo y se caracteriza por ser una estación de clima templado y subhúmedo. Sus principales indicadores son una temperatura promedio de 15.5 °C, humedad relativa promedio de 57.2 % y una radiación sobre superficie horizontal promedio de 5130 W/m².

La segunda temporada transcurre de abril a octubre y se caracteriza por ser una estación de clima frío y semiseco. Sus principales indicadores son una temperatura promedio de 14.3 °C, humedad relativa promedio de 39.3 % y una radiación sobre superficie horizontal promedio de 4994 W/m².

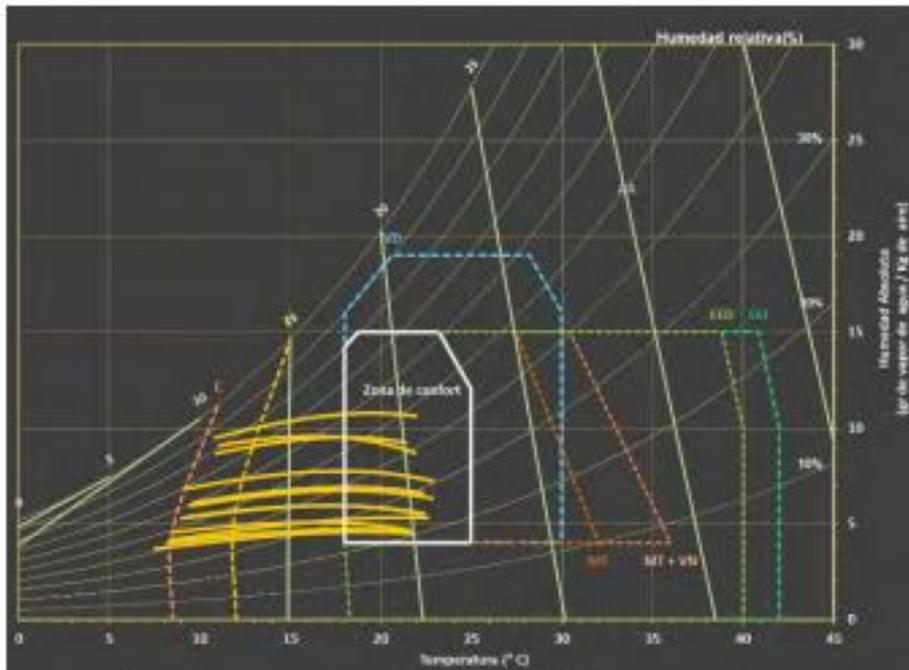
Para el clima mesoandino de Arequipa las estrategias de climatización pasiva para alcanzar niveles de confort del aire interior aceptables por medios pasivos son las siguientes (ver Figura 2):

- Ganancia solar pasiva. Permitir la penetración de la energía durante la mañana y tarde a través de los elementos transparentes de la envolvente arquitectónica durante todo el año.

INVESTIGACIÓN EN ARQUITECTURA
Habitabilidad y accesibilidad, premisas de la sustentabilidad

- Protección solar. Controlar la ganancia de radiación solar de las horas de mediodía durante todo el año.
- Ganancias de calor internas. Propiciar la generación de calor al interior de las edificaciones durante la noche todo el año.
- Protección de viento. Evitar y/o controlar la ventilación natural durante la noche y horas tempranas de la mañana durante todo el año.
- Uso de materiales con masa térmica alta con un tiempo de retraso de diez horas. Propiciar el uso de materiales de alta inercia térmica expuestos a la ganancia de radiación solar de acuerdo con la estrategia de ganancia solar pasiva, para permitir el almacenamiento de calor durante el día y su posterior aprovechamiento durante la noche.
- Aislamiento selectivo. Disminuir la ganancia o pérdida de calor a través de pisos, muros y cubiertas durante todo el día, mediante el uso de materiales de baja conductividad y resistencia térmica alta.

Figura 2. Carta bioclimática para interiores



Fuente: elaboración propia, con base en el software Bioarq2016.

MARCO CONCEPTUAL

Sillar es una vieja palabra española usada en arquitectura que significa un “tipo de piedra labrada, por lo común en forma de paralelepípedo rectángulo, que forma parte de un muro de sillería” (Alonso, 2016, p. 1). El término alcanzó raigambre y nombre propio en Perú, al punto de que “la palabra entró como peruana de origen en la terminología geológica internacional” y como tal fue rescatada en las últimas ediciones del *Glossary of Geology*, diccionario internacional de la materia (Alonso, 2016, p. 1).

El sillar es una “roca piroclástica que cubre grandes extensiones del flanco occidental andino del Perú”. Existe un gran número de depósitos de flujos piroclásticos con el nombre de sillar, o piedra sillar, que es una denominación exclusivamente local para la ignimbrita. La ignimbrita es una “roca ígnea producto del depósito volcánico, y que consiste en toba dura compuesta de fragmentos de roca y fenocristales en una matriz de fragmentos de vidrio semejantes a polvo, junto con pedazos de piedra pómez y bloque de lava densa (fiames)” (Lara Galindo, 1988, p. 7).

De acuerdo con la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ([RACEFN], 2018):

ignimbrita. (ignimbrite, flood tuff) Geol. Roca volcánica fragmentaria procedente del depósito y consolidación de coladas piroclásticas originadas en erupciones explosivas. Para algunos autores se trata de depósitos originados por coladas piroclásticas de pómez y ceniza. Para otros, se trata de depósitos de coladas piroclásticas de pómez y ceniza soldados, en cuyo proceso de compactación se forman flamas. (s.p.)

El término ignimbrita fue acuñado por primera vez en 1932 por el geólogo de origen neozelandés Patrick Marshall. La palabra deriva del latín *ignis* que significa ‘lluvia’ e *imber* que significa ‘lluvia’ (Cueva, 2017, p. 26).

El sillar es un material que tiene la característica de ser cortado fácilmente en bloques de distintos tamaños, que son livianos, blancos y cómodos de tallar. Ha sido empleado extensamente como material de construcción en la ciudad de Arequipa y zonas aledañas en una tradición constructiva que se remonta a las culturas preincaicas cuando los primeros pobladores de la región lo emplearon para elaborar petroglifos y pictogramas.

El conjunto de sus propiedades constructivas y la accesibilidad en su obtención hizo que los españoles, para los siglos XVI y XVII, comenzaran a utilizar el sillar en bóvedas, generalizándose su uso en los siglos XVIII y XIX, masificándose en lo que hoy es el centro histórico de Arequipa.

El sillar adquirió su mejor expresión en Arequipa, ciudad emblemática del sur del Perú conocida como la “Ciudad Blanca”. Lleva ese nombre por haber sido construida enteramente de sillar, cuya coloración es blanca al ser cortado de la roca madre.

En la actualidad, se continúa empleando el sillar en menor escala, principalmente en las zonas marginales, al inicio del proceso de construcción de viviendas y, de manera particular, como revestimiento para darle un acabado tradicional a edificaciones en el centro histórico de Arequipa.

MARCO TEÓRICO

Los estudios del sillar o ignimbrita, por lo general, se han enfocado en “conocer y analizar las propiedades de resistencia mecánica”; especialmente, en la zona de Arequipa, debido a que esta se ubica “en la región de mayor actividad sísmica del Perú” (Hernando, 2001, p. 16). Otros estudios realizados por parte del Instituto Nacional de Investigación y Normalización de Vivienda del Perú (Ininvi) “enfocados exclusivamente en las propiedades físicas, mecánicas y químicas” (Llanque, 2000, p. 140), dejando de lado sus propiedades térmicas.

Es hasta 1980 cuando Daniel Meilán señalaba en la Universidad Nacional de Salta que “las características del sillar (ignimbritas) tenían una serie de propiedades físicas que los hacían útiles en construcción, debido a que eran livianos y fáciles de manejar, tanto para su transporte, como para su colocación”. Incluso comentó que por su estructura interna “son un aislante natural de la temperatura” (Alonso, 2016, p. 4).

La ignimbrita “tiene propiedades acústicas que impiden o disminuyen la transmisión de ruidos entre los distintos ambientes y el exterior” (Alonso, 2016, p. 4). Además de ser ignífugas, con lo cual no son afectadas por el fuego o un incendio.

La estructura interna del sillar se considera un aislante natural de la temperatura, sin embargo, son pocos los estudios que profundizan en sus propiedades térmicas. Uno de los estudios que ahonda al respecto fue el realizado por

Josué Llanque (2000), que obtuvo mediante un método empírico un valor de conductividad de 0.466 W/m K de una muestra de sillar blanco.

En conjunto con el valor de la conductividad, es necesario conocer los valores, su calor específico y densidad para con ello determinar la inercia térmica del material, porque en un clima semifrío a frío como el de Arequipa resulta ser una de las propiedades térmicas más importantes, pues amortigua y retrasa la pérdida de calor y permite el almacenamiento de energía durante el día.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para conocer las cualidades térmicas del sillar se desarrolló en cuatro fases o etapas principales:

- Obtener en laboratorio los valores de conductividad térmica en W/m K , la densidad en kg/m^3 y el calor específico en $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$ de muestras del sillar blanco y rosa.
- Con los resultados obtenidos en laboratorio, calcular los valores de resistividad en m K/W , el calor específico volumétrico en $\text{kJ/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$, la transmitancia térmica en $\text{W/m}^2 \text{ K}$ y la resistencia térmica en $\text{m}^2 \text{ K/W}$ del sillar rosa y blanco en las dos formas de colocación más común en la tradición constructiva de Arequipa: soga y canto.
- En esta etapa se calculó el desfase o tiempo de retraso en horas y el amortiguamiento en porcentaje para conocer el efecto que tiene la inercia térmica del material.
- Por último, se discutieron y compararon los resultados de las etapas anteriores con respecto a la normatividad vigente.

Los valores se obtienen de la propiedad de conductividad térmica, densidad y calor específico, se enviaron muestras del material sillar de color blanco y rosa a dos laboratorios en México para su análisis.

Al laboratorio Novidesa de la Petroquímica IDESA, ubicado en Tlaxcala, México, se mandaron dos muestras del sillar blanco para el análisis de la densidad y conductividad térmica (ver Figura 3). Este laboratorio está acreditado a partir del 27 de abril de 2011 por la Entidad Mexicana de Acreditación, A. C. (EMA) con número de acreditación C-0061-008/11. La acreditación fue otorgada bajo la norma NMX-Ec-17025-IMNC-2006 y la ISO 17025:2005,

que en México son requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración.

La determinación de la densidad se hizo mediante el método de prueba MP-950, que está referenciado a la NMX-C-126-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción-Materiales Termoaislantes en Forma de Bloque o Placa-Determinación de las Dimensiones y Densidad. El acondicionamiento de los especímenes fue de 24 horas a 105 °C.

Figura 3. Muestra del sillar blanco enviada al laboratorio



Fuente: fotografía tomada por los autores.

La determinación de la transmisión térmica está referenciada a la NMX-C-181-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción-Materiales Termoaislantes-Determinación de la Transmisión Térmica en Estado Estacionario (Medidor del Flujo del Calor). El equipo utilizado para ello fue un medidor de flujo de calor HFM-436/3/1 ER con fecha última de calibración: 15 de febrero de 2017.

Al laboratorio del Centro de Investigación de Materiales Avanzados de Chihuahua, México (Cimav) se mandaron una muestra de sillar blanco para el análisis del calor específico y dos muestras de sillar rosa para el análisis de la densidad, calor específico y conductividad térmica.

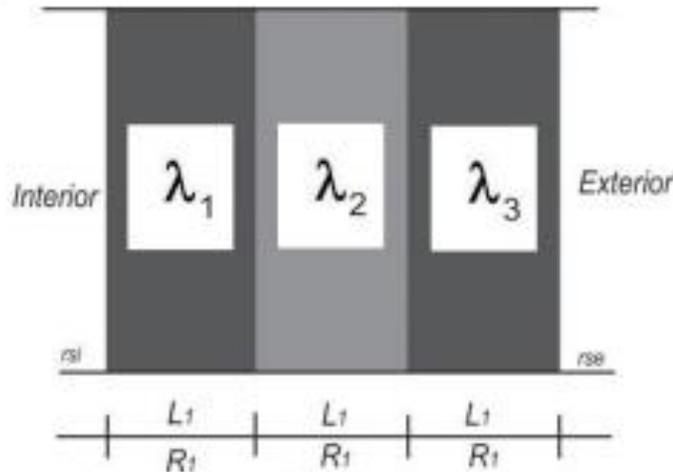
El análisis de la conductividad térmica (k) se llevó a cabo en un analizador de conductividad térmica modelo 2022 de la marca Unitherm. La muestra se acondicionó a las medidas de la probeta requerida (cilindros de 5.1 cm de diámetro). La determinación se realizó con referencia a la Norma ASTM-E-1530. Los estándares de calibración utilizados fueron acero inoxidable, placa de Vespel y vidrio Pyrex. Las mediciones se realizaron por duplicado a temperatura de 35 °C aproximadamente.

El estudio del calor específico se hizo por el método de prueba estándar para la determinación de la capacidad calorífica (C_p) mediante el análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC). Este análisis consiste en someter la muestra a un calentamiento programado registrando las reacciones endo/exotérmicas que van ocurriendo. La determinación se llevó a cabo en un calorímetro diferencial de la marca TA Instruments, modelo Q200 en las siguientes condiciones: rampa de calentamiento, flujo de nitrógeno de 50 cm³/min utilizando el método modulado. El equipo se calibró con estándares metálicos de indio y zinc, de acuerdo con la norma ASTM D3418.

La determinación de la densidad se hizo utilizando el método de medición mediante el desplazamiento de líquidos (método de Arquímedes), a una temperatura ambiente de 25 °C. El equipo utilizado fue una balanza analítica modelo explorer de la marca Ohaus en tres lecturas. Los líquidos utilizados fueron agua destilada con densidad de 1.02888 g/cm³, determinada con picnómetro.

Para el cálculo de la transmitancia térmica (U), el Reglamento Nacional de Edificaciones Nacional del Perú (ICG, 2016) establece como resistencia superficial externa 0.11 W/m² K y como resistencia superficial interna 0.06 W/m² K (ver Figura 4).

Figura 4. Cálculo de resistencia térmica



Fuente: elaboración propia con base en la NMX-C-460-ONNCE-2009.

Utilizando la ecuación para el cálculo de la resistencia térmica de materiales homogéneos, se analizaron las dos principales formas de utilización del sillar como material de construcción: sogá y canto, de 0.19 m y 0.30 m de espesor respectivamente, sin considerar juntas constructivas. Para el cálculo se consideró el promedio de los resultados de cada uno de los laboratorios.

$$R_t = r_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + r_{se} = 1/h_i + L_1/\lambda_1 + L_2/\lambda_2 + \dots + 1/h_e \quad (1)$$

Donde:

R_t = resistencia total del material y/o sistema constructivo en $m^2 K/W$

R = resistencia del primer componente del sistema constructivo o material en $m^2 K/W$

r_{si} = resistencia superficial interior

r_{se} = resistencia superficial exterior

h_i = $16.67 W/m^2 K$

h_e = $9.09 W/m^2 K$

L = espesor del material en metros

Λ = conductividad del material en $W/m K$

Con el cálculo de la resistencia térmica (R) se obtiene la transmitancia térmica (U):

$$U = 1 / R_t \quad (2)$$

Donde:

U = transmitancia térmica en $W/m^2 K$

R_t = resistencia térmica en $m^2 K/W$

La inercia térmica es la propiedad que tiene un material que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que lo cede o absorbe. Depende de la conductividad, densidad, calor específico, amortiguamiento y retraso térmico. Los materiales que tienen esa característica son los materiales pesados y con mucha masa, por ello se le conoce también como masa térmica.

El retraso o retardo térmico es el tiempo transcurrido que toma una envolvente en dejar pasar el calor desde una de sus caras hacia su cara opuesta, y se expresa en horas. Para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Phi = 1.38e\sqrt{CV/\kappa} \quad (3)$$

Donde:

Φ = retraso desfase térmico en horas

e = espesor del material en metros

C_v = calor específico volumétrico en calorías

K = conductividad térmica en calorías

El amortiguamiento térmico es igual a la relación entre la temperatura superficial exterior máxima y la interior máxima. El método gráfico para el cálculo del amortiguamiento inicia con el cálculo de la constante de tiempo con la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{1}{3600} \sum_1^n C_v e \left[\frac{1}{h_o} + \frac{1}{2} \epsilon_1 r_1 \right] + C_v 2e \left[\frac{1}{h_o} + \epsilon_1 r_1 + \frac{1}{2} \epsilon_2 r_2 \right] + C_v n e \left[\frac{1}{h_o} + \epsilon_1 r_1 + \dots + \frac{1}{2} \epsilon_n r_n \right] + \quad (4)$$

Donde:

θ = constante de tiempo

e = espesor del material en metros

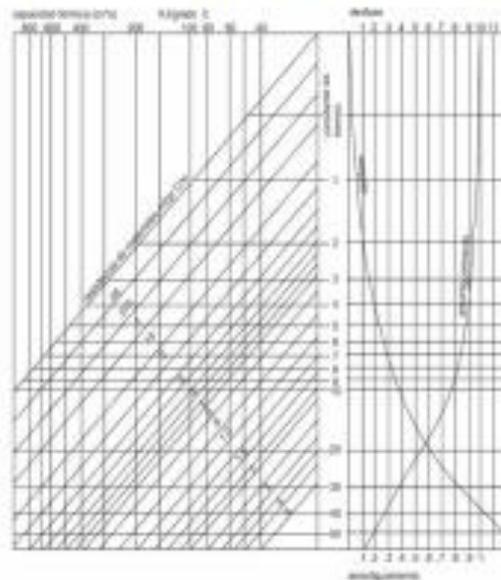
C_v = calor específico volumétrico en J/m^3

r = resistividad térmica del material

$$h_o = 9.09 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Al obtener la constante de tiempo esta se ubica en el nomograma para el cálculo del retraso térmico y amortiguamiento de los materiales (ver Figura 5).

Figura 5. Nomograma para el cálculo de retraso y amortiguamiento térmico de los materiales



Nomograma para el cálculo del retraso y amortiguamiento térmico de los materiales

Fuente: elaboración propia con base en el nomograma de Tudela (1982, p. 181).

En ese apartado se explica de manera clara y sucinta cuál es la metodología de la investigación y cada paso que se realiza hasta llegar a las conclusiones, por ello se estructura con un párrafo inicial que describe la investigación en forma general, ejemplo: esta investigación utiliza una metodología mixta, ya que se estudian y examinan por separado los aspectos de diseño y de uso de los espacios mediante el método cuantitativo y cualitativo.

Posteriormente, se explica cada paso efectuado para la investigación que puede ser a partir de cómo se elabora el diagnóstico, se realiza el trabajo de campo o registro de datos de manera confiable, cómo se validan los resultados y, finalmente, cómo se registran las conclusiones. Un ejemplo sería:

En la elaboración del diagnóstico del diseño se conocerá la distribución de las ventanas mediante la elaboración de croquis y plantas arquitectónicas

obteniendo el registro lumínico, la ubicación de ventanas, el tamaño, el tipo de acristalamiento y su orientación.

En la valoración de la eficiencia luminica se tendrá que monitorear los espacios mediante el uso de equipo especializado (luxómetro), para localizar las zonas oscuras y las de óptimo desempeño en el espacio.

En la evaluación de la eficiencia se elabora una tabla de la iluminación natural mediante la sistematización de la información obtenida por el diagnóstico y las mediciones, teniendo en cuenta la intensidad que debe existir según el tipo de actividad.

Las conclusiones retoman los principales hallazgos o más relevantes relacionados, teniendo la comprobación de la hipótesis, el cumplimiento del objetivo de investigación y resultados comparados con la teoría.

También es importante explicar la metodología utilizada para la selección del caso de estudio y cómo se valida la objetividad en la definición de este.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de conductividad del sillar blanco tienen una variación desde 0.18 a 0.33 W/m K, es decir, 0.26 W/m K en promedio, mientras que el del sillar rosa es de 0.43 W/m K en promedio. La densidad del sillar blanco es menor a la del sillar rosa en un 26 %. En tanto que en el calor específico del sillar rosa es un 11.66 % mayor en comparación con el sillar blanco (ver Tabla 1).

Tabla 1. Valores de las propiedades térmicas del sillar

Sillar	Densidad	λ = Conductividad		r = Resistividad	Ce = Calor específico	Cv = Calor específico volumétrico	
	kg/m ³	W/m K	kcal/mhr °C	m K/W	J/Kg °C	kJ/m ³ °C	kcal/m ³ °C
Blanco	1314.85*	0.18*	0.15*	5.68*		609.76*	145.63*
		0.33**	0.28**	3.04**	463.75**		
Rosa	1658**	0.43**	0.37**	2.34**	415.29**	688.55**	164.45**

* Navidesa ** Cimav

Fuente: elaboración propia para esta investigación.

La transmitancia térmica del sillar blanco colocado en canto tiene valores de cálculo de 1.338 a 0.803 W/m² K, menor en un 17.56 a 50.52 % con respecto al sillar rosa que obtuvo un valor de 1.623 W/m² K. El colocado en soga del sillar blanco tiene valores de 0.924 a 0.535 W/m² K, menor en un 19.37 a 53.31 % (ver Tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de transmitancia y resistencia térmica del sillar

Sillar	Blanco		Rosa	
	Canto	Soga	Canto	Soga
Resistencia térmica (R)	1.245*	1.868*	0.615**	0.873**
m ² K/ W	0.748**	1.082**		
Transmitancia térmica (U)	0.803*	0.535*	1.623**	1.146**
W/m ² K	1.338**	0.924**		

* Novidesa ** Cimov

Fuente: elaboración propia para esta investigación.

El retraso térmico del sillar blanco colocado en canto es de 9.44 a 12.90 horas, mayor en un 7.32 a 32.40 % con respecto al sillar rosa que es de 8.72 horas. El colocado en soga del sillar blanco tiene valores de 5.97 a 8.16 horas, mayor en un 7.37 a 32.23 % (ver Tabla 3).

Tabla 3. Cálculo del retraso térmico del sillar

Sillar	Blanco		Rosa	
	Canto	Soga	Canto	Soga
Retraso térmico horas	12.90*	8.16*	8.72**	5.53**
	9.44**	5.97**		

* Novidesa ** Cimov

Fuente: elaboración propia para esta investigación.

El amortiguamiento del sillar blanco colocado en canto es de 0.20 a 0.45, mientras que el colocado en soga es de 0.55 a 0.75. El amortiguamiento del sillar rosa colocado en canto es de 0.50 y en soga es de 0.80 (ver Tabla 4).

Tabla 4. Cálculo del amortiguamiento

Sillar	Blanco		Rosa	
	Canto	Soga	Canto	Soga
Amortigua- miento	0.20*	0.55*	0.50**	0.80**
	0.45**	0.75**		

* Navidesa ** Cimav

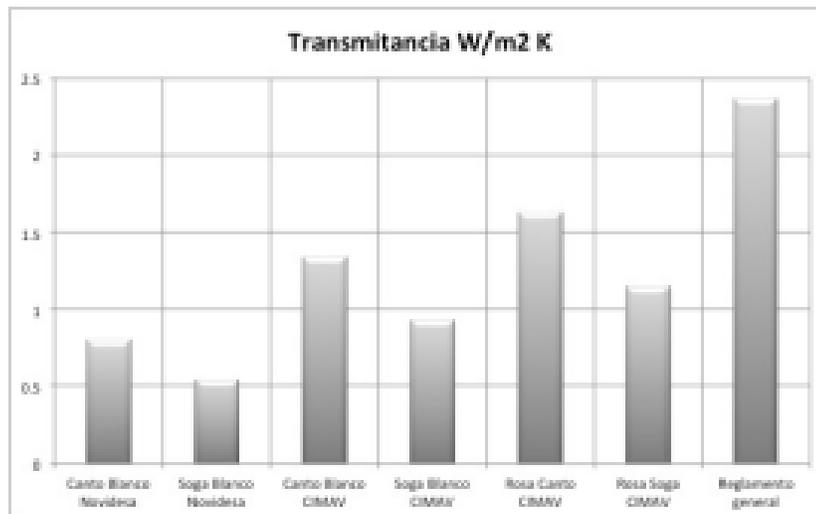
Fuente: elaboración propia para esta investigación.

Las diferencias de valores de conductividad térmica y por ende de la transmitancia térmica del sillar de cada uno de los laboratorios puede definirse por tres circunstancias principales:

1. Método de obtención del valor de conductividad térmica de cada material muestra.
2. Cantera del cual se obtuvo el material muestra.
3. Combinación de los fiames de la muestra.

El valor máximo de transmitancia térmica (U) que permite el Reglamento Nacional de Edificaciones para el clima mesoandino (zona climática cuatro) es de $2.36 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, es decir, una resistencia térmica mínima de $0.424 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Si se compara ese requerimiento con el conseguido del sillar colocado en canto o soga, obtenemos que cumple satisfactoriamente en ambos casos, independientemente de los valores recabados por los dos laboratorios y del tipo y color del sillar (ver Figura 6).

Figura 6. Comparación de la transmitancia térmica del sillar con el reglamento nacional



Fuente: elaboración propia con los resultados obtenidos.

Si se considera el requerimiento del reglamento nacional como el 100 % de transmisión térmica permitida, se obtiene que el sillar en canto permite el paso de calor del 53.16 % en promedio; y el de soga, 36.79 %.

El retraso térmico del sillar blanco colocado en canto es el único que satisface con el requerimiento del diagnóstico bioclimático de 10 horas. Los otros acomodos del sillar, independientemente de su color, no son suficientes en el tiempo de retardo.

El amortiguamiento de los dos acomodos del sillar blanco y rosa es adecuado para el clima de Arequipa. Aunque hay variaciones entre ellos de 0.20 a 0.80, el promedio de 0.60 es suficiente en combinación con el tiempo de retraso y la transmitancia del material.

CONCLUSIONES

Las cualidades térmicas del sillar dependen de la cantera o lugar de extracción. Sin embargo, este estudio demuestra que el sillar de Arequipa posee unas propiedades térmicas adecuadas para el clima de la región.

El uso del sillar colocado en canto o soga cumplen satisfactoriamente con la resistencia térmica requerida por el Reglamento Nacional de Edificaciones. Incluso el sillar blanco tiene tan buen comportamiento térmico con respecto

a la resistencia térmica que aun con espesores de hasta 0.07 m en promedio cumple la norma. En tanto que el sillar rosa cumple la norma con un espesor mínimo de hasta 0.11 m. Obviamente, estos últimos espesores no pueden ser utilizados como material de construcción estructural, pero sí como un recubrimiento para otro material menos eficiente térmicamente.

El buen comportamiento térmico del sillar con respecto a la inercia o masa térmica por su tiempo de retraso y amortiguamiento es un aspecto fundamental a considerar en la toma de decisiones de las edificaciones de Arequipa, no obstante, el Reglamento Nacional de Edificaciones no lo contempla.

En la actualidad, el sillar debe ser reconsiderado como un material de construcción ecológico, moderno y adecuado para la edificación de viviendas en Arequipa, pues, además de que cumple con los requerimientos de la normativa vigente, el valor de su inercia térmica permite que sus habitantes accedan a espacios con un clima adecuado para desarrollar sus actividades diarias. Asimismo, su belleza reconocida y la accesibilidad para obtenerlo en la misma región de Arequipa coloca al sillar como un material de bajo impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Agustín por el apoyo recibido para la elaboración del proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- Alonso, R. (2016). *Ignimbrita o Sillar: Una roca de construcción ecológica*. Daniel Salmoral. Consultado el 8 de enero de 2018. <http://danielsalmoral.com/2016/04/23/ignimbrita-o-sillar-una-roca-de-construccion-ecologica-por-ricardo-alonso/>
- Cueva, G. (2017). *Percepción de los cortadores de ignimbrita de la Quebrada de Añashuayco como Patrimonio Cultural, Distrito de Cerro Colorado* [tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3179/Ancunegj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernando, T. (2001). *Catálogo Sísmico del Perú 1471-1982*. Instituto Geofísico del Perú. <https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/hand->

- le/20.500.12816/789/cat_sis_1471_1982.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Instituto de Control y Gerencia. (2016). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. ICG. Consultado el 24 de enero de 2018. <http://www.construccion.org/normas/rne2012/rne2006.htm>.
- Lara Galindo, J. C. (1988). *Ensayos de Albañilería en Sillar* [tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Llanque, J. (2000). *Arquitectura Bioclimática* (1.ª ed.). Universidad Nacional de San Agustín.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2017). Consultado el 20 de agosto de 2017. <http://www.onnce.org.mx/index.php/es/>.
- Real Academia de Ciencias Exactas, Física y Naturales. (2018). *Glosario de geología*. RACEFN. Consultado el 9 de abril de 2018. http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm#I
- Tudela, F. (1982). *Ecodiseño* (1.ª ed.). Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco.