

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**



**TESIS**

**PROPIEDADES TÉRMICAS DEL BASALTO PARA ALMACENAMIENTO DE  
CALOR EN VIVIENDAS DEL ALTIPLANO**

**PRESENTADA POR:**

**MARIO SERAFIN CUENTAS ALVARADO**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2020**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**



**TESIS**

**PROPIEDADES TÉRMICAS DEL BASALTO PARA ALMACENAMIENTO DE  
CALOR EN VIVIENDAS DEL ALTIPLANO**

**PRESENTADA POR:**

**MARIO SERAFIN CUENTAS ALVARADO**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

  
.....  
Dr. BERNABÉ CANQUI FLORES

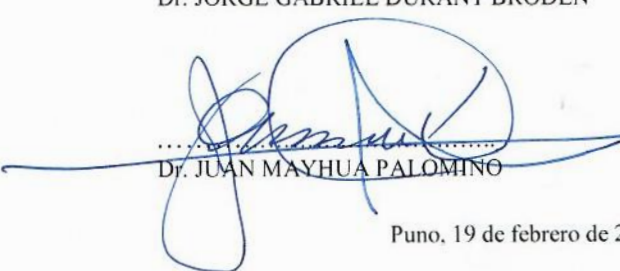
PRIMER MIEMBRO

  
.....  
Dr. OSCAR ELOY LLANQUE MAQUERA

SEGUNDO MIEMBRO

.....  
Dr. JORGE GABRIEL DURANT BRODEN

ASESOR DE TESIS

  
.....  
Dr. JUAN MAYHUA PALOMINO

Puno, 19 de febrero de 2020

**ÁREA:** Ciencia, tecnología y medio ambiente.

**TEMA:** Propiedades térmicas del basalto

**LÍNEA:** Evaluación tecnológica y del medio ambiente

## DEDICATORIA

A Rocío del Pilar, la razón de mi vida

A mis hijos, Gustavo, Gloria, Andrea y Mariana

A Mario y Cristina, mis padres que me dieron la vida

A mis queridos hermanos

A mis amigos y compañeros del doctorado

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis compañeros del doctorado 2014-2015. A la Universidad Nacional del Altiplano en su Escuela de Posgrado por la oportunidad de optar el Grado de Doctor. A mis amigos de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por su apoyo al desarrollo de la investigación. A Rocío del Pilar, amiga y esposa por su respaldo en esta etapa de formación y a Gustavo Enrique, Gloria Cristina, Andrea del Rocío y Mariana de los Ángeles con amor filial.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1

### CAPITULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	3
1.1.1. Método solar pasivo	3
1.1.2. Recepción y conservación de calor en la vivienda	4
1.1.3. Masa térmica	4
1.1.4. Almacenamiento de energía	5
1.1.5. Sistemas de acumulación térmica de calor sensible	5
1.1.6. Eficiencia energética del hormigón	6
1.1.7. La roca natural: la roca	6
1.1.8. El basalto en la región de Puno	7
1.1.9. Propiedades térmicas de las rocas	7
1.1.9.1. Conductividad térmica	8
1.1.9.2. Capacidad calorífica volumétrica	10
1.1.9.3. Difusividad térmica	11
1.1.9.4. Coeficiente de expansión térmica	12
1.1.9.5. Emisividad	12
1.1.9.6. Albedo	12
1.1.9.7. Efecto de la temperatura en las propiedades térmicas de las rocas	14
1.1.9.8. Composición mineral, fluidos saturantes y porosidad en una roca	14
1.1.9.9. Compacidad	15
1.2 Antecedentes	16

### CAPITULO II

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema	24
2.2 Enunciados del problema	25
	iii

2.2.1. Problema general	25
2.2.2. Problemas específicos	25
2.3 Justificación	25
2.4 Objetivos	26
2.4.1. Objetivo general	26
2.4.2. Objetivos específicos	26
2.5 Hipótesis	26
2.5.1. Hipótesis general	26
2.5.2. Hipótesis específicas	26

**CAPITULO III  
MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1 Lugar de estudio	27
3.2 Población	29
3.3 Muestra	29
3.3.1. Propiedades del material	29
3.4 Método de investigación	30
3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	30
3.5.1. Objetivo específico 1	30
3.5.1.1. Teoría	30
3.5.1.2. Diseño experimental	32
3.5.1.3. Preparación de la muestra	33
3.5.1.4. Procedimiento experimental	34
3.5.1.5. Procedimiento experimental	35
3.5.1.6. Análisis estadístico	35
3.5.2. Objetivo específico 2	36
3.5.2.1. Estación Puno	36
3.5.2.2. Obtención de información meteorológica	37
3.5.2.3. Evaluación de información de temperatura	37
3.5.2.4. Análisis estadístico	37
3.5.3. Objetivo específico 3	37
3.5.3.1. Montaje experimental y recogida de datos	37
3.5.3.2. Vigilancia de las condiciones meteorológicas	38
3.5.3.3. Recolección de datos de temperatura	38

**CAPITULO IV  
RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 Evaluar las propiedades térmicas del basalto.	39
4.2 Evaluar las características climáticas del altiplano puneño (ciudad de Puno).	42

4.3 Determinar el espesor que debe tener la placa de basalto para almacenar calor en las viviendas del altiplano puneño.	46
CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS	57

**ÍNDICE DE TABLAS**

1. Materiales de almacenamiento de calor y sus propiedades térmicas a 20 °C	6
2. Valores promedio de conductividad térmica $\lambda$ y difusividad térmica $\alpha$ de algunas rocas	9
3. Propiedades de materiales representativos para almacenamiento de calor	13
4. Resumen de las propiedades estructurales y mineralógicas del basalto de Puno.	30
5. Temperaturas mensuales en la ciudad de Puno, período febrero 2019- enero 2020	43
6. Temperaturas mensuales en la ciudad de Puno, período 2 al 4 de mayo 2029	44
7. Resultados de la evaluación de las propiedades térmicas del basalto y la temperatura de la ciudad de Puno.	57



**ÍNDICE DE FIGURAS**

1. La conductividad térmica de los minerales básicos que forman las rocas y la composición de rocas.	15
2. Ubicación de la ciudad de Puno.	28
3. Ubicación de la Facultad de Ingeniería de Minas UNA Puno	28
4. Diagrama que representa el concepto de transferencia de calor 1D en una losa de roca.	30
5. Diagrama esquemático que muestra parte de la instalación experimental compuesta por fuente de calor, porta muestras y termopares.	32
6. Instalación experimental con muestra.	33
7. (1) Equipo de adquisición y registro de datos FluxDAQ+, (2) Muestra de basalto y (3) Sensores PHFS-01.	34
8. Muestra de basalto	35
9. Ubicación de la estación meteorológica de la ciudad de Puno.	36
10. Ploteo de la conducción de calor mediante la técnica estado transitorio para el basalto.	39
11. Difusividad térmica del basalto en el rango de temperatura de 25-1000 C	40
12. Ploteo de la conducción de calor mediante la técnica estado estacionario para el basalto.	41
13. Temperaturas mensuales en la ciudad de Puno, período febrero 2019- enero 2020	43
14. Temperaturas horarias en la ciudad de Puno, del 2 al 4 de mayo de 2019	45
15. Temperaturas horarias en la ciudad de Puno, del 3 al 4 de julio de 2019	45
16. Flujos de calor a través de la superficie exterior e interior del bloque de 2,5 cm.	46
17. Flujos de calor a través de la superficie exterior e interior del bloque de 10 cm.	47

## ÍNDICE DE ANEXOS

1. Resultados de la investigación	57
2. Especificaciones Técnicas del Sistema de Adquisición y Registro de Datos FluxDAQ+	58
3. Especificaciones Técnicas del Sensor PHFS-01	59
4. Certificado de calibración del sensor PHFS-01, PH-10479	61
5. Modelo de la información que se obtiene de la página web de SENAMHI	61
6. Temperatura de la ciudad de Puno, Período enero 2019 a enero 2020	62

## RESUMEN

Las técnicas constructivas de las viviendas en el altiplano no son las más adecuadas, pues no son aisladas térmicamente y la roca es un elemento que no es utilizado adecuadamente debido al desconocimiento de sus propiedades térmicas. El objetivo de esta investigación fue evaluar las propiedades térmicas del basalto para su uso en el almacenamiento de calor durante el día y la liberación durante la noche. Para ello, se adaptó estructuras planteadas por Ramakrishnan, 2012 y McAllister, 2017. Los resultados fueron: la difusividad térmica ( $\alpha$ ) en el rango de 0,57 a 0,80 mm<sup>2</sup>/s y la conductividad térmica ( $K$ ) en el rango de 1,38 a 1,81 W/m°C; de la misma manera se analizó los registros de temperatura de febrero 2019 a enero 2020 de la ciudad de Puno, la temperatura mínima (-2 °C) se registró entre las 6 y 7 de la mañana del 26 de julio y la temperatura máxima (18,9 °C) se registró el día 3 del mismo mes a las 4 de la tarde, la mayor diferencia de temperatura mensual (20,9 °C) se registra en el mes de julio. En un análisis horario del 3 al 4 de mayo se observó que las temperaturas mínimas se registraron entre las 7 y 8 de la mañana y las temperaturas máximas se registraron entre las 3 y 4 de la tarde. Se determinó también la transferencia de calor de la superficie e interior de dos placas de basalto de 2,5 cm y 10 cm de espesor durante el proceso de almacenamiento y disipación de calor. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios cuando se compararon con literatura científica consultada; el espesor de la roca puede elegirse específicamente para proporcionar la mejor combinación posible de amplitud y momento de entrega de calor y poder ajustarse a las necesidades de los ocupantes.

**Palabras clave:** Almacenamiento de calor, basalto, conductividad térmica, difusividad térmica.

## ABSTRACT

The construction techniques of the houses in the altiplano are not the most appropriate, since they are not thermally insulated and the rock is an element that is not used properly due to the lack of knowledge of its thermal properties. The aim of this research was to evaluate the thermal properties of basalt for use in heat storage during the day and release during the night. For this purpose, structures proposed by Ramakrishnan, 2012 and McAllister, 2017 were adapted. The results were: thermal diffusivity ( $\alpha$ ) in the range of 0.57 to 0.80 mm<sup>2</sup>/s and thermal conductivity (K) in the range of 1.38 to 1.81 W/m°C; Similarly, temperature records from February 2019 to January 2020 in the city of Puno were analyzed, the minimum temperature (-2 °C) was recorded between 6 and 7 a.m. on 26 July and the maximum temperature (18.9 °C) was recorded on 3 July at 4 p.m., the greatest monthly temperature difference (20.9 °C) being recorded in July. An hourly analysis from 3 to 4 May showed that minimum temperatures were recorded between 7 and 8 a.m. and maximum temperatures between 3 and 4 p.m. Heat transfer from the surface and interior of two 2,5 cm and 10 cm thick basalt plates was also determined during the storage and heat dissipation process. The results obtained were satisfactory when compared with scientific literature consulted; the thickness of the rock can be chosen specifically to provide the best possible combination of amplitude and timing of heat delivery and to be able to adjust to the needs of the occupants.

**Keywords:** Heat storage, basalt, thermal conductivity, thermal diffusivity

## INTRODUCCIÓN

Materiales que almacenan el calor y liberan el mismo en las horas más frías, fueron esenciales desde la antigüedad para construir viviendas en el desierto y en climas más fríos, las antiguas culturas desarrollaron sofisticados métodos de construcción utilizando adobe, roca y agua para utilizar la energía solar, buscando enfriar sus viviendas durante los días de calor y calentar las mismas en las noches frías. La roca era el material predominante en la construcción de grandes edificios antes del siglo XX. Aunque su uso inicial era estructural, las aplicaciones contemporáneas suelen utilizar losas delgadas de roca como revestimiento duradero y atractivo. (Rempel & Rempel, 2013)(Anil Kumar, 2015).

La enorme variedad de composiciones minerales de las rocas, mezcladas naturalmente en innumerables proporciones y disposiciones geométricas, ofrecen la posibilidad de obtener una amplia gama de propiedades térmicas en las paredes de roca.

El uso de roca natural de baja conductividad térmica como un elemento de aislamiento en los edificios es muy importante para ahorrar energía (Yaşar, Erdoğan, & Güneyli, 2008). Pero, en el altiplano puneño lo que se busca es almacenar calor durante el día, para irradiarlo en la noche y mantener caliente las viviendas.

En este contexto se planteó la siguiente interrogante: ¿Es posible usar basalto para almacenar calor durante el día y liberarla durante la noche en una vivienda del altiplano puneño?, para responder, se definió los siguientes objetivos específicos : a) evaluar las propiedades térmicas del basalto, principalmente la difusividad y conductividad térmica; b) evaluar las características climáticas del altiplano puneño, incidiendo en la temperatura de la ciudad de Puno durante el período de febrero del 2019 a enero del 2020 y finalmente c) determinar el espesor que debe tener una placa de basalto para almacenar calor en las viviendas del altiplano puneño.

Los principales resultados obtenidos son: la estimación de la difusividad térmica  $\alpha = 0,67$  mm<sup>2</sup>/s y la conductividad térmica  $K = 1,58$  W/mK del basalto. El análisis de los registros de temperatura del período mencionado indica la temperatura mínima (-2 °C) se registró entre las 6 y 7 de la mañana del 26 de julio y la temperatura máxima (18,9 °C) se registró el día 3 del mismo mes a las 4 de la tarde, la mayor diferencia de temperatura mensual (20,9 °C) se registra en el mes de julio. En un análisis horario del 3 al 4 de mayo se observó que las temperaturas mínimas se registraron entre las 7 y 8 de la mañana y las temperaturas máximas se registraron entre las 3 y 4 de la tarde; se determinó también la temperatura de la superficie y el interior de

las placas de basalto durante el proceso de almacenamiento de calor y disipación de la misma.

Conforme a la investigación científica y los lineamientos de la Escuela de Posgrado, el trabajo final se presenta en cuatro capítulos:

Capítulo I: Revisión de literatura: Marco teórico y antecedentes de la investigación.

Capítulo II: Planteamiento del problema: Definición del problema, enunciados del problema, justificación, objetivos de la investigación e hipótesis.

Capítulo III: Materiales y Métodos: Ámbito de estudio, población y muestra, materiales, descripción de métodos por objetivos, diseño experimental y análisis estadístico.

Capítulo IV: Resultados y Discusión. Se ilustra los resultados correspondientes a los tres objetivos específicos a través de tablas y figuras con las interpretaciones y análisis.

Finalmente se consignan las conclusiones, recomendaciones pertinentes, referencias bibliográficas y se insertan los anexos correspondientes.

## CAPITULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco teórico

##### 1.1.1. Método solar pasivo

El principio de la calefacción solar es simple. Consiste en aprovechar la energía contenida en la radiación solar transformándola en calor. Para ello, basta colocar una materia densa frente a esta radiación. Una vez realizada esta transformación, se presentan dos posibilidades de utilización del calor (Rozis & Guinebault, 1997):

- Método activo, la materia es transportada hacia la zona que requiere calefacción, donde libera su calor.
- Método pasivo, la materia ya está en contacto con el local que requiere calefacción y le restituye su calor. Apela a un diseño cuidadoso de los ambientes, se trata de utilizar ingeniosamente los materiales de construcción y de elaborar formas apropiadas en correspondencia con el clima exterior.

En zonas de gran amplitud térmica diaria, una vivienda que aplica el diseño solar pasivo es capaz de absorber la energía solar a través de las ventanas, y almacenarla en la gran masa de las losas, muros y techos, con la posibilidad de liberarla sólo cuando la temperatura del aire interior disminuye a valores menores a los de estos elementos, mediante la radiación. Este sistema utiliza la capacidad de almacenar calor del hormigón para moderar las temperaturas extremas tanto en verano como en invierno (Pastormerlo & Souza, 2013).

A los efectos de analizar el comportamiento de los cerramientos exteriores, que son los elementos constructivos que reciben mayor radiación, hay que tener en cuenta que ni la energía se acumula instantáneamente en el muro, ni éste es capaz de cederla tampoco en un instante. Existe un período de tiempo entre el momento en el que una forma de

radiación incide sobre un material y el momento en el que, tras atravesarlo, es cedida al otro lado; ese período de tiempo se denomina desfase de la onda térmica (De Ignacio Vivens, Soutullo Castro, López-Zaldivar, Lozano-Diez, & Verdú Vázquez, 2018).

### **1.1.2. Recepción y conservación de calor en la vivienda**

La inercia térmica es la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura y se vincula directamente con la acumulación de energía. Es un concepto clave en climas con oscilaciones térmicas diarias importantes, ya que la capacidad de acumulación térmica de los materiales que conforman un elemento arquitectónico es básica para conseguir el adecuado nivel de confort y ahorro energético en la vivienda. El calor acumulado durante el día se libera en el período nocturno, a mayor inercia térmica mayor estabilidad térmica. Los materiales que presentan una buena masa térmica, y por tanto inercia térmica, son aquellos que tienen: alto calor específico, alta densidad y baja conductividad térmica. Los materiales con mejor inercia térmica son: adobe, ladrillo, tierra, barro, césped, rocas y rocas naturales, hormigón y el agua (Atecos, 2010).

Los materiales que acumulan energía durante el día, para devolver el calor durante la noche han sido fundamentales para la construcción desde la antigüedad. Aunque la construcción con materiales térmicamente recargables se convirtió en casos aislados con la llegada de la calefacción y refrigeración basada en combustibles fósiles, la preocupación por el cambio climático y la generación de energía han provocado un nuevo entusiasmo por estas sustancias de alta capacidad calorífica y conductividad térmica moderada: roca, adobe, tierra apisonada, ladrillo, agua, hormigón, y más recientemente los materiales de cambio de fase. Aunque similares en términos generales, estas sustancias absorben y liberan calor en patrones únicos característicos de su mineralogía, densidad, fluidez, emisividad y calor latente de fusión (Rempel & Rempel, 2013).

### **1.1.3. Masa térmica**

Masa térmica se refiere a los materiales de gran capacidad térmica que pueden absorber el calor, almacenarlo y liberarlo posteriormente. Ellos constituyen componentes de construcción tales como paredes, tabiques, techos, suelos y muebles de un edificio que puede almacenar energía térmica. Los que ayudan en la regulación de la temperatura



interior absorbiendo y liberando progresivamente el calor acumulado. Para que el almacenamiento térmico sea eficaz, la variación de temperatura ambiente diurna debe superar los 10 °C. La optimización de la masa térmica se realiza considerando las propiedades termo físicas de los materiales de construcción, la orientación de la construcción, el aislamiento térmico, la ventilación, los sistemas auxiliares de refrigeración y los hábitos de los ocupantes de la vivienda (Sadineni, Madala, & Boehm, 2011).

Durante el transcurso del día el nivel de masa térmica proporcionada por un material determinará la profundidad a la que el calor puede penetrar y como consecuencia, la eficacia con la que puede actuar como acumulador térmico.

#### **1.1.4. Almacenamiento de energía**

Las técnicas de almacenamiento de energía son una de las principales preocupaciones de este siglo debido a la escasez de fuentes convencionales no renovables de energía, el aumento de la contaminación del medio ambiente, aumento de la brecha entre la oferta y la demanda de energía y la distribución no uniforme de las fuentes de energía renovables como la energía solar, la energía eólica, la energía geotérmica y la energía de las corrientes marinas. Otro problema es la utilización y disponibilidad de energía en diferentes intervalos de tiempo y por lo tanto se requieren de sistemas de almacenamiento de energía como fuente de alimentación ininterrumpida. Los sistemas de almacenamiento de energía en la actualidad principalmente se basan en energía electroquímica, en las que las baterías de iones de Li han demostrado su gran potencial y adquirido una gran parte del mercado de almacenamiento de energía en detrimento de las baterías de plomo-ácido convencionales (Dinker, Agarwal, & Agarwal, 2017).

#### **1.1.5. Sistemas de acumulación térmica de calor sensible**

La acumulación de calor mediante el aumento de la temperatura de un material, es conocido como acumulación térmica de calor sensible. Los materiales utilizados para un eficiente sistema de acumulación térmica de calor sensible deben tener alta capacidad de calor específico, estabilidad a largo plazo en términos de ciclos térmicos y deben ser compatibles con el material del recipiente en el que el almacenamiento se lleva a cabo. Una lista de los diferentes materiales utilizados para el almacenamiento

de calor sensible junto con sus propiedades se presenta en la Tabla 1 y estos materiales incluyen metales como el aluminio, cobre, plomo, etc.

Tabla 1

*Materiales de almacenamiento de calor y sus propiedades térmicas a 20 °C*

Material	Capacidad térmica (kJ/kg K)	Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad energética (kJ/m <sup>3</sup> )
Aluminio	0,945	238,400	2700,0	2551,50
Cobre	0,419	372,000	8300,0	3477,70
Hierro	0,465	59,300	7850,0	3650,25
Plomo	0,131	35,250	11340,0	1485,54
Ladrillo	0,840	0,500	1800,0	1512,00
Concreto	0,879	1,279	2200,0	1933,80
Granite	0,892	2,900	2750,0	2453,00
Grafito	0,609	155,000	2200,0	13339,80
Caliza	0,741	2,200	2500,0	1852,50
Arenisca	0,710	1,800	2200,0	1562,00
Agua	4,183	0,609	998,3	4175,88

Fuente: (Dinker et al., 2017)

### 1.1.6. Eficiencia energética del hormigón

El hormigón como material de construcción se caracteriza por su capacidad de resistencia a la compresión, su uso como hormigón estructural, su elevada resistencia al fuego, su capacidad de aislamiento acústico y su elevada inercia térmica. La principal ventaja energética derivada de la utilización del hormigón en los edificios es su elevada masa térmica que conduce a la estabilidad térmica. Ésta ahorra energía y proporciona un mejor ambiente interior para los usuarios del edificio. La elevada inercia térmica que el hormigón proporciona mejora el rendimiento energético y aumenta el confort térmico del edificio. Como todo material masivo, el hormigón actúa como acumulador. Durante las estaciones del año en las que es preciso el uso de la calefacción, almacena la energía procedente de los incrementos de calor producidos por la acción solar o por la actividad de los ocupantes del edificio, y la libera más tarde a lo largo del día. Por otro lado, la capacidad del hormigón de enfriarse durante la noche, y aportar posteriormente este enfriamiento al interior del edificio durante el día, es otra forma de contribuir al confort térmico interior durante el verano (Instituto del Centro Portland Argentino, 2013).

### 1.1.7. La roca natural: la roca

La roca es el más antiguo, más abundante, y tal vez el más importante material de construcción de los pueblos prehistóricos y civilizados. Con la roca prepararon sus

muros de defensa y torres. Ellos vivían en edificios de roca, adoraban a sus dioses en templos de roca, y construyeron carreteras y puentes de roca para comunicarse. La roca se puede clasificar por su formación y origen geológico. La roca ígnea es formada por la solidificación y enfriamiento del material fundido que emerge de lo profundo de la tierra o es empujado a la superficie por la acción volcánica. El granito es la principal roca de construcción de origen ígneo. Rocas sedimentarias como la arenisca, pizarra y roca caliza están formadas por depósitos en las profundidades de los océanos de minerales procedentes de la erosión y destrucción de rocas que se encuentran en la superficie terrestre. Rocas metamórficas de origen ígneo o material sedimentario cuya estructura ha cambiado por acción del calor o presión extrema. El mármol, cuarcita y pizarra son rocas metamórficamente formados (Beall, 2004)(Anil Kumar, 2015).

La roca fue el material predominante en la construcción de grandes edificios antes del siglo 20. Usado inicialmente con fines estructurales, aplicaciones contemporáneas utilizaron planchas de roca delgadas como revestimiento u ornamento durable y atractivo. (Rempel & Rempel, 2013).

#### **1.1.8. El basalto en la región de Puno**

En la región de Puno se llegan a reconocer rocas plutónicas e hipabisales; en los primeros se encuentran grandes cuerpos intrusivos o batolitos, presentes al norte de esta región e intrusivos menores, de naturaleza ácida a intermedia, distribuidos a lo largo de toda la región. Y segundo, se tiene las intrusiones hipabisales o subvolcánicas distribuidas en la parte central de Puno; conforman pequeños cuerpos de tipo stock, diques y sills con naturaleza predominantemente ácida. El basalto, se encuentra como parte del Grupo Tacaza (Formación Pichu) y el Grupo Sillapaca (Formación Umayo) (Díaz, Carpio, & Ramírez, 2012). La Formación Cayconi, Volcánico Caraycasa, Formación Huenque (Gonzales & Lopez, 2015).

#### **1.1.9. Propiedades térmicas de las rocas**

Las propiedades térmicas - conductividad térmica, difusividad térmica, calor específico, capacidad térmica volumétrica y efusividad térmica - son propiedades físicas fundamentales de las rocas y de los minerales que las forman. Tienen significados físicos claros, y dos de ellos (conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica)

se utilizan en la ecuación de conducción de calor de Fourier para sólidos homogéneos:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = F \quad (1)$$

donde  $T$  es la temperatura en un punto del cuerpo sólido con coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$  es el tiempo,  $c$  es el calor específico del sólido,  $\rho$  es la densidad del sólido,  $\lambda$  es la conductividad térmica sólida, y  $F$  es una función de las fuentes de calor (Popov, Beardsmore, Clauser, & Roy, 2016).

### 1.1.9.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica o el coeficiente de conductividad térmica de un material define su capacidad para transferir calor. Determina dónde y cuánto calor fluye en respuesta a las diferencias de temperatura de la roca. Puede definirse considerando un cubo de material homogéneo con una diferencia de temperatura entre dos caras opuestas. La cantidad de calor ( $q$ ) que fluye a través del cubo, desde la cara de alta temperatura hasta la cara de baja temperatura, es proporcional a la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) dividida por la distancia existente entre las caras ( $\Delta x$ ). La constante de proporcionalidad ( $\lambda$ ) es la conductividad térmica, que en el SI es  $J/ms^{\circ}K$  o  $W/m^{\circ}K$ . Esta relación se conoce como la ley de Fourier (o ecuación) de difusión térmica (Ramakrishnan, Bharti, Nithya, Kusuma, & Singh, 2012)

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

La conductividad térmica de las rocas depende de varios parámetros, incluyendo la composición mineral, orientación de los minerales, su distribución espacial, las estructuras de porosidad y unión, la dirección de propagación del calor, la anisotropía y las propiedades de los fluidos de relleno de poros. Esto conduce a una gran variabilidad en las conductividades térmicas dentro de cada tipo de roca (sedimentaria, ígneas y metamórficas) (Balkan, Erkan, & Şalk, 2017) (Demezhko, Glazachev, & Konoplin, 2018). La anisotropía térmica es común en los materiales finamente estratificados, tales como las rocas, en los que la conductividad térmica paralela a las capas es hasta un 50% más alta que la conductividad térmica perpendicular a éstas. En las rocas finamente laminadas, el valor de la conductividad térmica en la dirección perpendicular a las capas —

y, en consecuencia, el flujo de calor para una caída de temperatura dada— suele ser entre 5% y 30% menor que el valor correspondiente en las direcciones paralelas a las capas; en ciertas rocas, la diferencia llega a ser del 50% (Chekhonin et al., 2012).

Tabla 2

*Valores promedio de conductividad térmica  $\lambda$  y difusividad térmica  $\alpha$  de algunas rocas*

Roca	Conductividad térmica ( $\lambda$ en W/m K)	Difusividad térmica ( $\alpha$ en $10^{-7}$ m <sup>2</sup> /s)
Arena	1,79	9,57
Limolita	1,58	10,28
Argilita	1,67	9,76
Arcilla	1,43	7,30
Marga	1,78	7,53
Caliza	2,37	10,92
Chock	1,63	4,77
Granito	2,68	9,13
Granodiorita	2,79	5,15
Porfirita	1,74	9,54
Diorita	2,10	6,38
Andesita, Andesita basáltica	1,87	
Basalto	2,11	5,34
Diabasa	2,50	9,93
Gabro	2,47	9,70
Esquisto	2,55	9,60
Gneis	2,41	7,98
Anfibolita	2,39	6,84
Gneis granítico	2,04	7,24
Cuarcita	5,00	
Anhidrita	5,43	
Harzburgita	2,69	
Dunita	2,77	
Olivino gabro	2,65	
Gabro norita	2,22	

Fuente: (Dinker et al., 2017)

Al igual que muchas propiedades de las rocas, la conductividad térmica depende no sólo de su composición mineral y textura sino también de su grado de cristalización, que afecta a la porosidad. La conductividad térmica efectiva de la roca es diferente debido a la diferente composición mineral. Diferentes minerales tienen diferente conductividad térmica. El cuarzo tiene la conductividad térmica más alta, mientras que el feldespato, la hornblenda y la biotita tienen una conductividad térmica relativamente baja. En comparación,

las rocas sedimentarias contienen cuarzo y carbonato más altos con un alto coeficiente de transferencia de calor que las volcánicas. Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor de las rocas sedimentarias es mayor que el de las volcánicas. De manera similar, el componente detrítico del conglomerado tiene principalmente cuarzo, feldespato y esquejes, mientras que la lutolita contiene una gran cantidad de minerales arcillosos con bajo coeficiente de conducción de calor y una pequeña cantidad de cuarzo, feldespato y mica. Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor efectivo de las lodos es menor que el de los conglomerados (Shengjun, Fei, & Guangjian, 2015).

Las rocas con estructura cristalina muestran una mayor conducción de calor que las rocas amorfas y vítreas de la misma composición (Yaşar et al., 2008). El espacio intersticial, o el aire, posee básicamente una conductividad térmica nula, a diferencia de la mayoría de las rocas sólidas (Eppelbaum, Kutasov, & Pilchin, 2014).

#### 1.1.9.2. Capacidad calorífica volumétrica

La capacidad calorífica volumétrica ( $c$ ) especifica la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de una unidad de volumen de roca (y de cualquier fluido intersticial contenido en su interior) en un grado. La unidad en el SI es: J / m<sup>3</sup> K. Puede suceder que durante el incremento de la temperatura no se produzca ningún cambio de fase, tal como la fusión. La capacidad calorífica volumétrica de la arenisca seca típicamente se encuentra entre la del bitumen y la del agua. Dado que 1 m<sup>3</sup> de agua pesa 1000 kg, la capacidad calorífica volumétrica del agua es de aproximadamente 4,2 MJ/m<sup>3</sup>K. La capacidad calorífica volumétrica de las rocas en general es más baja y se encuentra en el rango de 1 a 4 MJ/m<sup>3</sup>K. (Chekhonin et al., 2012). Si utilizamos la densidad de la roca, este parámetro se redefine como la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en 1 °C. El calor específico indica la capacidad de las rocas de almacenar calor. La unidad del calor específico en el SI es: J /kg K. El calor específico se puede medir a presión constante ( $c_p$ ) o a volumen constante ( $c_v$ )(Eppelbaum et al., 2014).

### 1.1.9.3. Difusividad térmica

La difusividad térmica determina la velocidad con la que se desplaza un frente de temperatura a través de la roca. Controla la tasa de elevación de la temperatura en un bloque uniforme de material, cuando es mayor el calor que fluye hacia el interior que hacia el exterior del bloque. Si se establece un gradiente de temperatura inicial entre el bloque y sus adyacencias, los flujos de calor hacia el interior y hacia el exterior son determinados por la conductividad térmica del bloque, en tanto que el incremento de temperatura causado por el desequilibrio térmico es determinado por la capacidad calorífica volumétrica del bloque. Por consiguiente, la difusividad térmica es la relación entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica. La conductividad y la difusividad térmicas generalmente exhiben una relación inversa con la temperatura (Chekhonin et al., 2012). El coeficiente de difusividad térmica ( $\alpha$ ) se expresa por la fórmula:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3)$$

La dimensión de la difusividad térmica es  $\text{m}^2/\text{s}$  (Eppelbaum et al., 2014)

La conductividad térmica ( $\lambda$ ), la difusividad térmica ( $\alpha$ ) y la capacidad calorífica volumétrica ( $C$ ) se definen por la relación

$$\alpha = \lambda/C \quad (4)$$

Por lo tanto, cualquiera de estos tres valores puede ser calculado si los otros dos son conocidos.

El calor específico ( $c$ ) se relaciona con  $C$  a través de la ecuación, donde  $\rho$  es la densidad de la roca.

$$c = C/\rho \quad (5)$$

La efusividad térmica ( $\mu$ ) se relaciona con  $\lambda$  y  $C$  a través de la ecuación:

$$\mu = (\lambda * C)^{1/2} \quad (6)$$

(Popov et al., 2016).

#### 1.1.9.4. Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica, relaciona las respuestas térmica y mecánica de las rocas mediante la determinación del grado de expansión de un volumen de roca a medida que se incrementa su temperatura. Mide un cambio fraccional en la dimensión lineal de un cubo uniforme para un incremento de una unidad de temperatura. En los materiales anisotrópicos, cada lado del cubo puede expandirse en una magnitud diferente (Chekhonin et al., 2012).

#### 1.1.9.5. Emisividad

El sol, fuego, equipos, luces, o las personas que habitan un edificio transmiten energía mediante radiación a su entorno y puede ser almacenado. La radiación también es fundamental para la entrega de calor de un elemento de almacenamiento masivo a su entorno. Puesto que cada objeto emite, o irradia energía, en proporción a su temperatura absoluta, la tasa de transferencia de calor por radiación entre dos cuerpos depende sólo de sus temperaturas relativas y de su capacidad para irradiar o emisividad ( $\epsilon$ ). La ley de Stefan-Boltzmann se expresa como:

$$q_r = \epsilon \sigma T^4 \quad (7)$$

donde  $q_r$  es la energía emitida por unidad de área y tiempo [ $J/ (m^2 s)$ , o  $W/m^2$ ],  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann [ $5,67 \times 10^{-8} W/ (m^2 K^4)$ ],  $T$  es la temperatura absoluta (K), y  $\epsilon$  es la emisividad del material. Para emisores perfectos ("cuerpos negros"),  $\epsilon = 1$ , mientras que  $\epsilon < 1$  para "cuerpos grises". Las emisividades de los materiales de almacenamiento masivo típicos son comparables y relativamente altos (Tabla 3 (Rempel & Rempel, 2013)).

#### 1.1.9.6. Albedo

La fracción de la radiación solar incidente que es reflejada por la superficie de un material se llama albedo. El albedo juega un papel importante en el balance energético de la superficie de la tierra, se define como el porcentaje absorbido de la radiación solar incidente. El proceso que resulta en la radiación reflejada se llama reflectancia, por el cual la energía de la radiación es re-irradiada por



Tabla 3

*Propiedades de materiales representativos para almacenamiento de calor*

Material	Conductividad térmica (W/m*K)	Capacidad calor específico (J/kg*K)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Difusividad térmica (mm <sup>2</sup> /s)	Efusiividad térmica (J/K*m <sup>2</sup> *s <sup>0,5</sup> )	Emisividad	
Aire	Aire (20 °C)	0,025	1005	1,2	20	5	
	Aislamiento (espuma)	0,03	1210	43	0,6	40	
	Aislamiento (fibra)	0,05	960	19	2,74	30	
Agua	Líquida, 20 °C	0,6	4180	998	0,14	1580	
Vidrio	Transparente	0,9	840	2500	0,43	1375	0,84-0,95
Sales	CaCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	1	1450	1490	0,46	1470	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> *10H <sub>2</sub> O	0,54	1930	1485	0,19	1240	
	Zn(NO <sub>3</sub> )*6H <sub>2</sub> O	0,46	1340	1900	0,18	1080	
Arcillas	Adobe	0,5 -1,2	840-1000	1200-2000	0,42-0,71	900-1200	0,9
	Tierra apisonada	0,7-1,25	870-1260	1540-1830	0,36-0,79	970-1700	0,9
	Ladrillo	0,7-1,0	790-800	1920-1970	0,4-0,6	1000-1250	0,75-0,93
Concreto	Peso pesado	2,0-3,5	900-1000	2200-2400	0,89-1,6	2000-2800	0,85-0,9
Rocas	Basalto	1,0-2,0	720-1040	2700-3310	0,52-0,71	1680-1960	0,72
	Arenisca	1,0- 2,7	730-930	1990-2450	0,54-1,51	1340-2240	0,9
	Granito	2,4-4,5	650-800	2600-2720	1,15-2,55	2060-3060	0,9
	Cuarcita	6,3-7,7	700	2500-2700	3,6-4,1	3450-3670	
Metales	Aluminio	220	896	2740	90	23000	0,05-0,09
	Cobre	393	390	8910	113	37000	0,07
	Hierro, fundición	48	500	7200	13	13000	45

Fuente: (Rempel &amp; Rempel, 2013)

los átomos o moléculas de la capa superficial del material aproximadamente a la mitad del espesor de longitud de onda incidente. El valor del albedo va de 0 a 1. El valor de 0 se refiere a un cuerpo negro, un material teórico que absorbe el 100% de la radiación solar incidente. El rango de albedo de 0,1-0,2 se refiere a superficies de materiales de color oscuro y rugoso, mientras que los valores alrededor de 0,4-0,5 representan superficies de materiales lisos y de color claro. El albedo de la cubierta de nieve, especialmente la nieve fresca y profunda, puede llegar hasta 0,9. El valor de 1 se refiere a una superficie reflectora ideal (una superficie blanca absoluta) en la que se refleja toda la energía que incide sobre la superficie (Dobos, 2006).

Bajo la radiación solar directa, la temperatura de la roca está influenciada por factores externos como la posición del sol, la duración del calentamiento, el aspecto y el grado de cobertura nubosa, pero de gran importancia son las propiedades térmicas de la roca como el albedo, la conductividad térmica y la capacidad específica de calor. Estas propiedades térmicas son litológicamente variables donde, por ejemplo, la roca de color oscuro (albedo bajo) puede

absorber más energía solar incidente, resultando en temperaturas superficiales más altas en comparación con la roca de color claro (albedo alto) expuesta a las mismas condiciones (Warke & Smith, 1998).

#### **1.1.9.7. Efecto de la temperatura en las propiedades térmicas de las rocas**

La conductividad térmica, la capacidad calorífica, la difusividad térmica y el coeficiente de expansión térmica son propiedades que se relacionan con trozos macroscópicos de materia. Las propiedades térmicas pueden variar entre un punto y otro de una formación rocosa, y dependen de su temperatura y su presión (Chekhonin et al., 2012).

Análisis de datos experimentales sobre la variación de los parámetros térmicos con aumentos de la temperatura y la presión, muestran que, en general, la conductividad térmica ( $\lambda$ ) disminuye, la capacidad calorífica ( $c_p$ ) aumenta y la difusividad térmica ( $a$ ) disminuye considerablemente con el aumento de temperatura (Eppelbaum et al., 2014).

#### **1.1.9.8. Composición mineral, fluidos saturantes y porosidad en una roca**

La conductividad térmica de las rocas puede ser estimada a partir de su composición mineral, pues los minerales, debido a su composición bien definida, exhiben una variación mucho menor en la conductividad térmica que las rocas. Del mismo modo, como la conductividad térmica de una roca porosa varía con los diferentes fluidos que saturan sus intersticios, puede ser de interés conocer la conductividad térmica de una roca cuando está saturado con otros fluidos, lo que se puede realizar en laboratorio. Si la porosidad es importante la conductividad térmica del fluido de saturación puede afectar significativamente la conductividad térmica de la roca saturada. En la figura 1 Se proporcionan dos diagramas, uno para las rocas metamórficas y plutónicas y otro para las rocas volcánicas y sedimentarias. Las diferentes rocas son representativas de varias clases de rocas dentro de cada grupo, representando así el espectro total de la conductividad térmica en cada grupo. La posición del nombre de una roca en el triángulo de composición indica de manera cualitativa su conductividad térmica. Las rocas metamórficas y plutónicas están formadas por cuarzo, feldespatos y

minerales máficos, y el contenido de minerales de estos tres grupos determina básicamente la conductividad térmica de una roca. En las rocas volcánicas y sedimentarias el tercer componente mineral es sustituido por el aire o el agua, ya que la gran variabilidad de la porosidad de estas rocas es un factor importante que controla su conductividad térmica. (Clauser & Huenges, 1995).

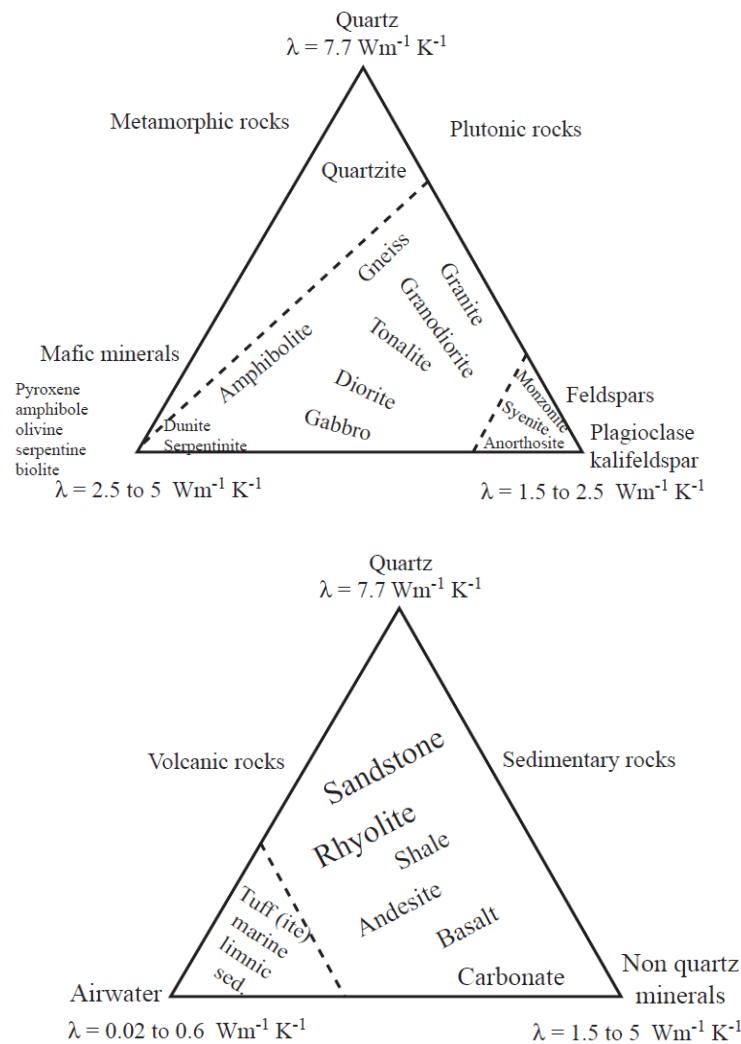


Figura 1. La conductividad térmica de los minerales básicos que forman las rocas y la composición de rocas.  
Fuente: (Clauser & Huenges, 1995)

### 1.1.9.9. Compacidad

El parámetro utilizado para explicar el acoplamiento térmico entre los granos de la roca y el efecto aislante de los espacios porosos en la conductividad térmica se llama compacidad ( $\gamma$ ). Se define como la relación entre el volumen del sólido

al volumen aparente, o la relación entre la densidad aparente ( $d_B$ ) a la densidad del grano sólido ( $d_G$ ). Es el complemento de la porosidad ( $\phi$ ), es decir,  $(\gamma = 1 - \phi)$ . Investigaciones realizadas encontraron que la conductividad térmica del basalto varía linealmente con el cuadrado de la solidez,  $\gamma^2$ . Todas las rocas en la corteza terrestre tienen cierta porosidad que impide la conducción del calor. La conducción térmica en una roca es controlado principalmente por la eficacia relativa de la transmisión de calor en trayectorias de grano a grano, y la conducción a través de los fluidos en los poros es mucho menos importante (Robertson, 1988).

## 1.2 Antecedentes

(Machuca, 2015) determinó la incidencia térmica de la piedra volcánica (traquita, andesita) como elemento constructivo en las viviendas de la comunidad campesina de Sacsamarca ubicada en la Región de Huancavelica a 6 km. de la capital de la región, demostró cuantitativamente que las piedras volcánicas como elemento constructivo influyen en la incidencia térmica de las viviendas, debido a la conductividad y resistencia térmica y que podrán ser aplicados a la propuesta arquitectónica de unos tipos de módulos de viviendas en la comunidad campesina de Sacsamarca, región de Huancavelica. El valor de la conductividad eléctrica de la andesita fue de 1.1 W/mK.

Las necesidades estructurales en una vivienda pueden ser más fácilmente satisfechas por la roca que por el adobe, debido a la alta resistencia a la compresión de la roca, permitiendo construcciones de pared más delgadas. Se obtiene ganancias de calor en las paredes de granito mucho más altos que en las paredes de adobe, alcanzando un máximo de alrededor de 450 W/m<sup>2</sup> durante el día, debido a efusividad térmica más alta de granito (Tabla 3). Las paredes de granito también proporcionan calor al espacio interno mucho más rápidamente y en mayor cantidad que los muros de adobe, los flujos de calor varían de 40 W/m<sup>2</sup> a 110 W/m<sup>2</sup> y se producen entre las 2:00 y 5:00 pm. Por el contrario, las paredes de granito pierden mucho más calor del interior durante la noche (Rempel & Rempel, 2013).

El efecto de masa térmica es generado por materiales que tienen una elevada capacidad térmica, un espesor considerable, un gran calor específico volumétrico, así como una conductividad moderada, entre 0,5 y 2,0 W/mK. Entre ellos podemos indicar el adobe, el ladrillo, la roca, el concreto y el agua. Para los muros de acumulación de calor en climas fríos donde hace falta

calor durante el día y la noche se utilizan materiales de gran densidad, un espesor de 25-40 cm, cara exterior de color oscuro, orientación sur ( $\pm 15^\circ$ ). Los muros captan la radiación solar directa, acumulando el calor para liberarlo por radiación entre 8 a 12 horas (Atecos, 2010).

Paredes delgadas de roca y hormigón bajo el sistema Trombe proporcionan calor poco después de ser expuestas al calor, y en cuanto a la emisión de calor por la noche, se debe seleccionar el espesor adecuado para proporcionar la mejor combinación posible de la amplitud y el momento de la entrega de calor (Rempel & Rempel, 2013).

(Anil Kumar, 2015) presenta una visión general de las rocas como una opción de material natural eficiente en energía y sensible al clima para los edificios ecológicos, pues cuando se considera el uso de rocas en un proyecto de construcción de una vivienda, se debe considerar que las rocas tienen el potencial de ser un material ideal para pisos, revestimientos, techos o pavimentos, y sus propiedades deciden las aplicaciones para las que son más adecuadas. En particular, la roca puede contribuir a reducir el consumo de energía, a disminuir los costos de los servicios públicos y a mejorar la huella ecológica. Cuando se trata de edificios ecológicos, las rocas también tienen el potencial de ganar una cantidad considerable de créditos.

(Flores, 2014) realizó la evaluación del rendimiento térmico aportado por los elementos constructivos de una vivienda en una comunidad rural Colloco - Ilave, provisto de adecuado aislamiento térmico en la envolvente (doble pared de adobe, en el cielo raso: pajacarrizo-yeso y en el piso: tierra apisonada-cama de piedra-plástico-paja y totora), ubicación, la orientación y un sistema de acumulación de energía adecuadamente diseñada a base de encapsulado de piedras andesitas porosas y de totora. La distribución de la energía calorífica almacenada fue primordial en el ambiente dormitorio pues esto permite el aprovechamiento de la energía solar para lograr que la temperatura al interior de la vivienda sea más confortable. Se realizó el análisis del comportamiento térmico de la vivienda construida y la vivienda rural típica, para lo cual se tomaron los datos meteorológicos de la zona (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar), también se registraron la temperatura y humedad relativa del aire en el ambiente interior y exterior de las viviendas desde 19 de junio al 02 de julio del 2013. Obteniéndose en la vivienda construida las temperaturas máximas y mínimas de 15,85 °C y 11,88 °C respectivamente. Según la evaluación de la vivienda construida se aprecia un incremento de temperatura mínimo de 6,26 °C, respecto a la vivienda típica.

(Hall, Lindgren, & Jackson, 2005) realizaron un experimento, donde utilizaron seis ladrillos

de pavimentación de 80 mm de espesor pintados para simular distintos tipos de rocas; los ladrillos fueron pintados desde superficie de color negro (reflectancia 6%), cuatro ladrillos con escalas de grises (incremento de 20% de la reflectancia) hasta un ladrillo de color blanco (reflectancia 87%); la duración de la prueba fue de 3 días. Los resultados mostraron la distribución térmica esperada, el ladrillo con la superficie negra alcanzó un máximo de 22,4 °C, mientras que el blanco sólo fue 14,7 °C. Las temperaturas durante las dos noches muestran que el blanco (2,9 °C y 3,5 °C) continuó siendo más frío que el negro (11,8 °C y 12,3 °C). En términos generales, los datos se ajustan a las percepciones generales de los efectos de albedo de las temperaturas de la roca - la roca oscura es más caliente en todo momento que la roca de color claro- los datos satisfacen la teoría: por lo que el albedo determina la diferencia en las temperaturas superficiales.

(Hall, 2003) En el campus de la Universidad del Norte de Columbia Británica, construyó una estructura con 24 ladrillos de hormigón para monitorear las temperaturas en la superficie, profundidades de 1 cm y 3 cm, los ladrillos fueron colocados verticalmente y con una pendiente de 45° en cada una de las cuatro direcciones cardinales. Los datos de temperatura fueron recolectados a intervalos de 1 minuto durante 10 meses. Los resultados proporcionaron una prueba inequívoca de la ocurrencia de la congelación y descongelación del agua sobre y dentro de los ladrillos. El evento de congelación se evidencia por el fenómeno exotérmico asociado con la liberación de calor latente a medida que el agua se congela. Este fue el primer registro de tales eventos en una situación de campo. Más significativamente, se encontró que la temperatura a la que ocurrió el congelamiento varió significativamente durante el año y que en ocasiones la profundidad de 1 cm se congeló antes de la superficie de la roca. Se concluye que el cambio en la temperatura de congelación se debe a la meteorización química del material (junto con el continuo ingreso de sal por el derretimiento de las nevadas), que, según se muestra, podría producirse durante todo el invierno a pesar de las temperaturas del aire de hasta -30 °C.

(Mostafa, Afify, Gaber, & Abu Zaid, 2004) investigaron las propiedades térmicas de cuatro muestras de basalto obtenidas de diferentes regiones del Desierto Oriental de Egipto. Las mediciones de las propiedades térmicas se realizaron mediante la técnica de ondas de temperatura planas, las propiedades térmicas de estas muestras se midieron en el rango de temperatura de 300 a 900 K. Los valores medios de la conductividad térmica de estas muestras investigadas se encuentran en el rango de  $0,4 \times 10^{-3}$  a  $2,01 \times 10^{-3}$  cal cm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. La variación

de los valores de la conductividad térmica entre estas muestras de basalto depende de la variación de la composición mineral de estas muestras. La difusividad térmica se encuentra dentro del rango de  $1,2 \times 10^{-3}$  a  $3,15 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ . La variación de difusividad térmica de las muestras de basalto en el rango de temperatura estudiado está aproximadamente de acuerdo con la teoría del mecanismo de transporte de calor en los dieléctricos. La diferencia de los valores de difusividad térmica entre estas muestras de grupos de basalto puede atribuirse a la pequeña diferencia de densidad y a la composición mineral.

(Robertson & Peck, 1974) hicieron mediciones de conductividad térmica a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  bajo 30 bares de presión uniaxial en 61 muestras de basalto, obteniendo resultados que oscilan entre 0,2 y  $4,3 \times 10^{-3} \text{ cal/cm s } ^\circ\text{C}$  para las muestras con aire en los poros y de 2,0 a  $5,8 \times 10^{-3} \text{ cal/cm s } ^\circ\text{C}$  para las muestras con agua en los poros. Las diferencias en el tamaño de las vesículas en muestras de la misma porosidad total no afectan a la conductividad térmica. Los microporos y las microfracturas aíslan los granos minerales entre sí y, por lo tanto, reducen la conductividad observada. La conductividad de las muestras de basalto aumenta de forma regular a medida que aumenta la abundancia de olivino fenocristalino.

(Hartlieb, Toifl, Kuchar, Meisels, & Antretter, 2016) presentan los resultados de estudios experimentales sobre las propiedades térmicas capacidad calorífica específica, difusividad térmica y expansión térmica del basalto, el granito y la arenisca en un rango de temperatura de  $25\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los resultados de la difusividad térmica de los tres tipos de rocas se caracterizaron por grandes diferencias a temperaturas inferiores a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los valores iniciales fueron de  $0,75 \text{ mm}^2/\text{s}$ , entre  $0,9$  y  $1,2 \text{ mm}^2/\text{s}$  y alrededor de  $1,8 \text{ mm}^2/\text{s}$  para el basalto, el granito y la arenisca, respectivamente, a temperaturas más altas ( $>500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) los tres tipos de roca mostraron un comportamiento similar. La desviación en el granito y la arenisca fue ligeramente mayor que la desviación en el basalto. De todas formas, los valores se mantuvieron alrededor de  $1,5 \text{ mm}^2/\text{s}$  hasta  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Con respecto a la conductividad térmica de los tres tipos de roca, ninguna de las rocas se caracterizó por un comportamiento significativo a cualquier temperatura. El basalto comenzó ligeramente por encima de  $1,5 \text{ W/mK}$  a temperatura ambiente y disminuyó a algo menos de  $1,5 \text{ W/mK}$  a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . La conductividad térmica del granito comenzó en  $2,2$ , con un mínimo de  $1,25$  y un ligero aumento hasta  $1,35 \text{ W/mK}$  a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que la conductividad térmica de la arenisca llegó a ser de  $3,5$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , disminuyó hasta un mínimo de  $1,5$  a aproximadamente  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  y fue ligeramente  $>1,5 \text{ W/mK}$  a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Una solución rentable para el almacenamiento de energía térmica en las centrales de energía solar concentrada son los lechos de rocas compactas con aire como fluido de transferencia de calor. En la investigación se ha evaluado dos variedades de rocas de basalto recogidas en dos regiones diferentes (Bahariya Oasis – Egipto y Saint-Julien-Boutières – France) para el almacenamiento de energía térmica de lecho compacto a alta temperatura. Se caracterizaron las propiedades termofísicas y mecánicas más relevantes de las rocas estudiadas como materiales sensibles de almacenamiento de calor, los resultados obtenidos demostraron el potencial de las rocas de basalto de grano fino para ser utilizadas como material de relleno en aplicaciones de almacenamiento de energía adecuadas para plantas de energía solar concentrada de alta temperatura (hasta 700 °C). Además de su disponibilidad a bajo costo con bajo impacto ambiental, las rocas de basalto mostraron altas propiedades termofísicas y buena estabilidad térmica en este rango de temperatura. Se reportan valores de conductividad térmica de 2,02 y 2,51 W/mK y valores de 0,964 y 0,852 mm<sup>2</sup>/s para la difusividad térmica de las muestras. (Nahhas, Py, & Sadiki, 2019).

(Al-Zyoud, 2012) para su tesis doctoral estudió un sistema de acuíferos basálticos poco profundos en el noreste de Jordania por su potencial como recurso geotérmico para la refrigeración de viviendas. Las aguas subterráneas de este lugar se utilizan como medio geotérmico para la refrigeración. El agua fría se bombea desde el depósito mediante pozos de extracción. Esta agua se introduce en el circuito de los edificios y se produce un intercambio de calor entre el aire ambiente de los edificios y el agua fría en circulación. El agua caliente recuperada se inyecta de nuevo en el suelo mediante pozos de inyección. Se examinaron las propiedades termofísicas, la composición mineralógica y geoquímica del basalto del Harrat jordano, entre ellas la conductividad térmica, obteniendo valores que se encuentran dentro del rango de 1,44 a 1,96 W\*m<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>.

(Iñigo & Vicente-Tavera, 2002) han estudiado las variaciones de gradientes de temperatura que se producen entre la superficie expuesta al ambiente exterior y el interior de los bloques de rocas graníticas de diferentes características que forman parte de la Catedral de Ávila, en función de factores climáticos (temperatura, flujos de energía superficial). Del análisis estadístico de los datos recogidos se desprende que, salvo en verano, los gradientes de temperatura entre la superficie y el interior de la roca (10 cm de profundidad) dependen de las interacciones entre las variaciones del flujo energético que atraviesa la superficie de los bloques de roca y las diferencias entre la temperatura exterior y la de la superficie. En verano, los



gradientes de temperatura están directamente relacionados con cada variable por separado.

Las respuestas de la temperatura de la superficie y el interior de las rocas en muestras expuestas a radiación solar directa (insolación) en condiciones naturales de desierto revelan una considerable variabilidad entre las litologías de las rocas relacionadas con las diferencias en las propiedades térmicas, especialmente el albedo y la conductividad térmica. En el estudio se utilizó cubos de 5 cm de cuatro tipos de rocas (caliza de Portland, arenisca de Dunhouse, basalto de Antrim y granito de Mourne). Dado que la temperatura ejerce un control tan importante sobre la ruptura de las rocas mediante su control de los procesos físicos y químicos de intemperización, todos los factores importantes que influyen en ella deben incluirse en el diseño de las simulaciones de intemperización y los ensayos de durabilidad. Se reportan valores de conductividad térmica de 0,96 W/mK para el basalto de Antrim (Warke & Smith, 1998)

La conductividad térmica de la roca depende principalmente de su composición mineral, pero también de otros factores como la porosidad, el fluido que rellena los poros, la configuración geométrica de los poros, la fracturación, la estructura, la temperatura y la presión. El efecto de la saturación de agua en la conductividad térmica de las rocas muestra una tendencia general creciente con el aumento de la porosidad. La tendencia observada concuerda bien con los valores teóricos obtenidos a partir de un modelo de mezcla geométrica para un sistema de dos fases (es decir, los poros de la roca llenos de fluido y la parte sólida) (Nagaraju & Roy, 2014).

Las capacidades caloríficas específicas de los minerales que constituyen las rocas se correlacionan inversamente con sus densidades; las capacidades caloríficas volumétricas típicas de las rocas de construcción varían en un rango relativamente estrecho cuando la porosidad es baja. La conductividad de los minerales varía mucho, desde valores extremadamente altos en algunos casos raros (metales nativos, diamante), pero existe una gama mucho más modesta para constituyentes menos exóticos. La conductividad térmica relativamente alta de cuarzo, combinado con su abundancia común, asegura que la conductividad de muchas rocas varíe en proporción a su contenido de cuarzo. Esto explica la alta conductividad de la cuarcita en la Tabla 3. Por el contrario, las relativamente bajas conductividades térmicas de los minerales de feldespato causan una disminución general de la conductividad efectiva de rocas con alto contenido de feldespatos. La presencia de feldespatos en el granito reduce su conductividad si lo comparamos con la cuarcita, mientras que el contenido más alto en el granito en comparación con el basalto produce una conductividad

térmica más alta para el primero (Rempel & Rempel, 2013).

(McGreevy, 1985) Evaluó las temperaturas máximas de superficie que experimentan cuatro tipos de rocas: basalto, arenisca, granito y yeso, cuando están sujetas a condiciones similares de exposición. Las rocas parecían muy adecuadas para este fin, ya que presentan una gran variedad de colores (desde el basalto gris oscuro, pasando por la arenisca de color marrón rojizo y el granito gris claro, hasta la tiza blanca) y poseen características físicas y mineralógicas muy diferentes que dan lugar a notables diferencias en las propiedades térmicas. Los resultados indican que las temperaturas máximas de la superficie de la roca aumentan en el orden: yeso, granito, arenisca, basalto. Las temperaturas superficiales relativamente altas experimentadas por el basalto reflejan la combinación favorable de albedo bajo, capacidad calorífica específica y conductividad térmica, en el extremo opuesto, las bajas temperaturas de la superficie de la caliza son el resultado de su alto albedo, capacidad de calor específico y conductividad térmica. Las temperaturas superficiales intermedias de la arenisca y del granito evidencian interacciones de propiedades térmicas similares a las descritas para el basalto y la tiza respectivamente, aunque obviamente con efectos menos extremos.

Cuando la luz se refleja en una roca, los diversos cristales en las rocas absorben y reflejan diferentes longitudes de onda de la luz. Las longitudes de onda específicas de la luz que absorben y reflejan depende de la composición y la estructura del cristal. Al observar el espectro de reflectancia de una roca que nos podemos hacer una idea de los minerales que componen la roca. La mayoría de las rocas sedimentarias poseen propiedades térmicas anisotrópicas: la conductividad térmica medida en dirección paralela a la estratificación en general es entre un 5% y un 50% más alta que su valor medido en sentido perpendicular a la estratificación. Por otra parte, el valor medido en cada dirección cambia cuando se pasa de condiciones secas a condiciones de saturación de agua. El grado de anisotropía térmica y su cambio con la saturación de fluido se relacionan, en ambos casos, con la permeabilidad. Las muestras con anisotropía térmica más alta generalmente poseen una permeabilidad más baja. Además, el cambio porcentual de la conductividad térmica en sentido paralelo a la estratificación, cuando se pasa de condiciones secas a condiciones de saturación de agua (Chekhonin et al., 2012).

(Quispe, Huillca, & Sotomayor, 2018) Estimaron la radiación solar global en la ciudad de Puno con el modelo Bristow y Campbell considerando las temperaturas máximas y mínimas diarias

desde setiembre del 2015 hasta agosto del 2016, registrados en la estación meteorológica ubicada en la ciudad de Puno. Los promedios mensuales de radiación solar global estimada para los meses de setiembre, octubre, noviembre y diciembre del 2015 y enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto del 2016 son: 6,0278 KWh/m<sup>2</sup>, 6,6278 KWh/m<sup>2</sup>, 6,9782 KWh/m<sup>2</sup>, 6,4526 KWh/m<sup>2</sup>, 6,4988 KWh/m<sup>2</sup>, 5,5375 KWh/m<sup>2</sup>, 6,5619 KWh/m<sup>2</sup>, 5,1725 KWh/m<sup>2</sup>, 5,5437 KWh/m<sup>2</sup>, 4,9407 KWh/m<sup>2</sup>, 4,8981 KWh/m<sup>2</sup> y 5,5644 KWh/m<sup>2</sup> respectivamente; Los valores máximos y mínimos obtenidos corresponden a los meses de noviembre del 2015 con 6,9782 KWh/m<sup>2</sup> y julio del 2016 con 4,8981 KWh/m<sup>2</sup> respectivamente con un promedio anual de 5,8988 KWh/m<sup>2</sup>. Los valores mostraron que la ciudad de Puno es muy rentable para la aplicación de energías renovables.

## CAPITULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

Las técnicas constructivas de las viviendas en el altiplano no son las más adecuadas, pues no son aisladas térmicamente debido al uso de elementos como: techos y puertas de calamina metálica, así como también una mala orientación y diseño de las viviendas, tienen paredes construidas con adobe, alto nivel de infiltración de aire, pisos de tierra, ventanas simples, sin aislamiento adicional y sin sistema de calefacción en la casa.(Basmaci, 2017)

Algunos de los muchos problemas que genera vivir en ambientes extremadamente fríos son: mortandad por enfermedades, sobre todo en la estación invernal en la que se da un incremento de episodios de infecciones respiratorias agudas y neumonías en menores de 5 años y neumonías en mayores de 60 años. restricción de actividades nocturnas, depresión, etc. (Espinoza et al., 2009)

Es conocido que la capacidad de acumulación térmica de los materiales que conforman un elemento arquitectónico es básica para conseguir el adecuado nivel de confort y ahorro energético en la vivienda, el calor acumulado durante el día debe ser liberado durante la noche. Los materiales que tienen una elevada capacidad térmica, es decir, un espesor considerable y un gran calor específico volumétrico, así como una conductividad moderada, generan lo que se conoce como efecto de masa térmica. Entre ellos podemos incluir el adobe (y la tierra en general), ladrillo, rocas naturales, concreto y agua (uno de los más eficientes).

La roca es un elemento constructivo que no es utilizado adecuadamente en el altiplano puneño debido al desconocimiento de sus propiedades térmicas: capacidad calorífica volumétrica, conductividad térmica, difusividad térmica, coeficiente de expansión térmica y emisividad, Al igual que muchas propiedades de las rocas, estas propiedades dependen de manera compleja de la composición y la distribución de los minerales en la matriz de la roca y de los fluidos en su espacio poroso. La distribución adecuada de elementos de roca en una vivienda serviría

como un elemento que almacene calor durante el día y libere el mismo durante la noche, mejorando el confort de los habitantes de la misma.

## 2.2 Enunciados del problema

### 2.2.1. Problema general

¿Es posible usar basalto para almacenar calor durante el día y liberarla durante la noche en una vivienda del altiplano puneño?

### 2.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las propiedades térmicas de los basaltos?
- ¿Cuál es la temperatura de la ciudad de Puno durante el año?
- ¿Cuáles son las dimensiones adecuadas de un elemento arquitectónico construido con basalto para almacenar calor en una vivienda?

## 2.3 Justificación

La región de Puno se encuentra ubicada en la parte Sureste del Perú, en el área andina el clima es frío y seco, con temperaturas entre 3 a 15 °C (otoño e invierno) a húmedo templado (primavera – verano) en las orillas del lago (INEI, 2017a).

La relación de las variables meteorológicas, especialmente la temperatura, con la salud es conocida desde hace tiempo, siendo frecuente relacionar ciertas patologías con las distintas estaciones del año, sobre todo la estación invernal que se asocia a un incremento de infecciones respiratorias y neumonía, de hecho los cambios meteorológicos periódicos marcan el comportamiento de muchas enfermedades, la región Puno debido a sus características climatológicas, como bajas temperaturas - “Friaje”, así como las precipitaciones pluviales (enero-marzo y octubre-diciembre) y altitudinales, podrían determinar el comportamiento estacional de las afecciones respiratorias, siendo la población pobre, pobre extrema y los límites de vida, los más vulnerables de padecer estas injurias (Ríos, 2014)(INEI, 2017b).

Las técnicas constructivas de las viviendas han devenido a menos, siendo estas menos aisladas térmicamente debido al uso de elementos como: techos y puertas de calamina metálica, así como también una mala orientación y diseño de las viviendas (Huaylla, 2010). Estas no responden a las características climatológicas de la región.

El uso de materiales con gran capacidad de acumulación térmica es básico para conseguir el adecuado nivel de confort y disminuir la incidencia de enfermedades infecciosas respiratorias, entre estos materiales tenemos a las rocas que pueden generar el efecto de masa térmica en la vivienda.

En la región de Puno existentes distintas formaciones que pueden proveernos de rocas: granito y basalto para utilizarlos en la construcción de viviendas en la zona altiplánica.

## 2.4 Objetivos

### 2.4.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades térmicas del basalto para su uso en el almacenamiento de calor durante el día y la liberación durante la noche en las viviendas del altiplano puneño.

### 2.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades térmicas del basalto.
- Evaluar las características climáticas del altiplano puneño (ciudad de Puno).
- Determinar el espesor que debe tener una placa de basalto para almacenar calor en las viviendas del altiplano puneño.

## 2.5 Hipótesis

### 2.5.1. Hipótesis general

Las propiedades térmicas del basalto permiten almacenar calor en las viviendas del altiplano puneño.

### 2.5.2. Hipótesis específicas

- La conductividad térmica del basalto se encuentra en el rango de 0,5 a 4,0 W/m K y la difusividad térmica se encuentra en el rango de 0,1 a 3,0 mm<sup>2</sup>/s.
- La temperatura de la región de Puno fluctúa en el rango de 0 a 15 °C.
- El dimensionamiento adecuado de un elemento arquitectónico construido con basalto permite almacenar calor en las viviendas del altiplano puneño.

## CAPITULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de estudio

La investigación se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de Minas, ubicado en el campus de la Universidad Nacional del Altiplano, al noroeste de la ciudad de Puno.

La región de Puno está ubicada al sur este del Perú, entre los  $13^{\circ}00'00''$  y  $17^{\circ}17'30''$  de latitud sur y los  $71^{\circ}06'57''$  y  $68^{\circ}48'46''$  de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

La ciudad de Puno, capital de distrito, provincia y de la región de Puno, está ubicada a orillas del Lago Titicaca a 3827 m.s.n.m, está situada aproximadamente a los  $15^{\circ} 50' 26''$  de latitud sur,  $70^{\circ} 01' 28''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich y debido a esta ubicación el clima de Puno es frío, moderadamente lluvioso y con amplitud térmica moderada. La media anual de temperatura máxima y mínima (período 1960-1996) es  $14,4^{\circ}\text{C}$  y  $2,7^{\circ}\text{C}$ , respectivamente y la precipitación media acumulada anual para el período 1964-1980 es 703,1 mm, ver figura 2.

La Universidad Nacional del Altiplano de Puno es una universidad pública ubicada en la ciudad de Puno. Es una de las primeras universidades públicas fundadas en 1856 a iniciativa de la población del Departamento de Puno.

El funcionamiento de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano fue autorizado en mayo de 1973. En su seno se encuentra el laboratorio de geotecnia y geomecánica minera.



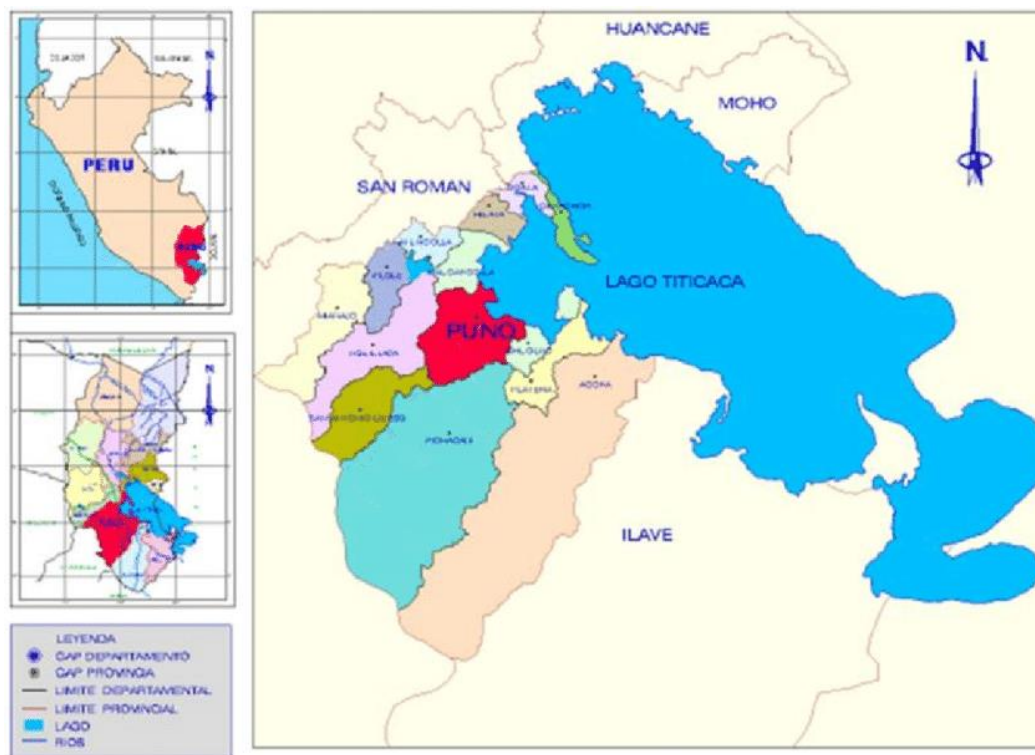


Figura 2. Ubicación de la ciudad de Puno.



Figura 3. Ubicación de la Facultad de Ingeniería de Minas UNA Puno  
Fuente: Google Maps (2019)



### 3.2 Población

En la región de Puno, el basalto, se encuentra como parte del Grupo Tacaza (Formación Pichu) y el Grupo Sillapaca (Umayo). El Grupo Tacaza ocupa una gran extensión en la región de Puno, descansando casi siempre en discordancia sobre las rocas del Mesozoico o del Grupo Puno, en el área de estudio del grupo Tacaza descansa en contacto paralelo sobre el Grupo Puno, que este a su vez está superpuesto por episodios volcánicos o volcanoclásticos de ignimbritas pertenecientes al Grupo Palca y en ciertos lugares presencia de rocas pertenecientes al Grupo Sillapaca.

Regionalmente es un grupo diverso con rocas volcánicas andesíticas teniendo en gran parte hasta un 50 % de sedimentos terrestres, las lavas son de olivino y/o augita porfirítica. Este grupo se compone de una secuencia de lavas de composición basáltica a basaltos andesíticas, muestran laderas escarpadas con tonos medios y estratificación delgada. El grupo Tacaza está datado radiométricamente de 30 a 22 Ma. (Oligoceno), en el reconocimiento geológico del grupo Tacaza en la zona. Se concluye que el grupo Tacaza presenta un dominio volcánico máficos del Oligoceno y un dominio volcánico félsico del Mioceno temprano, lo que representa a un Tacaza inferior (30 – 22 Ma) y un Tacaza superior (22 – 17 Ma), en sus estudios en la zona de Santa lucia, menciona intrusivos datados de 32 a 24 Ma, lo cual consideran como sin genéticos al Grupo Tacaza. Por esta razón el Grupo Tacaza es considerado una principal provincia de plutonismo del sur del Perú (Clark et al., 1990)

### 3.3 Muestra

#### 3.3.1. Propiedades del material

La muestra de basalto utilizada se obtuvo en la zona de Pirapi, es un basalto de color plomo negruzco, del oligoceno (30 - 22 Ma), con una estructura relativamente homogénea en la que, en su mayor parte, no existen estructuras evidentes de lecho y microlaminación. En la Tabla 4 se muestra un resumen de las propiedades del material.

Las propiedades de mineralogía y porosidad son importantes debido a su papel en la determinación de las propiedades térmicas de la roca y su capacidad para absorber la humedad, transferirla a capas de sustrato más profundas y restringir su pérdida por evaporación.

Tabla 4

*Resumen de las propiedades estructurales y mineralógicas del basalto de Puno.*

Propiedad	Valor	Comentario/Fuente
Edad	Oligoceno (30 - 22 Ma),	Pertenece al Grupo Tacaza
Peso específico aparente	22,98 KN/m <sup>3</sup>	Laboratorio de Geotecnia y Mecánica de Rocas FIM
Porosidad	15,57%	Laboratorio de Geotecnia y Mecánica de Rocas FIM

### 3.4 Método de investigación

El método de investigación es cuantitativo, pero complementada con análisis interpretativos generales.

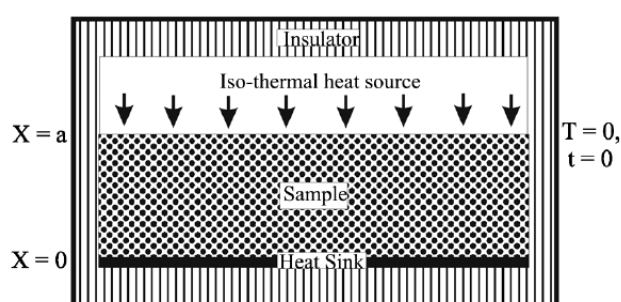
### 3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

#### 3.5.1. Objetivo específico 1

**Evaluar las propiedades térmicas del basalto: Estimación de la difusividad y la conductividad térmicas**

##### 3.5.1.1. Teoría

La transferencia de calor unidimensional se puede comprender con la Figura 4.



*Figura 4.* Diagrama que representa el concepto de transferencia de calor 1D en una losa de roca.

Fuente: (Ramakrishnan et al., 2012)

Para los materiales que conducen poco calor, como rocas y suelos, se utilizan ampliamente ecuaciones unidimensionales (1D) de transferencia de calor transitorio (ecuaciones 7, 8 y 9) para estimar la conductividad térmica y la difusividad. Las

ecuaciones transitorias se basan en los criterios de la transferencia de calor en una losa que está inicialmente a temperatura inicial, aislada en la superficie  $x = 0$ , y tiene un flujo de calor constante introducido en la superficie  $x = a$  en el momento  $t = 0$ . La temperatura a una distancia  $x$  dentro de la losa en el momento  $t_s$  ( $t_s > t_0$ ) se da como:

$$T(x, t) = \frac{F \alpha t}{aK} + \frac{F a}{K} \left( \frac{3x^2 - a^2}{6a^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-an^2\pi^2 t/a^2} \cos \frac{n\pi x}{a} \right) \quad (7)$$

donde  $\alpha$  es difusividad térmica ( $m^2/s$ ),  $K$  es conductividad térmica ( $W/m^\circ C$ ), y  $a$  es el espesor de la losa/específica (m). Si la temperatura se mide en la base de la losa ( $x = 0$ ), la expresión anterior se modifica de la siguiente manera

$$T(a, t) = \frac{F \alpha t}{aK} - \frac{F a}{6K} + C \quad (8)$$

donde  $C$  es el término para el flujo transitorio. Para una  $t$  mayor, el término  $C$  es insignificante, y la temperatura  $T$  frente al tiempo  $t$  se vuelve lineal con una intercepción  $t_i$  en el eje  $T = 0$ . La intercepción puede expresarse como

$$t_i = \frac{a^2}{6\alpha} \quad (9)$$

A partir de los datos experimentales de las mediciones de temperatura y tiempo, se puede estimar la difusividad térmica utilizando la relación anterior  $\alpha = K/\rho c$ , donde  $\rho$  es la densidad y  $c$  es la capacidad calorífica específica.

El método de estado estacionario se basa en el supuesto de un flujo de calor 1D dentro de la muestra. La medición precisa del flujo de calor requiere mucho cuidado para minimizar las fuentes de error. Antes de realizar las mediciones de temperatura, se permite que toda la instalación (con los termopares colocados en las posiciones definidas) entre en un estado de equilibrio térmico. Este método consiste en medir la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de una muestra cuando ambas están en estado estacionario (ecuación 4). El coeficiente de conductividad térmica  $K$  es una medida de la velocidad a la que el calor  $Q$  fluye a través de un material. Se expresa como

$$K = \frac{Q\Delta x}{A\Delta T} \quad (10)$$

donde  $Q$  es el flujo de calor ( $\text{W/m}^2$ ),  $K$  es la conductividad térmica ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ),  $\Delta x$  es el espesor de la muestra (m),  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura en estado estacionario ( $^\circ\text{C}$ ) y  $A$  es el área total de la sección transversal de la superficie conductora ( $\text{m}^2$ ) (Ramakrishnan et al., 2012)

### 3.5.1.2. Diseño experimental

La estructura con el que se realizó la determinación de la conductividad térmica del basalto comprende tres placas de madera de dimensiones  $9 \times 9 \times 1$  pulgadas que pueden apilarse juntas para formar una caja hermética compacta con una tuerca y un tornillo de fijación (Figuras 5 y 6).

La placa de madera más alta tiene una fuente de calefacción empotrada de  $3 \times 3$  pulgadas, que puede proporcionar un flujo de calor constante. Un sensor conectado a la fuente de calor permite medir la temperatura en la cara de calentamiento de la muestra. Se utiliza una fuente de alimentación de corriente continua para proporcionar tensión y corriente constantes al calefactor. Cambiando el voltaje (0 - 220 V) y la corriente (0 - 2 A), el flujo de calor suministrado a la muestra puede elevarse hasta una temperatura de  $120^\circ\text{C}$ . La placa central tiene una abertura central con empaquetadura de lana térmica para acomodar losas de muestra de dimensiones  $3 \times 3 \times 1$  pulgadas.

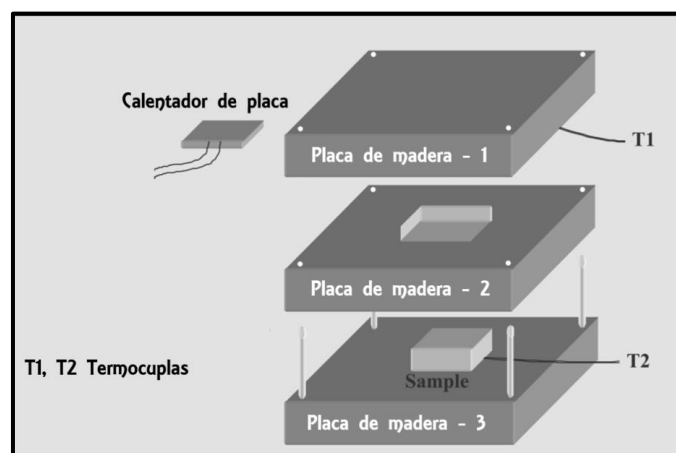
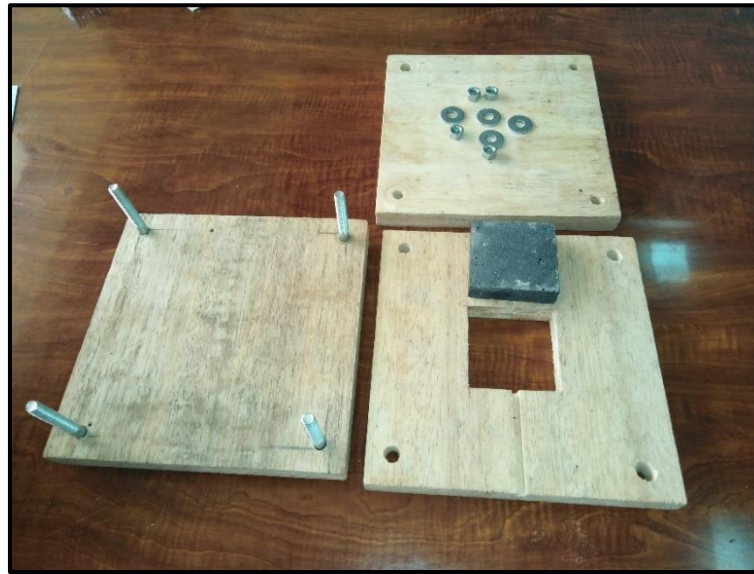


Figura 5. Diagrama esquemático que muestra parte de la instalación experimental compuesta por fuente de calor, porta muestras y termopares.  
Fuente: (Ramakrishnan et al., 2012)



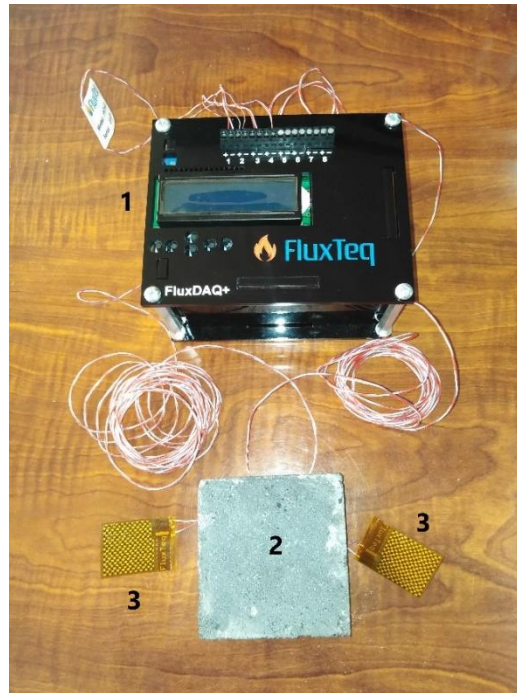
*Figura 6.* Instalación experimental con muestra.

La placa inferior tiene una termocupla (sensor de temperatura y flujo de calor) adherida para medir la temperatura en la otra cara de la muestra. Ambas caras de la muestra están moderadamente pulidas y con una capa muy fina de grasa térmica para asegurar un contacto perfecto de la muestra con la fuente de calor y minimizar la resistencia al contacto térmico.

Se colocó una lámina delgada de papel de aluminio entre la muestra y la placa inferior para producir una temperatura basal uniforme. La lámina de aluminio, que es un conductor térmico mucho mejor que la muestra de roca/suelo, ayuda a distribuir instantáneamente la temperatura basal alrededor del termopar. Las temperaturas de la parte superior e inferior de la muestra se midieron simultáneamente con termocuplas tipo T. Las especificaciones técnicas de los sensores los tenemos en el anexo 3, las termocuplas fueron calibrados por la compañía FluxTeq, en el anexo 4 se puede observar un certificado de calibración. Estos termopares se conectaron a un registrador de datos FluxDAQ+ (Anexo 2), y la temperatura se registraba cada 0,676 s de intervalo. Figura 7.

### **3.5.1.3. Preparación de la muestra**

Se seleccionaron muestras libres de fisuras/fracturas para evitar las complejidades derivadas de la convección y la transferencia de calor radiativo. Para ello, los



*Figura 7.* (1) Equipo de adquisición y registro de datos FluxDAQ+, (2) Muestra de basalto y (3) Sensores PHFS-01.

bloques a cortar se sumergieron en agua y se dejaron secar a temperatura ambiente. Estas muestras fueron inspeccionadas visualmente para detectar la presencia de fracturas, que generalmente retienen la humedad durante más tiempo. A continuación, las probetas libres de fracturas se cortaron en placas según la dimensión mencionada anteriormente, Figura 8.

Las losas cortadas se sometieron de nuevo al procedimiento anterior para comprobar si presentaban posibles fracturas durante el corte. Las muestras libres de defectos se pulieron ligeramente y se recubrieron con una fina capa de grasa térmica.

#### **3.5.1.4. Procedimiento experimental**

El experimento transitorio se llevó a cabo exponiendo rápidamente la superficie superior de la muestra a la fuente de calor y midiendo la temperatura en la base del bloque de muestra durante aproximadamente ocho minutos después de la introducción de la fuente de calor. La duración de la medición de ocho minutos fue suficiente para obtener un comportamiento lineal en una losa de unos 2,5 cm de espesor. Las temperaturas medidas se redujeron restando la temperatura





*Figura 8.* Muestra de basalto

### 3.5.1.5. Procedimiento experimental

ambiente/equilibrada inicial, con el fin de realizar las mediciones relativas a la temperatura inicial cero. Este gráfico de reducción de la temperatura al tiempo fue trazado; basado en el segmento lineal, se identificó el tiempo de intercepción  $t_i$ . La difusividad térmica se determinó a partir del tiempo de intercepción mediante la ecuación 3.

Para la medición de estado estacionario, se aplicó una tensión y una corriente constantes al calentador de placas. El flujo de calor se mantuvo hasta que las caras superior e inferior de la muestra alcanzaron el estado estable. Debido a que es posible medir el gradiente térmico  $\Delta T$  a través de las caras, el espesor de la muestra  $\Delta x$ , y el área  $A$ , la conductividad térmica puede ser estimada directamente usando la ecuación 4.

### 3.5.1.6. Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados de conductividad y difusividad térmica se usó la Prueba t Student de un promedio (Jhonson, 2012) cuyo estadígrafo es:

$$T_C = \frac{\bar{X} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (11)$$

Donde:

$\bar{X}$ : promedio muestral

$\mu$ : promedio poblacional

$S$ : desviación estándar muestral

$n$ : tamaño muestral

Para la demostración de la hipótesis, se determinó mediante la prueba t Student de un promedio y se calculó mediante el software libre PAST 4.0 (Hammer, 2019)

### 3.5.2. Objetivo específico 2

**Evaluar las características climáticas del altiplano puneño (ciudad de Puno).**

#### 3.5.2.1. Estación Puno

Senamhi cuenta en la ciudad de Puno con una estación meteorológica convencional de tipo automática, cuya ubicación es: Latitud Sur 15°49'34.5'', Longitud Oeste 70° 00'43.5'' y altitud 3812 msnm, con código 472DD33A, la estación se encuentra en un área aledaña al campus de la Universidad Nacional del Altiplano (Figura 9).

La estación meteorológica reporta cada hora información meteorológica, entre las que tenemos: temperatura (°C), precipitación (mm/h), humedad (%), dirección del viento y velocidad del viento (m/s).



*Figura 9.* Ubicación de la estación meteorológica de la ciudad de Puno.  
Fuente: Google Maps (2019)



### **3.5.2.2. Obtención de información meteorológica**

Senamhi proporciona en forma gratuita información meteorológica que obtiene en sus estaciones, se puede obtener archivos con información horaria de un mes. Para la presente investigación se obtuvo información de enero 2019 a enero 2020.

### **3.5.2.3. Evaluación de información de temperatura**

Para realizar el análisis de los datos obtenidos, se estableció la siguiente metodología:

1. Selección de la variable temperatura a analizar, teniendo en cuenta que algunos datos están incompletos, lo que debe considerarse en el análisis.
2. Tabulación y elaboración de gráficas de cada mes.
3. Determinar el comportamiento de la temperatura durante todo el período de análisis.
4. Tabulación y elaboración de gráficas de días representativos.
5. Determinar el comportamiento de la temperatura durante los días representativos seleccionados.

### **3.5.2.4. Análisis estadístico**

Para el análisis de los resultados de temperatura se usó la Prueba t Student de un promedio (Jhonson, 2012).

## **3.5.3. Objetivo específico 3**

**Determinar el espesor que debe tener la placa de basalto para almacenar calor en las viviendas del altiplano puneño.**

### **3.5.3.1. Montaje experimental y recogida de datos**

El montaje de la unidad de prueba se ubicó en la azotea del edificio nuevo de la Facultad de Ingeniería de Minas, consiste en una estructura de acero galvanizado en el que se colocaron láminas de contrachapado y poliestireno con una tapa de madera que cerraba el interior donde se ubicó el registrador de datos.

El basalto fue cortado en bloques (150 mm de largo  $\times$  150 mm de ancho y espesor variable: 25 mm y 100 mm). Los cuatro lados de cada bloque se sellaron con una capa de barniz y se colocaron en una 'chaqueta' de poliestireno expandido de 30 mm de espesor. Esto se hizo para aislar los bloques y limitar el intercambio de calor y humedad con el entorno externo sólo a la cara exterior expuesta de cada bloque. Después de la preparación, cada bloque se colocó en ranuras precortadas en los lados de poliestireno de la unidad de prueba.

La estructura de la prueba se orientó en forma paralela al borde de la azotea.

### **3.5.3.2. Vigilancia de las condiciones meteorológicas**

Una estación meteorológica se encontraba a varios metros de la unidad de prueba y los datos meteorológicos se registraban a intervalos de un minuto.

### **3.5.3.3. Recolección de datos de temperatura**

Las mediciones de la temperatura de la superficie de la roca pueden ser problemáticas, ya que generalmente el proceso implica el uso de sensores en contacto directo con la roca. Como tal, su propia presencia puede alterar la temperatura de la superficie de la roca a través de los efectos de blindaje.

Los datos se registraron a intervalos de 30 segundos.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Evaluar las propiedades térmicas del basalto.

##### Estimación de la difusividad térmica

El experimento transitorio se llevó a cabo exponiendo rápidamente la superficie superior de la muestra a la fuente de calor y midiendo la temperatura en la base del bloque de muestra durante aproximadamente ocho minutos después de la introducción de la fuente de calor. La duración de la medición de ocho minutos fue suficiente para obtener un comportamiento lineal en una losa de unos 2,3 cm de espesor. Las temperaturas medidas se redujeron restando la temperatura ambiente/equilibrada inicial, con el fin de realizar las mediciones relativas a la temperatura inicial cero. Este gráfico de reducción de la temperatura al tiempo fue trazado (Figura 10); basado en el segmento lineal, se identificó el tiempo de intercepción  $t_i$  igual a 155 segundos.

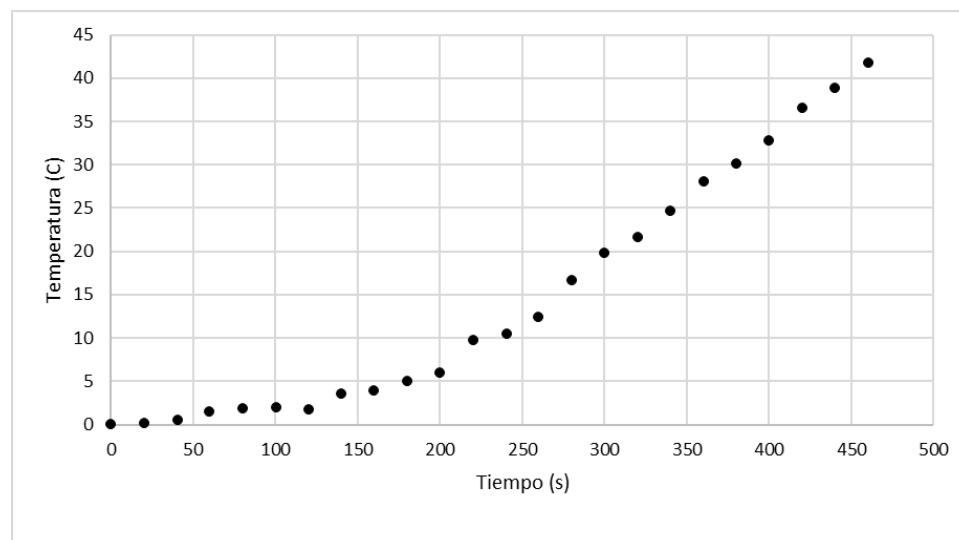


Figura 10. Ploteo de la conducción de calor mediante la técnica estado transitorio para el basalto.

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) se determinó a partir del tiempo de intercepción ( $t_i$ ) y el espesor de

la muestra (a) utilizando la ecuación 9, se obtiene un valor de  $\alpha = 0,57 \text{ mm}^2/\text{s}$  en la primera medición. Se realizaron tres mediciones, obteniéndose un valor promedio de  $\alpha = 0,67 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

De los resultados obtenidos, mediante la prueba de t de Student, es significativo ( $p = 0,006 < 0,05$ ), implica que el promedio de difusividad térmica de nuestra investigación, se encuentra en el intervalo de 0,1 a 3,0  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

(Nahhas et al., 2019) Desarrolla una investigación experimental de rocas de basalto como material de almacenamiento para plantas de energía solar concentrada de alta temperatura reportando un valor de  $0,79 \text{ mm}^2/\text{s}$ , que se halla muy próximo al valor de  $0,67 \text{ mm}^2/\text{s}$  obtenido en nuestra investigación.

(Hartlieb et al., 2016) presenta los resultados de estudios experimentales sobre las propiedades termofísicas del granito, la arenisca y el basalto en el rango de temperaturas de 25-1000 C. Los resultados de estas mediciones y análisis están vinculados a pruebas de irradiación de microondas a 17,5 kW de potencia. Para el estudio de la difusividad térmica presenta un gráfico (Figura 11) con los resultados de la difusividad térmica del basalto en el rango de temperatura de 25-1000 C. Si interpolamos el valor hallado en esta investigación, se aproxima bastante al que se muestra en la investigación de Hartlieb.

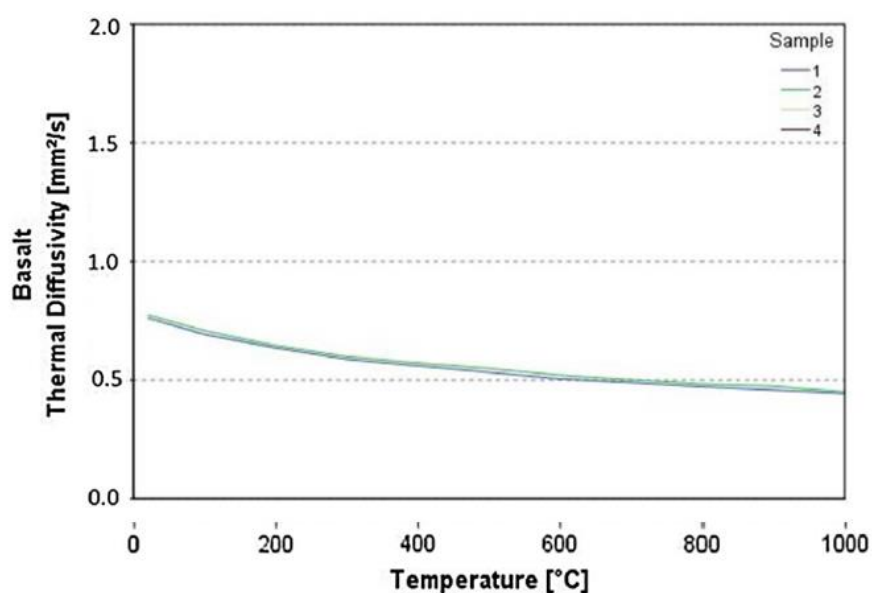


Figura 11 Difusividad térmica del basalto en el rango de temperatura de 25-1000 C  
Fuente: Hartlieb, 2016

La concordancia entre nuestros resultados y los de la literatura es bastante satisfactoria

### Estimación de la conductividad térmica

Para la medición de estado estacionario, se aplicó una tensión y una corriente constantes al calentador de placas. El flujo de calor se mantuvo hasta que las caras superior e inferior de la muestra alcanzaron el estado estable.

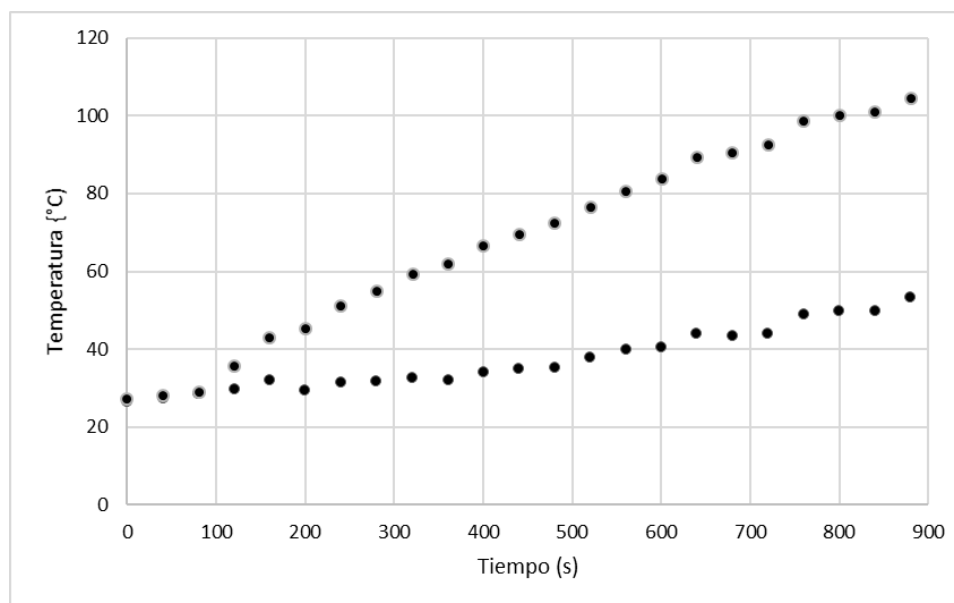


Figura 12. Ploteo de la conducción de calor mediante la técnica estado estacionario para el basalto.

Debido a que es posible medir el gradiente térmico  $\Delta T$  a través de las caras, el espesor de la muestra  $\Delta x$ , y el flujo térmico ( $Q/A$ ), la conductividad térmica puede ser estimada directamente usando la ecuación 10, al reemplazar los valores conocidos, obtenemos  $K = 1,81 \text{ W/mK}$  en el primer ensayo. Se realizaron tres ensayos, obteniéndose un valor promedio de  $K = 1,58 \text{ W/mK}$ .

De los resultados obtenidos, mediante la prueba de t de Student, es significativo ( $p = 0,033 < 0,05$ ), implica que el promedio de conductividad térmica de nuestra investigación, se encuentra en el intervalo de 0,5 a 4,0 W/m K.

El valor de la conductividad térmica de 1,58 W/m K, se halla dentro del rango reportado por (Al-Zyoud, 2012) en su tesis doctoral, donde estudió un sistema de acuíferos basálticos poco profundos en el noreste de Jordania por su potencial como recurso geotérmico para la refrigeración de viviendas. Se examinaron las propiedades termofísicas, la composición mineralógica y geoquímica del basalto del Harrat jordano, entre ellas la conductividad térmica, obteniendo valores que se encuentran dentro del rango de 1,44 a 1,96  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

(Robertson & Peck, 1974) realizaron mediciones de conductividad térmica a 35° C bajo 30 bares de presión uniaxial en 61 muestras de basalto con olivina con una solidez que oscilaba entre el 2 y el 98%. Se hicieron dos series de pruebas, una con aire y la otra con agua en los poros. La conductividad varía con la solidez, la abundancia de fenocristales de olivino y la naturaleza del fluido de los poros. Las conductividades observadas oscilan entre 0,2 y 4,3 X 10<sup>-3</sup> cal/cm s °C para las muestras con aire en los poros. Nuestro valor de = 0,6 x 10<sup>-3</sup> cal/s cm °C, se encuentra dentro de los valores indicados.

La concordancia entre nuestros resultados y los de la literatura es satisfactoria

#### **4.2 Evaluar las características climáticas del altiplano puneño (ciudad de Puno).**

El período inicial a analizar fue el año 2019, cuando se preparaba los datos para ser evaluados, notamos que la información correspondiente al mes de enero de 2019 estaba incompleta, solo se contaba con 11 datos de un total de 744 (Anexo 6), posiblemente por falla de los equipos o mantenimiento de la estación. Por lo que el período de evaluación corresponde de febrero 2019 a enero 2020.

La Tabla 5 y la figura 12 muestran las temperaturas máximas, mínimas y promedio y la diferencia entre la temperatura máxima y mínima en forma mensual durante los últimos doce meses, donde la temperatura mínima (-2 °C) se registró a las 6 y 7 de la mañana del 26 de julio y la temperatura máxima (18,9 °C) se registró el día 3 del mismo mes a las 4 de la tarde.

Los meses que registran menor temperatura son los meses comprendidos entre mayo y octubre, presentando los meses entre junio y agosto, temperaturas menores a 0 °C. Los meses que registran mayor temperatura son los meses de julio y octubre.

Julio es el mes que registra mayor diferencia de temperatura mensual (20,9 °C), seguido por los meses de agosto y mayo.

De los resultados obtenidos, mediante la prueba de t de Student, es significativo ( $p = 0,00004 < 0,05$ ), implica que el promedio de las temperaturas mensuales, 9,89 °C se encuentra en el intervalo de 0 a 15 °C.

Durante el mes de mayo, se registra una diferencia entre la temperatura máxima y mínima de 18,4 °C, por ello se seleccionó el período del 3 al 4 de mayo para realizar un análisis horario.

Tabla 5

Temperaturas mensuales en la ciudad de Puno, período febrero 2019- enero 2020

Mes	Temperatura (°C)			
	Máxima	Mínima	Promedio	Variación
FEB	17.9	5.3	10.8	12.6
MAR	17.4	4.2	10.9	13.2
ABR	16.8	3.0	10.2	13.8
MAY	19.6	1.2	9.2	18.4
JUN	16.9	-0.6	8.0	17.5
JUL	18.9	-2.0	7.6	20.9
AGO	17.3	-1.5	8.4	18.8
SET	18.5	1.5	10.2	17.0
OCT	18.7	1.4	10.4	17.3
NOV	18.0	3.1	10.7	14.9
DIC	18.0	5.3	11.4	12.7
ENE	18.6	4.8	10.9	13.8

Fuente: SENAMHI estación meteorológica 472DD33A

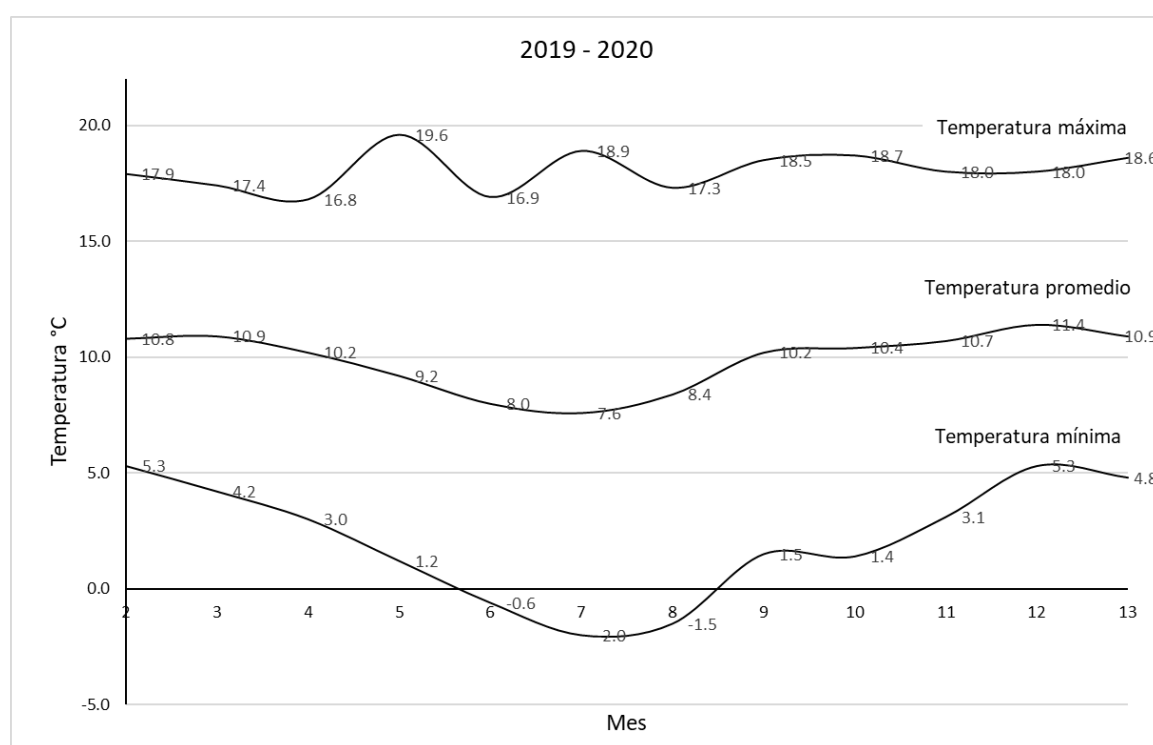


Figura 13. Temperaturas mensuales en la ciudad de Puno, período febrero 2019- enero 2020  
Fuente: SENAMHI estación meteorológica 472DD33A

En la tabla 6 y la figura 13 podemos observar que las temperaturas mínimas de dicho período se registraron entre las 7 y 8 de la mañana y las temperaturas máximas se registraron entre las 3 y 4 de la tarde.

Tabla 6

*Temperaturas mensuales en la ciudad de Puno, período 2 al 4 de mayo 2029*

Mes / Día / Año	Hora	Temperatura (°C)	Mes / Día / Año	Hora	Temperatura (°C)
5/2/2019	0:00	9,0	5/3/2019	12:00	13,2
5/2/2019	1:00	8,8	5/3/2019	13:00	15,3
5/2/2019	2:00	8,5	5/3/2019	14:00	16,7
5/2/2019	3:00	7,9	5/3/2019	15:00	17,1
5/2/2019	4:00	7,6	5/3/2019	16:00	16,2
5/2/2019	5:00	7,5	5/3/2019	17:00	15,7
5/2/2019	6:00	7,2	5/3/2019	18:00	14,7
5/2/2019	7:00	6,5	5/3/2019	19:00	11,8
5/2/2019	8:00	6,3	5/3/2019	20:00	10,5
5/2/2019	9:00	9,7	5/3/2019	21:00	9,6
5/2/2019	10:00	12,2	5/3/2019	22:00	8,6
5/2/2019	11:00	13,9	5/3/2019	23:00	7,7
5/2/2019	12:00	15,2	5/4/2019	0:00	7,4
5/2/2019	13:00	16,7	5/4/2019	1:00	7,1
5/2/2019	14:00	18,2	5/4/2019	2:00	6,1
5/2/2019	15:00	19,1	5/4/2019	3:00	5,6
5/2/2019	16:00	19,6	5/4/2019	4:00	5,2
5/2/2019	17:00	19,4	5/4/2019	5:00	4,7
5/2/2019	18:00	18,2	5/4/2019	6:00	4,2
5/2/2019	19:00	15,0	5/4/2019	7:00	3,9
5/2/2019	20:00	12,5	5/4/2019	8:00	5,3
5/2/2019	21:00	10,5	5/4/2019	9:00	8,6
5/2/2019	22:00	9,0	5/4/2019	10:00	10,2
5/2/2019	23:00	8,2	5/4/2019	11:00	11,5
5/3/2019	0:00	6,7	5/4/2019	12:00	12,4
5/3/2019	1:00	5,1	5/4/2019	13:00	13,7
5/3/2019	2:00	4,2	5/4/2019	14:00	14,3
5/3/2019	3:00	3,3	5/4/2019	15:00	15,4
5/3/2019	4:00	2,6	5/4/2019	16:00	15,5
5/3/2019	5:00	2,2	5/4/2019	17:00	15,0
5/3/2019	6:00	1,8	5/4/2019	18:00	14,0
5/3/2019	7:00	1,5	5/4/2019	19:00	11,8
5/3/2019	8:00	3,2	5/4/2019	20:00	11,8
5/3/2019	9:00	6,5	5/4/2019	21:00	10,4
5/3/2019	10:00	8,9	5/4/2019	22:00	10,2
5/3/2019	11:00	11,5	5/4/2019	23:00	10,0

Fuente: SENAMHI estación meteorológica 472DD33A



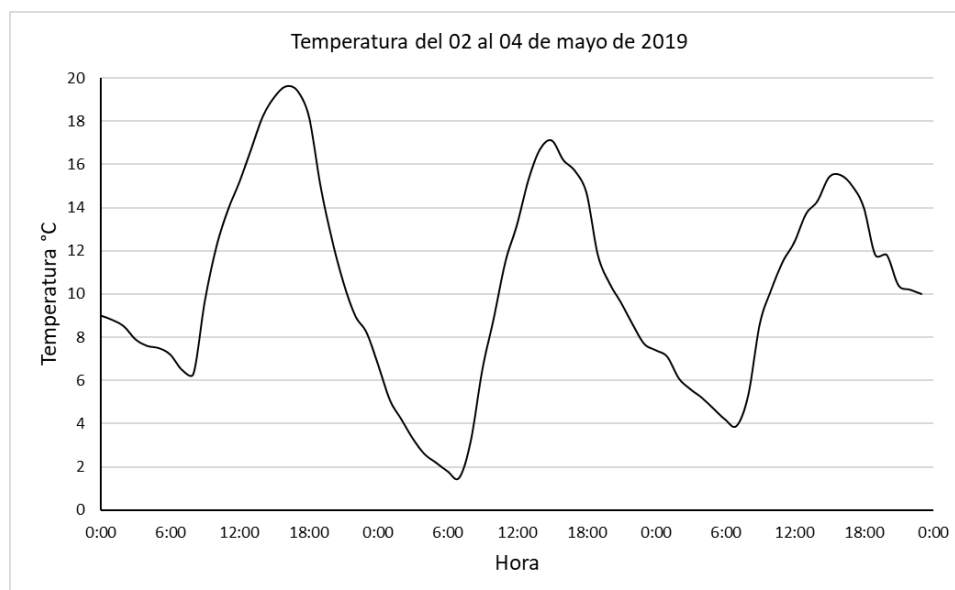


Figura 14. Temperaturas horarias en la ciudad de Puno, del 2 al 4 de mayo de 2019  
Fuente: SENAMHI estación meteorológica 472DD33A

El comportamiento del mes de julio muestra la mayor diferencia de temperatura, 18,9 °C, por lo que se analizó el período del 3 al 4 de julio, donde se registra la mayor temperatura del año (18,9 °C) con una temperatura mínima de 1 °C.

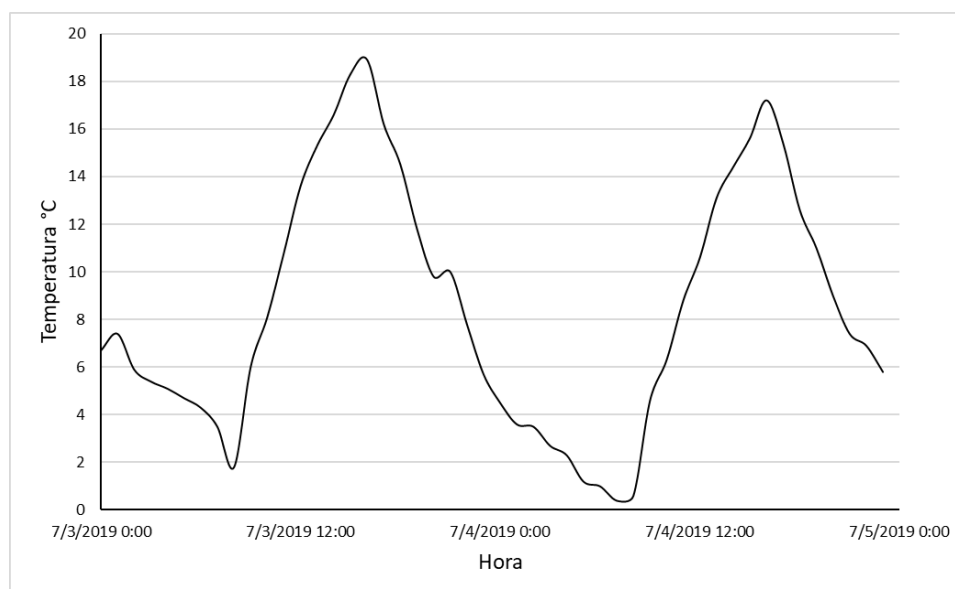


Figura 15. Temperaturas horarias en la ciudad de Puno, del 3 al 4 de julio de 2019  
Fuente: SENAMHI estación meteorológica 472DD33A

### 4.3 Determinar el espesor que debe tener la placa de basalto para almacenar calor en las viviendas del altiplano puneño.

Las necesidades estructurales de una vivienda se satisfacen más fácilmente con roca, por su alta resistencia a la compresión, que, con adobe, lo que permite que las construcciones de los muros sean más delgadas; en la presente investigación sobre el uso del basalto como acumulador térmico, presentamos los resultados de la evaluación del comportamiento de dos muestras de basalto con dimensiones de 15 cm x 15 cm de área, con variación en su espesor de 2,5 y 10 cm. La ganancia de calor solar por el bloque de 2,5 cm es mucho más alta que el bloque de 10 cm. El bloque de 2,5 cm entrega calor al espacio interior mucho más rápidamente, y en mayor cantidad que el bloque de 10 cm, los flujos de calor pico se producen entre las 2:00 y las 5:00 p.m. en el bloque de 2,5 cm, con entrega de calor por la tarde en todos los casos. Por el contrario, el bloque de 10 cm entrega de calor en las primeras horas de la noche, las figuras 15 y 16 muestran el comportamiento del almacenamiento térmico y de liberación de los bloques de 2,5 y 10 cm (1 y 4 pulgadas).

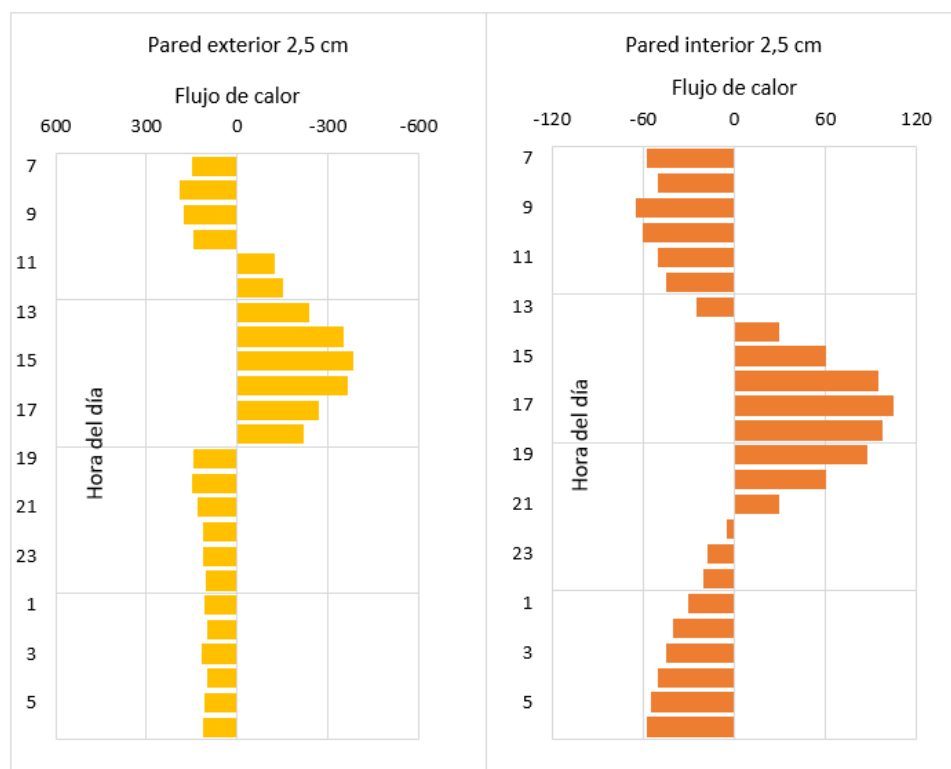


Figura 16. Flujos de calor a través de la superficie exterior e interior del bloque de 2,5 cm.

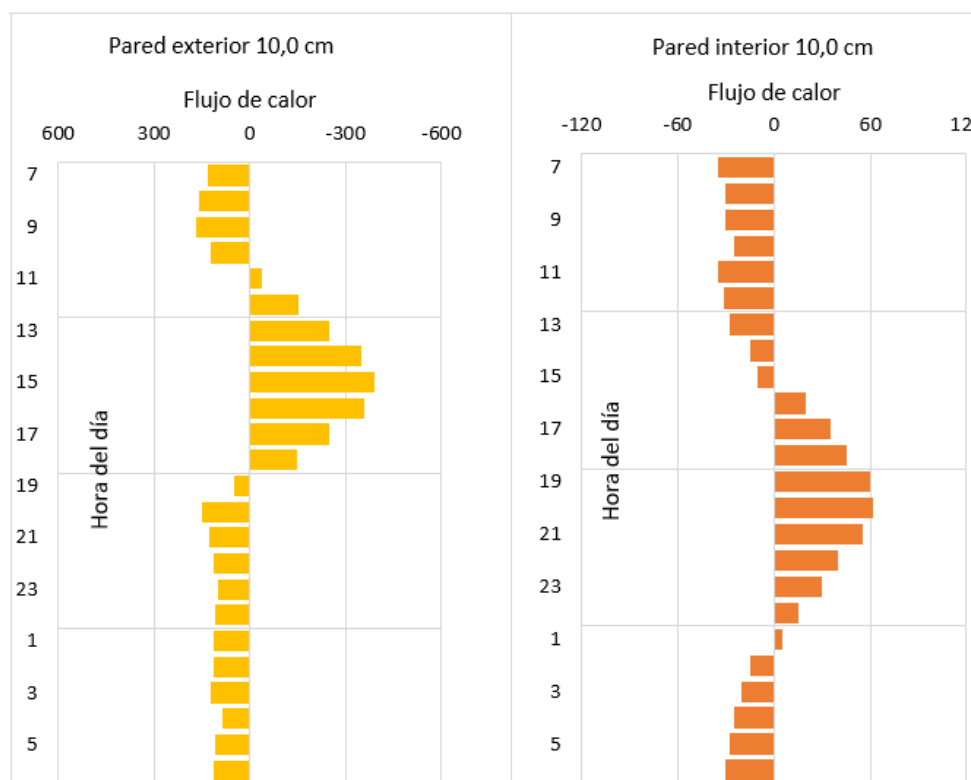


Figura 17. Flujos de calor a través de la superficie exterior e interior del bloque de 10 cm.

(Rempel & Rempel, 2013) Indica que las paredes de granito también entregan calor al espacio ocupado mucho más rápidamente, y en mucha mayor cantidad, que las paredes de adobe: los flujos de calor pico oscilan entre 40 W/m<sup>2</sup> y 110 W/m<sup>2</sup> y se producen entre las 2:00 y las 5:00 p.m., con entrega de calor por la tarde en todos los casos. Por el contrario, las paredes de granito pierden mucho más calor del interior de la noche a la mañana, las ganancias de calor solar por las paredes de granito son mucho más altas que las de las paredes de adobe.

Los resultados de nuestra investigación muestran semejanza del comportamiento del basalto con el granito mencionado por Rempel.

La calefacción nocturna residencial requiere que el calor se almacene muchas horas antes de que se libere, y luego se entregue a los espacios habitados con bastante rapidez, antes de que los ocupantes se vayan a dormir. La calefacción diurna, en cambio, requiere que el calor se suministre poco después de que se recoja. Uno podría preguntarse razonablemente por qué el calor se almacena para uso diurno, en lugar de simplemente admitirse directamente en el espacio ocupado; sin embargo, los espacios de trabajo no son adecuados para la exposición solar directa debido al potencial de resplandor y sobrecalentamiento. Los muros finos de roca y hormigón de Trombe también suministran calor poco después de la recolección.

En conclusión, el espesor de la roca puede elegirse específicamente para proporcionar la mejor combinación posible de amplitud y momento de entrega de calor y poder ajustarse a las necesidades de los ocupantes. Además, los patrones de captación, almacenamiento y entrega de calor varían en formas características y reproducibles con la roca y el espesor.

## CONCLUSIONES

El método utilizado, técnicas de estado transitorio y estacionario, nos permitió estimar la difusividad térmica  $\alpha = 0,67 \text{ mm}^2/\text{s}$  y la conductividad térmica  $K = 1.58 \text{ W/mK}$  del basalto, y nos proporcionó resultados satisfactorios cuando se compararon con datos publicados. Se sugiere que, en virtud de su eficacia en función de los costos, pues su implementación es económica, se utilice la técnica propuesta para aplicaciones que impliquen la generación de una amplia base de datos.

El resultado de este trabajo muestra que, durante el período de febrero del 2019 a enero del 2020 en la ciudad de Puno, se registró la temperatura mínima ( $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) entre las 6 y 7 de la mañana del 26 de julio y la temperatura máxima ( $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se registró el día 3 del mismo mes a las 4 de la tarde, la mayor diferencia de temperatura mensual ( $20,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se registra en el mes de julio. En un análisis horario del 3 al 4 de mayo se observa que las temperaturas mínimas se registraron entre las 7 y 8 de la mañana y las temperaturas máximas se registraron entre las 3 y 4 de la tarde.

Para la calefacción residencial (nocturna), el elemento masivo ideal absorbe tanto calor como sea posible del sol o de otra fuente de calor, como un incendio, durante el día, y luego libera la mayor parte de su calor durante las siguientes 4-8 h. El calor liberado después de la medianoche es menos importante, ya que las personas están bien aisladas en la cama. En cambio, en la calefacción vespertina de los lugares de trabajo, es necesario aumentar el calor del mediodía para compensar las necesidades de calefacción de la tarde (2:00 - 6:00 p.m.): el calor almacenado debe liberarse mucho antes y mucho más rápidamente que en la calefacción nocturna residencial. el grosor de la pared debe elegirse para proporcionar la amplitud de calor deseada en el clima y la estación del año de mayor importancia.

### RECOMENDACIONES

Para completar el estudio de las características térmicas del basalto se debe realizar pruebas del albedo que viene a ser la fracción de la radiación incidente que es reflejada desde la superficie de la roca.

Para estudios posteriores se debe calcular la radiación solar de la ciudad de Puno en base a los datos de temperatura registrados por Senamhi y relacionar los mismos con la radiación aceptada, no reflejada, por las muestras de basalto.

En base a las costumbres cotidianas de los miembros de un hogar, principalmente la hora de ir a dormir, se debe realizar un estudio de las capacidades de almacenamiento de los principales materiales utilizados en las viviendas del poblador andino y comparar con los resultados de paredes de basalto.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Al-Zyoud, S. (2012). Geothermal Cooling in Arid Regions: An Investigation of the Jordanian Harrat Aquifer System.
- Anil Kumar, P. P. (2015). Overview of Natural Stones as an Energy Efficient and Climate Responsive Material Choice for Green Buildings (pp. 27-35).  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-11961-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11961-8_3)
- Atecos. (2010). Sistemas pasivos: Inercia térmica. Recuperado 16 de febrero de 2019, de <https://studylib.es/doc/5389181/sistemas-pasivos--inercia-térmica>
- Balkan, E., Erkan, K., & Şalk, M. (2017). Thermal conductivity of major rock types in western and central Anatolia regions, Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(4), 909-919. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa5831>
- Basmaci, B. (2017). *Improving indoor thermal comfort in residential buildings in Andean regions of Peru*. Royal Institute of Technology.
- Beall, C. (2004). Masonry design and detailing - For architects and contractors.  
<https://doi.org/http://10.1036/0071433392>
- Chekhonin, E., Parshin, A., Pissarenko, D., Popov, Y., Romushkevich, R., Safonov, S., ... Stenin, V. P. (2012). When Rocks Get Hot: Thermal Properties of Reservoir Rocks. *Oilfield Review, Autumn 2012*(24), 20-37. Recuperado de [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors12/aut12/2\\_rocks\\_hot.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors12/aut12/2_rocks_hot.pdf)
- Clark, A., Farrar, E., Kontak, D., Langridge, R., Arenas, M., France, L., & McBride, S. (1990). Geologic and geochronologic constraints on the metallogenic evolution of the Andes of southeastern Peru. *Economic Geology*, 85(7), 1520-1583.  
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.7.1520>

- Clauser, C., & Huenges, E. (1995). Thermal Conductivity of Rocks and Minerals. En *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants* (pp. 105-126). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/RF003p0105>
- De Ignacio Vivens, G., Soutullo Castro, S., López-Zaldivar, O., Lozano-Diez, R. V., & Verdú Vázquez, A. (2018). Sobre inercia térmica y aislamiento de viviendas en clima cálido-húmedo. *Anales de Edificación*, 4(1), 14-26. <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3730>
- Demezhko, D. Y., Glazachev, I. V., & Konoplin, A. D. (2018). Complex Thermophysical Analysis of the Samples of Rocks Based on the Data of Measurements of Thermal Effusivity. *Measurement Techniques*, 61(1), 48-54. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1386-5>
- Díaz, A., Carpio, M., & Ramírez, J. (2012). *Estudio geológico económico de rocas y minerales industriales en la región de Puno. Boletín N° 30, Serie B: Geología Económica*; Lima: INGEMMET. Recuperado de <http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/229>
- Dinker, A., Agarwal, M., & Agarwal, G. D. (2017). Heat storage materials, geometry and applications: A review. *Journal of the Energy Institute*, 90(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/J.JOEI.2015.10.002>
- Dobos, E. (2006). Albedo. En R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil science* (2da ed.). New York: Taylor & Francis. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=sjNZ3LSUz80C&pg=PA64&lpg=PA64&dq=Albedo+Endre+Dobos&source=bl&ots=YXNcREpvH6&sig=ACfU3U1ykdyVu2vMnOe2kwql8vAr119FVQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi-x4u6ocngAhVGqlkKHWBWCukQ6AEwA3oECACQAQ#v=onepage&q=Albedo+Endre+Dobos&f=fa>
- Eppelbaum, L., Kutasov, I., & Pilchin, A. (2014). Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids. En *Applied Geothermics* (pp. 99-149). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34023-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34023-9_2)
- Espinoza, R., Saavedra, G., Huaylla, F., Gutarra, A., Molina, J., Barrionuevo, R., & Lau, L. (2009). Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico



en una vivienda altoandina del Perú. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13(5), 203-210.

Flores, A. (2014). Construcción de una vivienda solar en base a las propiedades termofísicas y evaluación experimental de su confort térmico en Ilave. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 16(01), 177-186.  
<https://doi.org/10.18271/ria.2014.101>

Gonzales, R., & Lopez, A. (2015). *Informe final del área de geología Región Puno*. Puno.

Hall, K. (2003). Evidence for freeze–thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(1), 43-57.  
<https://doi.org/10.1002/esp.1012>

Hall, K., Lindgren, B. S., & Jackson, P. (2005). Rock albedo and monitoring of thermal conditions in respect of weathering: some expected and some unexpected results. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(7), 801-811. <https://doi.org/10.1002/esp.1189>

Hammer, Ø. (2019). *PAleontological STatistics (PAST 4.0)*. Noruega: University of Oslo.

Hartlieb, P., Toifl, M., Kuchar, F., Meisels, R., & Antretter, T. (2016). Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution. *Minerals Engineering*, 91, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.11.008>

Huaylla, F. (2010). *Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina*. Universidad Nacional de Ingeniería. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/935>

INEI. (2017a). *Compendio estadístico Puno 2017*.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

INEI. (2017b). *Puno: Encuesta Demográfica y de Salud Familiar - ENDES 2016*.  
Recuperado de [www.inei.gob.pe](http://www.inei.gob.pe)

Iñigo, A. ., & Vicente-Tavera, S. (2002). Surface-inside (10 cm) thermal gradients in granitic rocks: effect of environmental conditions. *Building and Environment*, 37(1), 101-108.  
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00083-4)

- Instituto del Centro Portland Argentino. (2013). *Aprovechamiento de la masa térmica del hormigón para la construcción de viviendas sostenibles*. Buenos Aires. Recuperado de [http://www.icpa.org.ar/publico/files/articulos-tecnicos/ICPA-AT-501\\_Aprovechamiento\\_de\\_la\\_masa\\_termica\\_del\\_hormigon.pdf](http://www.icpa.org.ar/publico/files/articulos-tecnicos/ICPA-AT-501_Aprovechamiento_de_la_masa_termica_del_hormigon.pdf)
- Jhonson, R. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingenieros* (8.<sup>a</sup> ed.). México: Pearson.
- Machuca, J. (2015). *Incidencia térmica de la piedra volcánica como elemento constructivo en las viviendas de la Comunidad Campesina de Sacsamarca*. Universidad Nacional del Centro.
- McGreevy, J. P. (1985). Thermal properties as controls on rock surface temperature maxima, and possible implications for rock weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10(2), 125-136. <https://doi.org/10.1002/esp.3290100205>
- Mostafa, M. S., Afify, N., Gaber, A., & Abu Zaid, E. F. (2004). Investigation of thermal properties of some basalt samples in Egypt. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 75(1), 179-188. <https://doi.org/10.1023/B:JTAN.0000017340.19830.45>
- Nagaraju, P., & Roy, S. (2014). Effect of water saturation on rock thermal conductivity measurements. *Tectonophysics*, 626, 137-143. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2014.04.007>
- Nahhas, T., Py, X., & Sadiki, N. (2019). Experimental investigation of basalt rocks as storage material for high-temperature concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.060>
- Pastormerlo, J., & Souza, E. (2013). *Aprovechamiento de la masa térmica del hormigón para la construcción de Viviendas Sostenibles*. Buenos Aires. Recuperado de [http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/Plataforma Hormigon/masa termica.pdf](http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/Plataforma_Hormigon/masa_termica.pdf)
- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., & Roy, S. (2016). ISRM Suggested Methods for Determining Thermal Properties of Rocks from Laboratory Tests at Atmospheric Pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(10), 4179-4207. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1070-5>

- Quispe, L., Huillca, M., & Sotomayor, G. (2018). Estimación de la radiación solar global en la ciudad de Puno mediante la aplicación del modelo Bristow y Campbell. *Ñawparisun - Revista de Investigación Científica*, 1(Octubre-Diciembre, 2018), 27-34. Recuperado de <http://unaj.edu.pe/revista/index.php/vpin/article/view/7>
- Ramakrishnan, D., Bharti, R., Nithya, M., Kusuma, K. N., & Singh, K. D. (2012). Measurement of thermal properties of select intact and weathered granulites and their relationship to rock properties. *Geophysics*, 77(3), D63-D73. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0225.1>
- Rempel, A., & Rempel, A. (2013). Rocks, Clays, Water, and Salts: Highly Durable, Infinitely Rechargeable, Eminently Controllable Thermal Batteries for Buildings. *Geosciences*, 3(1), 63-101. <https://doi.org/10.3390/geosciences3010063>
- Ríos, L. (2014). *Relación de las variables meteorológicas con los episodios de infecciones respiratorias agudas (IRAS), neumonía, y muerte por neumonía en niños menores de cinco años, región Puno, 2009-2012*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de [http://ateneo.unmsm.edu.pe/ateneo/bitstream/123456789/4602/1/Rios\\_Torres\\_Luis\\_Alberto\\_2014.pdf](http://ateneo.unmsm.edu.pe/ateneo/bitstream/123456789/4602/1/Rios_Torres_Luis_Alberto_2014.pdf)
- Robertson, E. C. (1988). *Thermal Properties of Rocks*. Virginia. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/of/1988/0441/report.pdf>
- Robertson, E. C., & Peck, D. L. (1974). Thermal conductivity of vesicular basalt from Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, 79(32), 4875-4888. <https://doi.org/10.1029/jb079i032p04875>
- Rozis, J.-F., & Guinebault, A. (1997). *Calefacción solar para regiones frías : guía tecnológica de aplicación para la vivienda y la agricultura en países en desarrollo*. Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=gGbFU6RSkxAC&pg=PA4&lpg=PA4&dq=Calefacci3n+solar+para+regiones+frías:+guía+tecnológica+de+aplicación+para+la+vivienda+y+la+agricultura+en+países+en+desarroll&source=bl&ots=izHDRzjRft&sig=A>

- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.014>
- Shengjun, M., Fei, C., & Guangjian, C. (2015). Thermal Conductivity of Rocks and the Analysis of Its Influence Factors. En *2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* (pp. 1337-1340). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2015.327>
- Warke, P. A., & Smith, B. J. (1998). Effects of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests. *Geomorphology*, 22(3-4), 347-357. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00078-0)
- Yaşar, E., Erdoğan, Y., & Güneşli, H. (2008). Determination of the thermal conductivity from physico-mechanical properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 219-225. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0126-5>

## ANEXOS

**Anexo 1: Resultados de la investigación**

Tabla 7

*Resultados de la evaluación de las propiedades térmicas del basalto y la temperatura de la ciudad de Puno.*

<b>Muestras /Meses</b>	<b>Conductividad termica (W/mK)</b>	<b>Difusividad termica (mm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Temperatura mensual (°C)</b>
1	1.38	0.57	10.8
2	1.54	0.65	10.9
3	1.81	0.80	10.2
4			9.2
5			8.0
6			7.6
7			8.4
8			10.2
9			10.4
10			10.7
11			11.4
12			10.9
Promedio	1.58	0.67	9.89

## Anexo 2: Especificaciones Técnicas del Sistema de Adquisición y Registro de Datos

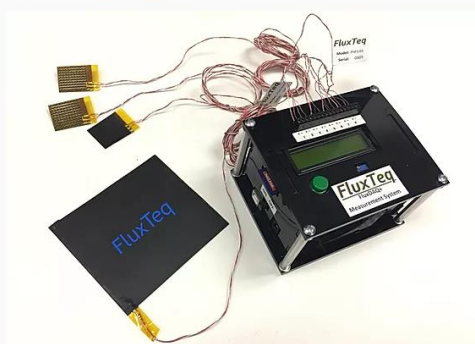
### FluxDAQ+

#### FluxDAQ+ Heat Flux Sensor and Thermocouple Measurement and Data Logging System

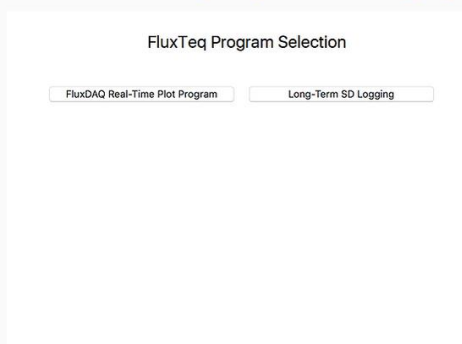
The FluxDAQ+ is a low-cost Arduino based data acquisition system that is designed to accurately measure the small analog DC voltage output signals from PHFS heat flux sensors, their integrated thermocouples and independent thermocouple based temperature sensors. The FluxDAQ+ enables precise measurement resolution at a fraction of the cost to other currently available systems.

Increased functionality has been added to the FluxDAQ+ to include data logging capabilities that are independent of a personal computer. New features allow the user to either take data directly to the computer and display real-time plots of heat flux and temperature (same as with the FluxDAQ) or run the device portably and log the data over time while connected to an AC outlet. The data is recorded to an 8 Gigabyte SD memory card (included) which can be removed and accessed on a computer at a later time.

Everything offered with FluxDAQ.....



.....but now offering long-term data logging



#### Key System Features

- 8 differential input channels for simultaneous measurements of both heat flux and temperature from 4 PHFS sensors.
- LCD screen for on-device measurement readout from one PHFS sensor channel.
- SD memory card for data logging while not connected to a computer.
- AC power adapter for powering the device while not connected to a computer.
- Free software for computer-based user interface and data recording through a USB cable connection.
- Automatic zeroing of current bias error for increased accuracy, especially while using high impedance sensors.

#### Applications

- Long-term studies of heat flux and temperature
- In-situ measurement of thermal insulation R-value using the PHFS-09 series sensors
- Building science studies - measure heat flux and temperature of entire building envelope over time

#### FluxDAQ+ System Specifications

#### Certificate

Input Signal Type:	Heat flux sensor and Type-T Thermocouple Analog DC Voltages
Number of Channels:	8 Differential (16 Single-Ended)
Type of ADC:	24-bit Delta-Sigma
Voltage Resolution:	<1 $\mu$ V
Heat Flux Resolution Using PHFS-01:	Approximately 1 - 2 W/m <sup>2</sup>
Heat Flux Resolution Using PHFS-09:	Approximately 0.1 - 0.2 W/m <sup>2</sup>
Maximum Sampling Rate:*	Up to 2.5 Hz
Overall Package Dimensions**	5.0" x 4.2" x 3.5" (12.7 x 10.7 x 8.9 cm)
Standard Features:	Integrated Thermistor for Cold Junction Temperature Compensation
SD Memory Card Storage Capacity:	8 Gigabytes (SD card included)
Number of Measurements:	Approx. 10 Million Measurements Using All 8 Channels



Anexo 3: Especificaciones Técnicas del Sensor PHFS-01



PHFS-01 Heat Flux Sensor Datasheet

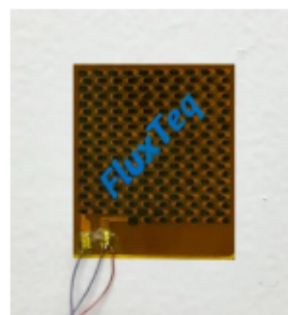
[www.FluxTeq.com](http://www.FluxTeq.com)    [info@fluxteq.com](mailto:info@fluxteq.com)    +1-540-257-3735

PHFS-01 Heat Flux Sensor Description

The PHFS-01 is the first low-cost heat flux sensor on the market. It has minimal thickness while still maintaining excellent sensitivity. The heat flux sensor is flexible enough to be easily attached to round surfaces.

Potential Applications

- R&D of heat transfer components
- Energy efficiency of thermal systems
- Heat transfer education
- Wearable technology that detects calorie burn

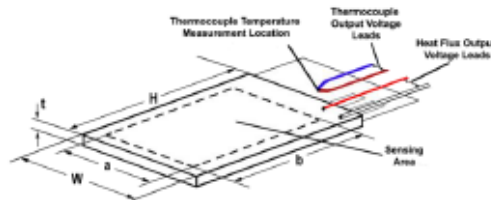


Heat Flux Sensor Specifications

Sensor Type	Differential-Temperature Thermopile
Encapsulation Material	Kapton (polyimide)
Nominal Sensitivity	Approx. 8.0 mV/(W/cm <sup>2</sup> )
Sensor Thickness (t)	Approx. 380 microns
Specific Thermal Resistivity	Approx. 0.9 K/(kW/m <sup>2</sup> )
Absolute PHFS Thermal Resistance	Approx. 1.0 K/W
Heat Flux Range	+/- 150 kW/m <sup>2</sup>
Temperature Range**	-50 °C to 120 °C
Response Time*	Approx. 0.6 seconds
Sensor Surface Thermocouple	Type-T
Sensing Area Dimensions (cm)	a = 2.54 cm    b = 2.54 cm
Total Sensor Dimensions (cm <sup>2</sup> )	W = 2.7 cm    H = 3.2 cm
Sensing Area (cm <sup>2</sup> )	6.45 cm <sup>2</sup>
Total Sensor Area (cm <sup>2</sup> )	8.6 cm <sup>2</sup>

\*Response time is time for one time constant or 63% of sensor output signal to a heat flux step input

\*\* Temperature range may be larger than specified. Further testing is being conducted.



For additional information about PHFS heat flux sensor specifications, applications, or general inquiries, use the following contact information or visit the FluxTeq website at [www.FluxTeq.com](http://www.FluxTeq.com)

Direct General Inquiries To: [info@FluxTeq.com](mailto:info@FluxTeq.com)    Phone: +1-(540) 257-3735

Email: [info@FluxTeq.com](mailto:info@FluxTeq.com)    Homepage: [www.FluxTeq.com](http://www.FluxTeq.com)    Phone: +1-(540)257-3735  
 1800 Kraft Drive, Suite 109, Blacksburg, VA 24060-6370

Anexo 4: Certificado de calibración del sensor PHFS-01, PH-10479



PHFS Certificate of Calibration

10 ft

www.FluxTeq.com info@fluxteq.com +1-540-257-3735

Sensor Model: PHFS - 01  
 Serial Number: PH - 10479  
 Date of Calibration: 8/26/19

**Sensor Calibration Method**

PHFS-01 heat flux sensors are calibrated using a conduction based calibration system. The sensors are placed between a precisely controlled hot plate surface, heated by a resistance heater, and a cold water cooled surface. This calibration system was developed in-house by FluxTeq LLC and provides results of up to 5% accuracy.

**Calibration Test Results**

Heat Flux Sensor Sensitivity, $S_{Calib}$	1.58 ± 0.03 $\mu V/(W/m^2)$
Sensor Temperature at Time of Calibration, $T_{Calib}$	25.0 °C
Heat Flux at Time of Calibration	3270 $W/m^2$

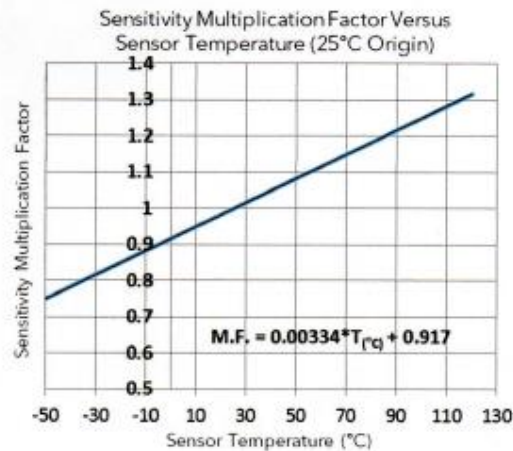
- Sensors should be recalibrated after 1 year to ensure accuracy.
- Each individual sensor is calibrated in conduction system to within 5%.
- Alternate calibration procedures under radiation and convection conditions are available upon request for additional cost per sensor.

Apply the Sensitivity Multiplication Factor (M.F.) to adjust sensor sensitivity when the sensor temperature is significantly different than 25 °C.

The resulting sensitivity at that sensor temperature,  $S_{@T_c}$ , can be found using the following equation.

$$S_{@T_c} = [0.00334 * T_c + 0.917] * S_{Calib}$$

Where  $T_c$  is the sensor's temperature in degrees Celsius &  $S_{Calib}$  is the calibrated sensor sensitivity provided in the table above.



Calibrated by:

For additional information about PHFS heat flux sensor specifications, applications, or general inquiries, use the following contact information or visit the FluxTeq website at [www.FluxTeq.com](http://www.FluxTeq.com)

Direct General Inquiries To: [info@FluxTeq.com](mailto:info@FluxTeq.com) Phone: +1-(540) 257-3735

Email: [info@FluxTeq.com](mailto:info@FluxTeq.com) Homepage: [www.FluxTeq.com](http://www.FluxTeq.com) Phone: +1-(540)257-3735  
 1800 Kraft Drive, Suite 109, Blacksburg, VA 24060-6370



**Anexo 5: Modelo de la información que se obtiene de la página web de SENAMHI**

Estación : PUNO						
Departamento : PUNO		Provincia : PUNO		Distrito : PUNO		
Latitud : 15°49'34.5"		Longitud : 70°0'43.5"		Altitud : 3812 msnm.		
Tipo : EMA - Meteorológica		Código : 472DD33A				
AÑO / MES / DÍA	HORA	TEMPERATURA (°C)	PRECIPITACIÓN (mm/hora)	HUMEDAD (%)	DIRECCION DEL VIENTO (°)	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)
2/1/2019	8:00	S/D	0.6	S/D	103	1.5
2/1/2019	9:00	9.8	0	70	302	1.3
2/1/2019	14:00	14.2	0	58	104	4.2
2/2/2019	11:00	S/D	S/D	S/D	116	0.9
2/2/2019	12:00	S/D	0	S/D	250	0.5
2/2/2019	13:00	12.2	0	70	108	3.6
2/3/2019	12:00	S/D	S/D	S/D	106	5.2
2/4/2019	9:00	9.6	0	73	135	1.4
2/4/2019	10:00	S/D	0	S/D	96	4.1
2/4/2019	13:00	11.3	0	72	111	3.6
2/4/2019	15:00	13.2	0	61	85	3.9
2/5/2019	10:00	0	S/D	S/D	S/D	S/D
2/5/2019	14:00	13	0	61	116	4.4
2/5/2019	15:00	S/D	0	S/D	109	4.3
2/6/2019	9:00	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
2/6/2019	10:00	8.2	0.2	93	159	2.9
2/6/2019	13:00	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
2/6/2019	14:00	13.9	0	58	98	5.2
2/6/2019	15:00	14.7	0	55	108	4.8
2/6/2019	16:00	15.1	0	48	106	4.6
2/6/2019	17:00	15.5	0	41	77	3.9
2/6/2019	18:00	15.1	0	44	79	5.3
2/6/2019	19:00	14	0	49	70	5
2/6/2019	20:00	12.6	0	65	67	4.7
2/6/2019	21:00	11.8	0	70	53	2.4
2/6/2019	22:00	11.3	0	78	75	4.1
2/6/2019	23:00	11	0	79	66	3.8
2/7/2019	0:00	10.6	0	79	55	3.5
2/7/2019	1:00	10.4	0	78	109	6.9
2/7/2019	2:00	9.9	0	74	151	4.3
2/7/2019	3:00	8.6	0	81	203	3
2/7/2019	4:00	7.7	0.2	88	265	1.1
2/7/2019	5:00	7.6	0	86	326	3.2
2/7/2019	6:00	6.7	0	93	328	2.3
2/7/2019	7:00	6.9	0	89	279	1.3
2/7/2019	8:00	8.2	0	77	200	1.7
2/7/2019	9:00	10.1	0	66	139	1.3
2/7/2019	10:00	10.3	0.4	67	260	2
2/7/2019	11:00	8.3	1.8	89	331	3.5
2/7/2019	12:00	11.2	0	68	166	2.5

Anexo 6: Temperatura de la ciudad de Puno, Período enero 2019 a enero 2020

