



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO**



**EVALUACIÓN DE FACTORES LUMINICOS QUE INFLUYEN EN  
LA EFICIENCIA ENERGETICA PARA EL DISEÑO DE ESPACIOS  
EDUCATIVOS EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO DE LA UNA –  
PUNO**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. KATHY DEISY MACHACA GUTIERREZ**

**Bach. DAYANA PRISCILA APAZA SALGADO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**ARQUITECTO**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



# KATHY DEISY MACHACA GUTIERREZ - DAYANA PR... EVALUACIÓN DE FACTORES LUMINICOS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA ENERGETICA PARA EL DISEÑO DE ESPACIOS...

Universidad Nacional del Altiplano

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:415043161

84 Páginas

Fecha de entrega

11 dic 2024, 11:09 a.m. GMT-5

16,378 Palabras

Fecha de descarga

11 dic 2024, 11:13 a.m. GMT-5

87,894 Caracteres

Nombre de archivo

TESIS 2024 KATHY DAYANA.pdf

Tamaño de archivo

5.1 MB



## 13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

### Fuentes principales

- 12% Fuentes de Internet
- 5% Publicaciones
- 6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Mg. Arq. José A. Planos Cond.  
COORDINADOR DE SUB DIRECCION DE INVESTIGACION



L. Martín Mamani  
P.º P.º ARQUITECTURA Y URBANISMO  
CAP. 14838





## DEDICATORIA

*A Dios, por regalarme la salud y la vida; a mis padres Lujan Machaca y Julia Gutiérrez, con su ejemplo de esfuerzo y valentía me llevaron a cumplir más de un sueño; a Betsabé, Nandy y Vanesa por su disposición de tiempo; Su orientación y motivación han sido esenciales en cada etapa de este camino y con un corazón agradecido.*

**Kathy Deisy Machaca Gutierrez**



*Primeramente, dedico esta investigación a Dios, ya que mi carrera está en sus manos y es para su servicio. A mi familia, fuente inagotable de amor, apoyo y motivación, en especial a mis padres, José Apaza y Gladys Salgado, ya que gracias a ellos estoy culminando esta etapa académica, su fortaleza y dedicación han sido base de todo lo que eh logrado. También lo dedico a mi hermano, Jhordan JhazieL, cuya ayuda invaluable me ha permitido llegar hasta aquí. A mi abuela materna cuyo amor por mí no conocía límites y quién me enseñó el valor del trabajo duro. Gracias nunca te olvidaré. A mis amigos que me han animado en medio de todo el proceso y que han sido un pilar fundamental para seguir avanzando A todos, les dedico este logro con todo mi corazón.*

**Dayana Priscila Apaza Salgado**



## AGRADECIMIENTO

*En primer lugar, agradezco a Dios por concederme la vida y brindarme la oportunidad de seguir adelante.*

*A mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, por la formación académica recibida, a mis maestros por su dedicación a la enseñanza.*

*Mi agradecimiento a la Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo, Escuela profesional de Sociología y la Escuela profesional de Nutrición Humana por poner a nuestra disposición sus instalaciones, lo que permitió llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de tesis.*

*También quiero expresar mi gratitud a mi asesor, Dr. Grover Marin Mamani, por brindarnos la oportunidad de contar con su conocimiento y experiencia, por su constante aliento, inspiración y respaldo a lo largo de este proceso, lo que fue fundamental para el avance de esta investigación.*

*Finalmente, agradezco profundamente a mis padres, hermanos y amigos por su apoyo moral incondicional en todo momento.*

**Kathy Deisy Machaca Gutiérrez**

**Dayana Priscila Apaza Salgado**



## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ACRÓNIMOS

CARTA DE ACEPTACIÓN DE PUBLICACIÓN ..... 10

CAPÍTULO I ..... 11

INTRODUCCIÓN ..... 11

CAPÍTULO II ..... 17

ARTÍCULO ACEPTADO ..... 17

ANEXOS ..... 43

ANEXOS 1: INFORMACIÓN DE LA REVISTA ..... 43

ANEXOS 2: TRADUCCIÓN AL ESPAÑOL ..... 45

ANEXO 3:ARTICULO PUBLICADO ..... 72



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Resultados de cumplimiento normativo nacional e internacional en espacios educativos EPAU, EPNH y EPS.....	56
<b>Tabla 2</b> Resultados comparativos con la instalación del prototipo de tuvo solar en modelos a 1:5 .....	64





## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ubicación del campus universitario y Escuelas Profesionales del muestreo. .	50
<b>Figura 2</b> Diseño del prototipo del Sistema reflectores con tubos solares. ....	53
<b>Figure 3</b> Muestras con mayor déficit lumínico (a) aula 105 EPAU, (b) aula 101 EPNH, (c) aula 203 EPS.....	55
<b>Figura 4</b> Análisis de uniformidad de iluminación aulas 105 de la EPAU, 101 de la EPNH y 203 de la EPS .....	62
<b>Figura 5</b> Medición en modelo a escala (a) grupo control, (b)grupo experimental. ....	64



## ACRÓNIMOS

EPAU:	Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo
EPNH:	Escuela Profesional de Nutrición Humana
EPS:	Escuela Profesional de Sociología
IESNA:	Illuminating Engineering Society of North America
TDD:	Tubular Daylighting Devices



## CARTA DE ACEPTACIÓN DE PUBLICACIÓN

En base al reglamento de titulación alternativa, la tesis fue elaborada en formato de artículo científico para su evaluación por la Revista Científica Multidisciplinaria (Brasil), la cual está indexada en SCOPUS – Q4, <https://www.scopus.com/sourceid/21101133576>. Tras un exhaustivo proceso de revisión, la investigación fue aceptada para su publicación. Cabe destacar que la revista únicamente recibe artículos en inglés, razón por la cual el trabajo se presenta en dicho idioma. A continuación, se incluye la carta de aceptación emitida por la revista indexada.





# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la población estudiantil en el campus universitario de la UNA-Puno ha llevado a la expansión de la infraestructura educativa, con la construcción de nuevas aulas que se ubican contiguas a las ya existentes. Sin embargo, esta expansión ha generado un problema significativo: Reduciendo la cantidad de luz natural que ingresaba a los espacios, afectando la calidad de la iluminación en las aulas y el bienestar de los estudiantes. La falta de una adecuada iluminación natural puede incidir negativamente en el rendimiento académico y en el confort de los usuarios. Ante esto, surgió la necesidad de buscar una solución innovadora, planteando un desafío en cuanto al diseño y la optimización de los espacios educativos que cuenten con una iluminación adecuada sin depender excesivamente de la energía eléctrica.

En un mundo de variaciones climáticas y con recursos naturales como la luz natural que influye directamente en el estado de ánimo de las personas. La exposición a luz brillante y natural tiene efectos positivos, mejorando el ánimo y reduciendo la sensación de estrés y ansiedad, mientras que la falta de luz natural puede llevar a sentimientos de tristeza, irritabilidad y depresión. En un entorno educativo, donde los estudiantes están expuestos a largos períodos de tiempo dentro de las aulas, la presencia de una iluminación adecuada puede mejorar la concentración, reducir la fatiga mental y aumentar la productividad. Los alumnos que estudian en aulas con buena calidad lumínica tienden a tener un mejor rendimiento académico.

Los factores lumínicos en los centros educativos son fundamentales no solo para la eficiencia del aprendizaje, sino también para la salud y el bienestar general de los



usuarios. En este contexto una iluminación adecuada mejora, el estado de ánimo y optimiza el confort lumínico. Por lo tanto, es crucial que los espacios educativos cuenten con un diseño de iluminación que maximice el uso de luz natural, mediante la propuesta de incorporación de sistemas de iluminación natural alternativos, como los tubos solares o sistemas de fibra óptica, que permiten transportar la luz solar hacia los espacios internos sin depender de la ubicación geográfica o las condiciones climáticas complementado con sistemas artificiales eficientes.

Este estudio se centra en la evaluación de los niveles de iluminancia en las aulas especialmente en el campus universitario. El análisis de la calidad de iluminación en los ambientes interiores de la infraestructura se centra en los usuarios, considerando aspectos claves como el confort lumínico y la eficiencia energética. Además, La incorporación de sistemas de iluminación no solo mejorarían la calidad lumínica en los ambientes educativos, sino que también reducirían el consumo energético, contribuyendo al cuidado del medio ambiente y a la sostenibilidad del campus universitario. De esta manera, se busca ofrecer una solución eficiente que optimice el uso de recursos naturales y proporcione un entorno de aprendizaje más saludable y confortable para los estudiantes.

La implementación del Prototipo de tubo solar y sistema de fibra óptica en espacios educativos y otros entornos representa una solución innovadora y eficaz para mejorar la calidad de la iluminación interior de los edificios. Dado que los sistemas capturan la luz solar durante el día, pueden sustituir o complementar la iluminación artificial en muchos casos, especialmente en aulas y pasillos. Esto no solo reduce las facturas de electricidad, sino que también disminuye la huella de carbono del edificio, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética.



El presente Proyecto se llevó a cabo en el campus Universitario de la UNA-PUNO, ubicado en la ciudad de Puno a más de 3800 metros sobre el nivel del mar. Específicamente en tres escuelas profesionales de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno (EPAU, EPNH, EPS), con el objetivo de identificar deficiencias en la iluminación y proponer soluciones que optimicen tanto la eficiencia energética como el confort de los estudiantes y docentes.

En la actualidad, la eficiencia energética y el diseño sostenible son dos de los pilares fundamentales en la planificación y construcción de infraestructuras, especialmente en entornos educativos. La evaluación de los factores lumínicos que influyen en la eficiencia energética es un tema de creciente relevancia, dado el impacto directo que tiene la calidad de la iluminación en el bienestar de los estudiantes y docentes, así como en los costos operativos de las instituciones. En el contexto del campus universitario de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA) en Puno, esta problemática adquiere una dimensión aún más crítica debido a las condiciones geográficas y climáticas de la región, que afectan directamente la disponibilidad y calidad de la luz natural en los espacios educativos.

El análisis de los niveles de iluminación en espacios educativos es crucial para garantizar un entorno adecuado para el aprendizaje, particularmente en regiones con características geográficas y climáticas especiales, como la ciudad de Puno. La investigación no solo aborda la medición de la iluminación en diferentes períodos del día y pisos, sino también la comparación de estos datos con las normativas internacionales de iluminación, como la Norma Técnica G.050, la ISO 8995-1:2002, y la norma europea EN 12464-1. A través de este enfoque, se destacan áreas de mejora en la infraestructura de iluminación, especialmente en los pisos inferiores de los edificios evaluados, donde se



observan niveles insuficientes de iluminancia que afectan la calidad del ambiente educativo. Además, el estudio incorpora el análisis de soluciones innovadoras, como la implementación de un prototipo de tubo solar y sistema de fibra óptica, que demuestran ser efectivos para mejorar la iluminación natural en las aulas, reduciendo la dependencia de la iluminación artificial y los costos operativos asociados.

Este trabajo subraya la importancia de la eficiencia energética en la sostenibilidad de los espacios educativos y su impacto en el bienestar de los usuarios. Asimismo, resalta la necesidad de adoptar el prototipo de tubo solar y sistema de fibra óptica donde puede mejorar las condiciones de iluminación natural y el diseño de espacios, ya que no solo contribuye al bienestar y confort de los usuarios, sino que también tiene un impacto significativo en el ahorro energético. De acuerdo con los principios de diseño sostenible, se ha desarrollado un enfoque que prioriza el uso de la luz natural en espacios cerrados, con el objetivo de reducir el consumo de energía eléctrica.

En el marco de la investigación para la mejora de la iluminación mediante un prototipo, se optó por publicar los resultados en una revista científica. Esta decisión garantiza que nuestra investigación cuente con una audiencia más amplia y contribuya de manera significativa en el campo de la arquitectura sostenible y el diseño de espacios educativos. Publicar los resultados en una revista especializada ofrece la oportunidad de que otros investigadores, académicos y profesionales en el área se beneficien de las soluciones innovadoras propuestas, que este tipo de investigaciones no solo difunda conocimiento, sino que también cumple con la misión de fomentar el desarrollo de soluciones tecnológicas y sostenibles aplicables a los desafíos actuales en difundir los recursos naturales y el diseño de espacios educativos que aporten a la sostenibilidad. Además, la publicación en una revista científica fortalece la visibilidad y reputación



académica de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA-Puno), posicionándola como una institución de vanguardia que apoya e impulsa investigaciones en temas clave para el desarrollo sostenible, la eficiencia energética y el bienestar de las comunidades urbanas y rurales.

El proceso de una serie de observaciones, experimentaciones y la de redacción del artículo científico implicó una cuidadosa planificación y un enfoque exhaustivo de la búsqueda de objetivos de estudio, las cuales dieron paso a la recolección de datos evaluándose así la poca iluminación existente en los ambientes educativos, dándose el paso a proponer el prototipo de tubo solar en donde se requería de materiales tecnológicos a utilizar para la experimentación, seguido de un proceso de escritura meticuloso. Cada fase del proyecto demandó un alto nivel de organización y dedicación, comenzando por la formulación de objetivos claros y la selección de fuentes y datos relevantes. La investigación exhaustiva fue clave para garantizar que la información fuera precisa y estuviera actualizada, lo que permitió sustentar sólidamente las conclusiones del estudio que contribuyen al avance del conocimiento del área de estudio.

La redacción requirió una atención meticulosa y un proceso constante de revisión para asegurar claridad, coherencia y fluidez en la presentación. Se siguió la estructura estándar de los artículos científicos, comenzando con la introducción, la metodología, los resultados, la discusión y las conclusiones. La introducción presentó el contexto y la importancia del estudio, mientras que la metodología explicó detalladamente el experimento. Los resultados se presentaron de manera accesible a través de figuras y tablas, tanto para expertos como para lectores no especializados. En conjunto, un enfoque riguroso en la investigación y una redacción organizada resultaron en un artículo que no





solo cumplió con los estándares académicos, sino que también aportó valor al campo de estudio.

Seleccionar la revista apropiada fue un proceso que demandó investigación, ya que debía encontrar una publicación que aceptara artículos sobre arquitectura, comfort ambiental y eficiencia energética. Tras evaluar varias opciones, se eligió una revista científica multidisciplinaria con audiencia internacional y un estricto proceso de revisión por pares. Esto implicó que expertos en el tema evaluaran la calidad, originalidad y relevancia del trabajo. Después de la revisión y correcciones necesarias, el artículo fue finalmente aceptado para su publicación.



## CAPÍTULO II

### ARTÍCULO ACEPTADO

#### **Evaluation of lighting factors that influence energy efficiency for the design of educational spaces on the university campus of the UNA, Puno.**

**Kathy Deisy Machaca Gutierrez<sup>a</sup>   | Dayana Priscila Apaza Salgado<sup>a</sup>  | Grover Marín Mamani<sup>a</sup> **

<sup>a</sup> *Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture.*

#### **Abstract**

Energy efficiency in higher education buildings is crucial to reduce energy consumption. The campus of the Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Peru, faces unique challenges due to its geographical location at over 3800 m.a.s.l. and its position in the southern hemisphere, where lighting is a challenge for buildings. This study evaluated the lighting and energy efficiency in educational spaces using a prototype system with reflectors and a solar tube. Lighting levels were measured in three vocational schools using a digital lux meter at different periods of the day. In addition, an experimental prototype of natural lighting based on solar tubes was developed and its effectiveness was evaluated in selected classrooms with lighting deficits. Significant differences were demonstrated in the lighting levels in the classrooms, especially on the lower floors, where the illuminance levels did not reach the 300 lux recommended for general classrooms and 500 lux for laboratories. In classroom 105 of the Professional School of Architecture and Urbanism, classroom 101 of the Professional School of Human Nutrition, and classroom 203 of the Professional School of Sociology, the illuminance levels were well below the required standards. The implementation of the solar tube prototype significantly increased the illuminance levels in these environments. These



remarkable increases improved the lighting comfort of the classrooms, meeting and exceeding international standards. It also highlights the importance of integrating daylighting solutions into the architectural design of educational buildings. Adopting these technologies is recommended in regions with similar geographic and climatic conditions to Puno. Implementing daylighting technologies, such as solar tubes, is an effective strategy to improve the quality of the learning environment in educational buildings.

**Keywords:** Light deficit, Natural lighting, Scale model, Solar tubes.

## 1. INTRODUCTION

Global electricity demand grew by 2% in 2022 and is expected to grow by 3% in the next three years, with 20% of the planet's electricity use being distributed to lighting (Sanchez & David, 2022; Zhang et al., 2024). According to historical data, this trend has remained constant over the last decade, with minor variations due to economic and technological factors (Kartal et al., 2024). Currently, 74% of electricity production is supplied by hydrocarbon fuels, which are unsustainable in the long term and negatively affect the environment (Ocaña, 2022; Cloete et al., 2023). This impact includes significant CO<sub>2</sub> emissions, which contribute to climate change and air pollution (Inchuña et al., 2024). By 2040, global energy consumption is expected to increase by 30%, and 37% of electricity generation is expected to come from renewable sources, particularly wind and solar generation (Ramos et al., 2022; Pourasl et al., 2023).

The increased use of artificial lighting affects emissions in an energy grid without a more holistic view, which negatively impacts the economy, health, landscape, etc. (Vaisi et al., 2022). Specific studies have shown that artificial light at night can alter ecosystems, affect human sleep patterns, and increase energy consumption (Zhang et al., 2024). To mitigate the negative effects produced by energy consumption, architecture-



based strategies are sought to make intelligent use of available natural resources to achieve a comfortable and sustainable indoor environment (Arvizu-Piña et al., 2023). Successful examples include the use of skylights, ventilated facades, and reflective materials that maximize natural light (Bosu et al., 2023). Energy efficiency involves obtaining energy goods and services with a decrease in emissions generation and an improvement in the quality of indoor spaces, extending the life of resources (Re & Bianchi, 2020). A low incidence of natural lighting in spaces where activities are carried out implies a greater need for artificial lighting and, therefore, higher energy consumption for the building. For example, studies have shown that a 50% reduction in natural lighting can increase electricity consumption by 20% (Budhiyanto & Chiou, 2024). Daylighting contributes to the energy efficiency of the residential sector and improves the health and livability of space. Exposure to natural light has been shown to reduce stress and improve the overall well-being of occupants (Wang et al., 2024). Owing to the increasing need for electrical energy savings, daylighting is becoming increasingly important in buildings. Various lighting strategies could make dispensing artificial lighting at certain times possible, thus optimizing energy consumption (Moazzen et al., 2021). Several studies have shown that the use of natural lighting strategies and systems minimizes losses and uses energy more efficiently, thus increasing occupant comfort (Usta & Zengin, 2021). The implementation of efficiency and energy-saving measures in buildings is fundamental; however, daylighting systems depend on latitude, meteorology, time of year, and time of day, and can be predictable or very unpredictable (Galeano & Betanco, 2021). For example, in regions with high climatic variability, the efficiency of these systems can fluctuate significantly (Degefu & Kifle, 2024).

Our research focuses on the city of Puno, focusing on the university campus of UNA-Puno, owing to the growing demand for educational infrastructure. The department



of Puno is in the extreme southeast of Peru, between  $13^{\circ}00'00''$  and  $17^{\circ}17'30''$  south latitude and  $71^{\circ}06'57''$  and  $68^{\circ}48'46''$  west longitude; it has a territorial extension of 71,999.0 km<sup>2</sup>. Puno has the most important lake port in Peru and is the seventh most visited city by foreign tourists (2.6%), with a demand for educational infrastructure that accommodates 18.7% of the population. The educational infrastructure in Puno presents unique challenges due to its geographic location and climate, requiring specific solutions for energy efficiency. Institutions and organizations in several countries emphasize the importance of sustainable lighting conditions in educational buildings (Baydoğan & Özkantar, 2023). Daylighting systems provide a means to obtain optimal energy savings, which is useful for developing contemporary educational spaces (Santos, 2022). A notable example is the University of Cordoba in Spain, which implemented advanced daylighting systems to reduce energy consumption by 64% (Fernandez-Ahumada et al., 2022). Therefore, it is essential to analyze the variables that influence an educational space for reducing energy use, obtaining energy efficiency, and contributing to the environment. For this reason, it is proposed to evaluate the lighting levels and their influence on energy efficiency in the design of educational spaces located above 3800 m.a.s.l. in the Peruvian Andes through the application of a prototype system composed of reflectors and solar tubes.

## **2. MATERIALS AND METHODS**

The research follows a quantitative approach, with a prospective observational design, and uses longitudinal and analytical measurements. The study population is composed of environments with the educational architectural function of the 37 professional schools of the Universidad Nacional del Altiplano de Puno, distributed in three areas: 15 in Engineering, 8 in Biomedical, and 14 in Social, all located in the 37.30 hectares of the university campus. The samples were obtained from one representative



school for each area: The Professional School of Architecture and Urbanism (PSAU), the Professional School of Human Nutrition (PSHN), and the Professional School of Sociology (PSS), as shown in Figure 1.

The data collection points were located at UTM coordinates WGS84 Zone 19 South: Engineering (PSAU) at 8250186 m South and 391258 m East; Biomedical (PSHN) at 8250082 m South and 391061 m East; and Social (PSS) at 8250210 m South and 391398 m East. The selection of these schools was based on several criteria: the number of students enrolled, age of construction greater than 10 years, similarity in the number of floors built, and different orientations of the main façade.

The research was divided into two stages. In the first stage, the lighting levels were measured by educational space, and the energy consumption was calculated, identifying the spaces with the greatest lighting deficit and detailing the measurements via the grid method. In the second stage, a bibliometric analysis was carried out, establishing reflector systems with solar tubes as a viable alternative to improve lighting levels in spaces with the greatest lighting deficit. For this purpose, 1:5 scale models of classrooms 105 of the PSAU, 101 of the PSHN, and 203 of the PSS were built.





**Figure 1** *Locations of the university campuses and professional schools used for sampling.*

## **2.1. Verification of lighting levels in educational spaces**

The PSAU, PSS, and PSHN facilities house an average of 460 students each and have four levels. The average age of construction is 12 years, and the varied orientations of their facades were ideal for the measurements. Three categories of educational spaces were identified: classrooms, libraries, and computer laboratories, which are commonly used at the university.

In the PSAU, 17 classrooms, a library, and a computer center were identified, with 7 of these classrooms oriented with an azimuth of  $85^\circ$  and 10 classrooms oriented with an azimuth of  $175^\circ$ . The PSHN has 9 classrooms, a computer center, and a laboratory, all oriented with an azimuth of  $82^\circ$ , and 5 classrooms and a computer center oriented with an azimuth of  $170^\circ$ . The PSS has



10 classrooms, a library, and a computer center oriented with an azimuth of  $12^\circ$ , 5 classrooms, a library, and a computer center oriented with an azimuth of  $105^\circ$ . These spaces were considered for lighting evaluation.

Data were obtained via a UNI-T UT382 digital lux meter. The measurements were performed in two stages. The first stage consisted of measuring the illumination levels in the UTC-5-time period. The monitoring stations were installed at an average height of 1.10 m, corresponding to the students' viewing level, at the centers of gravity of the educational spaces of the PSAU, PSHN, and PSS. The measurements were carried out in three periods—morning (7:00 am to 9:00 am), noon (11:00 am to 1:00 pm) and night (5:00 pm to 7:00 pm) for three months: September, October and November 2023.

These data were analyzed using jamovi 2.3.28, applying descriptive statistics (frequency analysis and point estimates), identifying the energy efficiency of each educational space in terms of its monthly consumption. In addition, the data allowed the identification of environments with lower extreme values, fundamental information for the second stage. In this stage, the illuminance levels in classrooms 105 (PSAU), 101 (PSHN), and 203 (PSS) were reevaluated via the grid method according to ISO 8995, with a mean of  $K = 1.14$  for the grid nodes and 9 central measurement points. The objective was to establish the average illuminance with a contrast value of 300 lux for classrooms and 500 lux for laboratories, according to the national standard G 0.40 of the National Building Regulations in Peru, and international standards such as ISO 8995-1:2002/CIE S 008/E:2001, the Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) and the European Committee for Standardization (EN 12464-





1). The values obtained for light uniformity, measured in the morning, at noon, and at night during December 2023, were compared.

## **2.2. Prototype solar tube and fiber optic system for the design of educational spaces**

An experimental daylighting system was developed using 2" diameter PVC pipes designed with the functional characteristics of a daylighting receiver, transmitter, and diffuser. The system incorporates 2" PVC pipes with variable lengths adapted to each study module, as well as PVC elbows internally lined with aluminum foil to improve light transmission by reflection. For focused light reception, a truncated cone made of trapezoidal mirrors was used, with diameters of 3" at the widest part and 1" at the narrowest part. For optimal light transmission through the tubes, a PMMA plastic solar Fresnel lens with a focal length of 300 mm and a thickness of 2 mm was used, offering a high transmission of 92% and 3x magnification, optimizing the solar energy concentration for efficient conversion, as shown in Figure 2. The system also includes a two-axis passive solar tracker with manual position adjustment, mounted on an H-shaped metal bracket specifically designed for the Fresnel lens concentrator, with an adjustable height of 30 cm by additional strapping. The Fresnel lens was positioned on this bracket and manually adjusted to maximize its efficiency. The projection point of the light beam provided by the solar concentrator was used as the illumination terminal.

**Figure 2** *Design of the prototype reflector system with solar tubes.*



For the measurements, 1:5 scale prototypes were built of three classrooms with the greatest lighting deficiencies according to previously collected data. The prototypes were built to full scale concerning doors and windows, using MDF material and wood structure, and adapted to the following specific dimensions: classroom 105 of the PSAU, located on the first level with dimensions of  $9.10 \times 6.85$  m, as shown in Figure 3a; PSHN classroom 101, also on the first level with dimensions of  $7.75 \times 6.80$  m, as shown in Figure 3b; and PSS classroom 101, located on the second level with dimensions of  $5.60 \times 6.80$  m, as shown in Figure 3c. The prototype was installed at points with lower illumination according to the grid method, placing the Fresnel lens solar concentrator on the upper exterior part, close to the point with lower illumination and oriented to the north, defining the angle of incidence of the sun using the azimuth and elevation angles, considering the day. This concentrator focuses the scattered sunlight and directs it toward the solar dome, which acts as a receiver to enhance natural lighting through

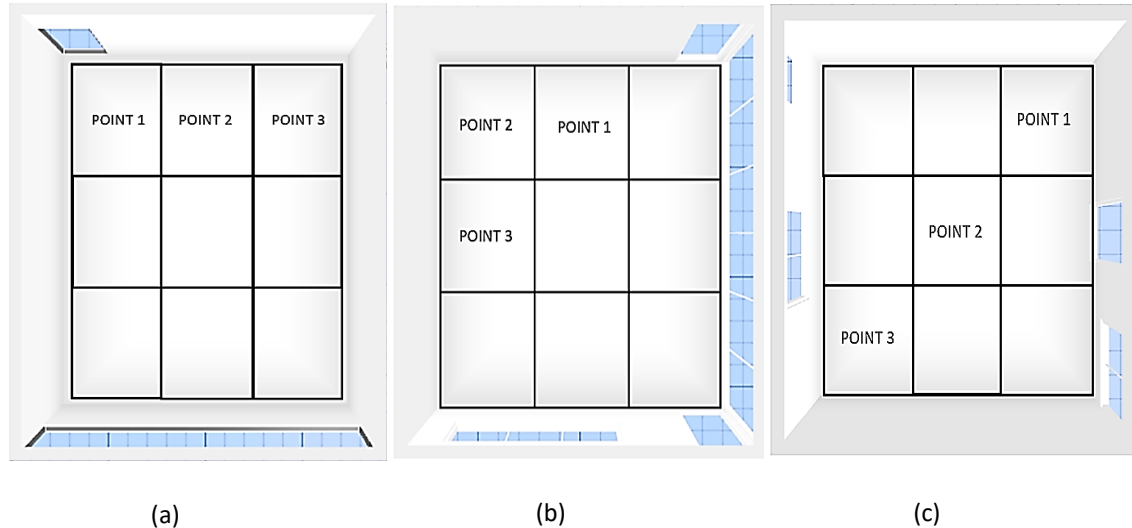


trapezoidal mirrors. The emitted daylight passes through the aluminum tubes, which are arranged vertically and horizontally, and at bends with an axial angle of incidence, the light rays pass directly along the tube without interreflecting with the inner surface of the tube, contributing to the efficiency of light transmission. Finally, the light reaches the diffuser in the form of a ring or soffit, distributing the illumination uniformly in the environment.

The statistical software Jamovi, version 2.3.28, was used to conduct the inferential analysis of the data. First, the Kolmogorov-Smirnov normality test was applied, which yielded a P-value greater than 0.05. This result indicates that the lighting data follow a normal distribution, allowing the use of parametric tests for comparative analysis. Subsequently, an independent samples t-test was conducted to assess the differences in lighting levels between the control and experimental groups. The results of this test showed a P-value less than 0.05, indicating the presence of a statistically significant difference between the two groups. Specifically, it was observed that the environments with higher lighting deficits experienced a significant increase in lighting levels in the experimental group following the intervention, in contrast to the control group, which received no modification.

### Figure 3

*Samples with higher luminance deficits: (a) classroom 105 PSAU, (b) classroom 101 PSHN, (c) classroom 203 PSS.*



### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In the analysis of illuminance levels in the classrooms of different projective entities (PSAU, PSHN, PSS) in the city of Puno, Peru, located at more than 3800 m.a.s.l., significant variations were observed between floors and periods of the day. In the PSAU, floors 1 and 2 presented insufficient illumination levels during the morning (288.34 and 286.00 lux, respectively) and night (311.74 and 308.86 lux), whereas floor 3 presented adequate levels in all periods, especially in the morning (664.55 lux) and at noon (634.85 lux). In the PSHN, high illuminance was highlighted on floor 1 during the morning (717.55 lux) and evening (1021.22 lux), but it noticeably decreased at midday (299.85 lux). The PSS showed a more consistent performance, with adequate levels on all floors and during all periods, with floor 3 standing out at night (930.78 lux). However, despite some high values, many classrooms did not consistently meet the international standard of 300 and 500 lux, especially at night and on the lower floors.

These results highlight the need to improve the lighting infrastructure to ensure an optimal and compliant study environment, particularly in high-altitude regions where the quality of natural lighting can be affected by climatic and geographic conditions.

### 3.1. Lighting levels in educational spaces

The illuminance levels in professional schools PSAU, PSHN, PSS were evaluated. The study was carried out considering various lighting standards, including the Technical Standard G.050 of the Peruvian national building regulations, ISO 8995-1:2002, the Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), and the European standard EN 12464-1. These standards establish minimum lighting requirements for different types of educational spaces, requiring a minimum of 300 lux for general classrooms and 500 lux for specific areas such as laboratories, the results of which are shown in Table 1.

**Table 1** *Results of national and international regulatory compliance in the PSAU, PSHN and PSS educational spaces.*

P. S	Floor	Period	G.050	ISO 8995 <sup>a</sup>	ISO 8995 <sup>b</sup>	IESNA <sup>a</sup>	IESNA <sup>b</sup>	EN 12464-1 <sup>a</sup>	EN 12464-1 <sup>b</sup>
PSAU	1	morning	No	No	No	No	No	No	No
	1	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	1	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	2	morning	No	No	No	No	No	No	No
	2	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	2	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	3	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	3	midday	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	3	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	4	morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	4	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	4	night	No	No	No	No	No	No	No
PSHN	1	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	1	midday	No	No	No	No	No	No	No
	1	night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	2	morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	2	midday	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	2	night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	3	morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
	3	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No



	3	night	No	No	No	No	No	No
	2	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	2	midday	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	2	night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	3	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
PSS	3	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
	3	night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	4	morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
	4	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
	4	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes

Source: elaborated by the authors.

(a) Comparison with 300 lux for classrooms, (b) comparison with 500 lux for laboratories.

Table 1 shows that compliance with lighting regulations varies significantly across professional schools and floors. Overall, the PSAU has poor compliance, especially on floors 1 and 2, where illuminance levels do not reach the 500 lux recommended by international standards in any period. PSHN performs better on floors 1 and 2, especially during the night, but still does not consistently meet 500 lux at midday. The PSS stands out for its high compliance, particularly on floors 2 and 3, although floor 4 does not meet 500 lux in any period.

These findings underscore the need to improve the lighting infrastructure in classrooms, especially for floors and periods where lighting levels are insufficient to meet international standards. This is crucial to ensure an optimal and adequate study environment in Puno, a high-altitude region where geographical conditions can affect the quality of natural lighting. The implementation of lighting improvements will contribute to improved academic performance and the well-being of students and educational staff.

The evaluation of illuminance levels, presented in Table 1, reveals that the spaces with the highest lighting deficiency are located in classrooms 105 of the Professional School of Architecture and Urbanism (PSAU), 101 of the Professional School of Human Nutrition (PSHN) and 203 of the Professional School of Sociology (PSS). These spaces require further analysis because of their



consistently low illuminance levels, which do not meet the 500 lux standard recommended by international standards at any period of the day. A thorough analysis of these spaces is crucial to implement effective improvements to the lighting infrastructure and ensure an adequate and compliant study environment.

The electricity consumption and costs associated with lighting in different spaces within three educational institutions are as follows: the PSAU, PSHN, and PSS. At PSAU, the classrooms under evaluation use panels of 60x60 cm and 4x18 W fluorescent tubes, operating for an average of 12 hours a day. With a total of 12 classrooms, a daily consumption of 11,520 Wh is recorded, equivalent to a monthly consumption of approximately 230.4 kWh, generating an estimated cost of 2,245.3 nuevos soles per month. In addition, other spaces, such as conventional classrooms, libraries, and computer areas, contribute significantly to total consumption, reaching a combined monthly consumption of 112,320 Wh (2246.4 kWh) with a cost of 2246.4 nuevos soles.

At PSHN, the classrooms evaluated also employ similar fluorescent tube panels, with a daily usage schedule of 12 hours and a daily consumption of 10,560 Wh. With 11 classrooms in total, monthly consumption amounts to 211.2 kWh, with an estimated cost of 1,498.6 nuevos soles. Other spaces, such as conventional classrooms and computers, contribute to a total monthly consumption of 75,040 Wh (1500.8 kWh), with an additional cost of 1500.8 nuevos soles.

On the other hand, in the PSS, the classrooms evaluated use higher -power fluorescent tube grids, operate for 10 hours a day and register a daily consumption of 6,400 Wh. With 8 classrooms in total, monthly consumption is estimated at 128 kWh, generating a monthly cost of 1,215.3 nuevos soles. The remaining areas,



including standard classrooms and libraries, contribute to a total monthly consumption of 60,800 Wh (1216 kWh) and a cost of 1216 nuevos soles.

The analysis of the energy efficiency of the luminaires in the educational spaces of the university campus of UNA, Puno, revealed significant variations among the different professional schools. Energy efficiency was calculated via the relationships among the power watts, the hours of daily use, and the electrical consumption of each luminaire. The results indicate that the School of Nutrition (classroom on the second floor) has the highest energy efficiency, with a value of 0.10, whereas the School of Architecture (classrooms on the 1st, 2nd, 3rd, and 4th floors) has the lowest energy efficiency, with a value of 0.0093. The mathematical relationship allows the efficiency to be determined by considering both the power and time of use, as well as the intrinsic efficiency of the luminaire.

The monthly energy consumption and associated annual costs were calculated for each professional school. The Professional School of Architecture and Urbanism (PSAU) showed a total monthly energy consumption of 2182.64 kWh, resulting in an annual lighting cost of 80,830.8 S/. The Professional School of Human Nutrition (PSHN) recorded a monthly consumption of 1515.68 kWh, with an annual cost of 53,949.6 S/. Finally, the Professional School of Sociology (PSS) had a monthly consumption of 288 kWh, which translates into an annual cost of 43,750.8 S/. These projections indicate a total monthly energy cost of S/. 80,830.8

### **3.2 Grid analysis of classrooms 105 at PSAU, 101 at PSHN and 203 at PSS**

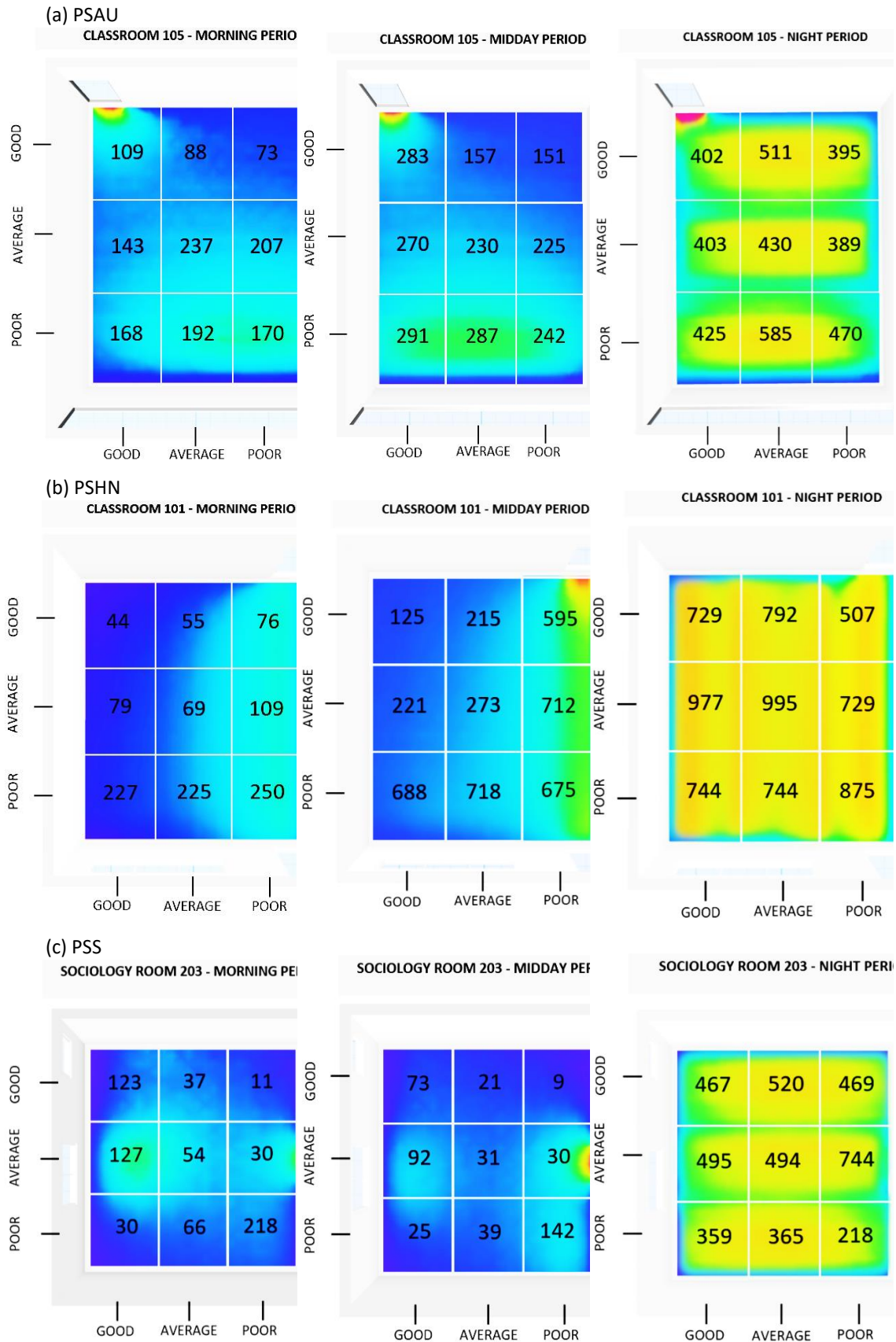
In the analysis of lighting levels via the grid method in classrooms 105 from the PSAU, 101 from the PSHN, and 203 from the PSS, updated sketches and plans were used to identify the sampling points, which were distributed in grids to





evaluate uniform lighting levels. The dimensions of the study area in the PSAU were 6.80 m in width, 5.60 m in length, and a mounting height of 2.70 m. The lighting measurements taken at the center of each grid yielded the following average illuminance ( $E_m$ ) values in lux and the minimum required illuminance ( $E_{min}$ ). In the morning, the average illuminance value was 63.6 lux, and the minimum value was 31.8 lux, failing to meet the regulatory requirements. At midday, the average value was 51.33 lux, and the minimum value was 25.67 lux, which also failed to meet the requirements. However, at night, the values improved significantly, with an average of 467 lux and a minimum of 233.5 lux, meeting the requirements. The lighting uniformity was below the minimum requirement in the morning and midday shifts but was adequate in the night shift, as shown in Figure 3a.

In Classrooms 101 of the Professional School of Human Nutrition, data were collected at three-time intervals. The dimensions of the study area were 6.80 m in width, 7.75 m in length, and a mounting height of 2.70 m. The lighting measurements yielded the following results: in the morning, the average illuminance values were 126 lux, and the minimum values were 63 lux, failing to meet the requirements. At midday, the values improved considerably, with an average of 491.3 lux and a minimum of 245.65 lux, meeting the regulatory requirements. At night, the illuminance values were even higher, with an average of 788 lux and a minimum of 394 lux, meeting the requirements. The lighting uniformity was insufficient during the morning shift but adequate during the midday and night shifts.



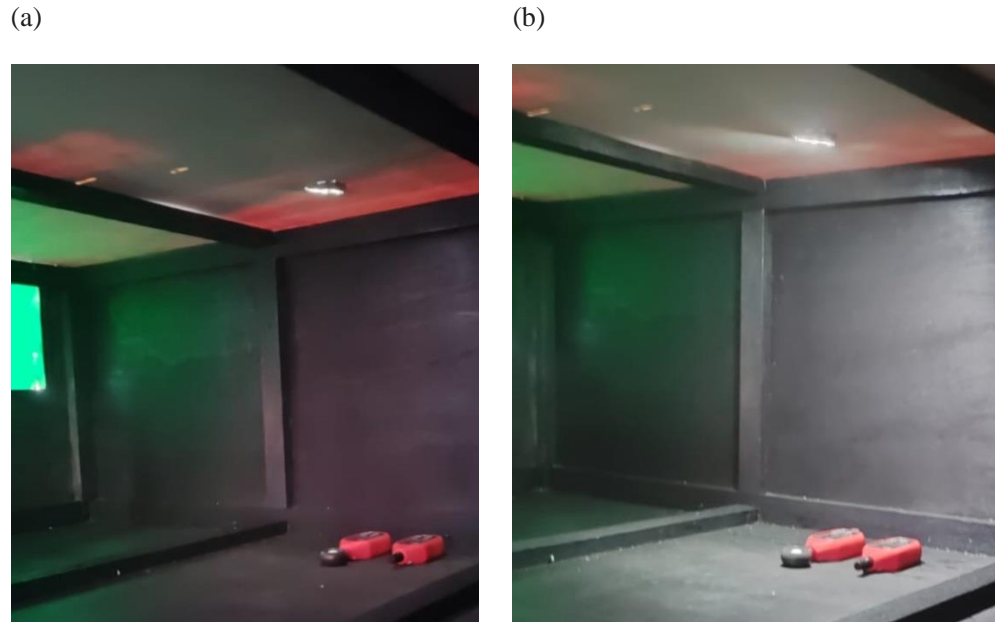
**Figure 4** Analysis of Lighting Uniformity in Classrooms 105 of PSAU, 101 of PSHN, and 203 of PSS



A comparative analysis of the three professional schools revealed that classrooms 105 in the PSAU, 101 in the PSHN, and 203 in the PSS presented significant deficiencies in terms of lighting levels, especially during the morning and midday periods. These results underscore the need for a comprehensive review and improvement in the design and distribution of lighting to meet established quality standards and provide an optimal environment for academic performance. Improving the lighting infrastructure is crucial to ensure that illuminance levels consistently meet regulatory requirements and to enhance the study environment for students and educational staff.

### **3.3 Prototype of the Solar Tube and Fiber Optic System for the Design of Educational Spaces**

The results in Table 2 show significant differences in illuminance levels between the control and experimental groups across all periods of the day (morning, midday, and night). In the Professional School of Architecture and Urbanism (PSAU), the lighting levels without the prototype were low, as shown in Figure 4a, with an average of 7.42 lux in the morning at point 1, increasing to 15.03 lux at point 2 and 8.31 lux at point 3. With the prototype, as shown in Figure 4b, these levels increased significantly to 317.21 lux, 231.38 lux, and 196.66 lux, respectively.



**Figure 5** Scale model measurements of the (a) control group and (b) experimental group.

**Table 2** Comparative results with the installation of the solar tube prototype in 1:5 scale models.

Period	Muestra	PSAU		PSHN		PSS	
		CG <sup>a</sup>	EG <sup>b</sup>	CG <sup>a</sup>	EG <sup>b</sup>	CG <sup>a</sup>	EG <sup>b</sup>
Morning	P1	7.42	317.21	11.82	119.50	14.33	918.46
	P2	15.03	231.38	7.85	278.11	11.01	280.29
	P3	8.31	196.66	27.18	312.19	18.59	155.62
Midday	P1	14.78	396.47	21.35	231.22	30.66	229.06
	P2	11.14	300.29	35.58	380.08	17.12	321.45
	P3	7.67	388.97	24.87	474.49	12.82	228.49
Night	P1	79.79	387.81	26.55	320.84	13.05	331.22
	P2	73.44	478.06	35.39	261.01	22.42	336.48
	P3	65.58	459.41	37.50	349.58	17.30	287.73

Source: prepared by the authors.

(a) Control group, (b) Experimental group

The results obtained in the professional schools of the Universidad Nacional del Altiplano de Puno demonstrate the significant effectiveness of solar tubes as a natural lighting system. The lighting levels achieved in the Professional School of Architecture and Urbanism (EPAU) at 350.70 lux, the Professional School of Human Nutrition (EPNH) at 303.00 lux, and the Professional School of



Sociology (EPS) at 343.20 lux, confirm the ability of these systems to provide adequate lighting in educational spaces. These findings align with recent research supporting the effectiveness of tubular daylighting devices (TDDs) for illuminating indoor spaces (Fernandes et al., 2023). Furthermore, the observed effectiveness is in line with previous studies that have shown that glass-domed systems are particularly efficient in educational spaces, especially during winter months (Sibley et al., 2020).

In terms of economic efficiency, the implementation of the system has shown substantial benefits at all three vocational schools. At EPAU, monthly savings reach 648.67 soles, at EPNH a savings of 432.95 soles, and at EPS a savings of 351.10 soles, representing an average reduction of 28.89% in operating costs. This optimization of energy consumption and the consequent reduction in costs is in line with the findings of similar research in other institutions (Garcia-Fernandez et al., 2023). However, it is important to consider that, as pointed out by some researchers, the widespread implementation of these systems faces significant challenges, mainly related to initial costs and variability in their efficiency (El-saggan et al., 2023). From a technical perspective, recent research suggests possible improvements in system efficiency through the incorporation of specific technologies. For example, the use of Fresnel lenses as a concentrating medium has demonstrated significant advantages in terms of photometric simplicity and cost-effectiveness (Upadhyay et al., 2024). This information is valuable for future optimizations of the system implemented at the three professional schools studied.

The results observed at EPAU, EPNH, and EPS have implications beyond energy and economic savings. Improved lighting levels contribute directly to the



creation of a more comfortable and efficient learning environment, which can have a positive impact on student academic performance. This aspect is supported by research highlighting the importance of natural lighting in work and study spaces (Fernandes et al., 2023). Furthermore, the significant reduction in energy consumption demonstrates the potential of these systems to contribute to environmental sustainability in educational buildings, an increasingly crucial aspect in the current context.

However, it is important to consider the limitations and challenges identified in recent research. El-saggan et al. (2023) point out that, despite the demonstrated potential to improve sustainability in lighting, there are significant barriers to be addressed, such as high implementation costs and variations in efficiency depending on specific environmental conditions. These aspects must be considered in planning future implementations and developing strategies to optimize long-term performance at the three vocational schools.

Overall, the implementation of solar tubes at EPAU, EPNH, and EPS proves to be an effective solution that balances lighting needs with energy efficiency. The positive results in terms of economic savings and improved lighting, supported by recent international literature, suggest that this technology represents a viable investment for educational institutions, especially when considering the long-term benefits in terms of sustainability and user comfort. The evidence accumulated both in this study and in the existing literature points to the importance of continuing to research and optimize these systems to maximize their efficiency and overcome current limitations.



#### 4. CONCLUSIONS

The lighting levels in the educational spaces of UNA-Puno show significant deficiencies that impact energy efficiency and occupant comfort. The data obtained show that classrooms on the lower floors have insufficient lighting levels. The analysis of energy consumption and associated costs revealed significant variations in consumption levels and associated costs. The average monthly consumption of the three schools is approximately 1328.77 kWh, with an average monthly cost of 4959.2 soles and an average annual cost of 59510.4 soles.

The implementation of the natural lighting prototype based on solar tubes proved to be an effective solution to improve lighting levels in classrooms with the greatest lighting deficit. The experimental results indicated a significant increase in lighting levels, reaching and exceeding the recommended standards, which could lead to a reduction in electricity consumption due to a lower need for artificial lighting.

It is essential to consider adopting these technologies in the design and renovation of educational infrastructures, especially in regions with challenging geographical and climatic conditions, such as Puno. Additionally, further studies are suggested to evaluate the long-term impact of these interventions and explore other sustainable lighting technologies that can complement existing systems. Integrating natural lighting solutions into the architectural design of educational buildings is crucial for achieving sustainable and energy-efficient spaces, significantly improving the quality of the learning environment and reducing the operating costs associated with energy consumption. This strategy not only optimizes energy efficiency but also contributes to better academic performance and the well-being of students and educational staff.

#### **Ethical considerations**

Not applicable





### **Conflict of interest**

The authors declare no conflicts of interest.

### **Funding**

This research did not receive any financial support.

## **5. REFERENCES**

- Arvizu-Piña, V. A., Armendáriz López, J. F., García González, A. A., & Barrera Alarcón, I. G. (2023). *An open access online tool for LCA in building's early design stage in the Latin American context. A screening LCA case study for a bioclimatic building.* Energy and Buildings, 295(113269), 113269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113269>
- Baydoğan, M. Ç., & Özkantar, V. (2023). *Evaluation of daylight performance metrics according to country guidelines: The case of educational buildings in Turkey.* Energy and Buildings, 297(113487), 113487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113487>
- Bosu, I., Mahmoud, H., Ookawara, S., & Hassan, H. (2023). *Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review.* Solar Energy (Phoenix, Ariz.), 259, 188–228. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.006>
- Budhiyanto, A., & Chiou, Y.-S. (2024). *Visual comfort and energy savings in classrooms using surveillance camera derived HDR images for lighting and daylighting control system.* Journal of Building Engineering, 86(108841), 108841. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108841>
- Cloete, S., Arnaiz del Pozo, C., Cloete, J. H., & Jiménez Álvaro, Á. (2023). *The future of fuels: Uncertainty quantification study of mid-century ammonia and methanol production costs.* Energy Conversion and Management, 297(117701), 117701. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117701>
- Degefu, M. A., & Kifle, F. (2024). *Impacts of climate variability on the vegetable production of urban farmers in the Addis Ababa metropolitan area: Nexus of climate-smart agricultural technologies.* Climate Services, 33(100430), 100430. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100430>





- El-Saggan, M. E., Abdelrahman, A. R., Aissa, W. A., & Reda, A. M. A. (2023). *A review of the evolution of daylighting applications and systems over time for green buildings*. *International Journal of Applied Energy Systems*, 5(2), 31–47. [https://ijaes.journals.ekb.eg/article\\_292026.html](https://ijaes.journals.ekb.eg/article_292026.html)
- Fernandes, L. L., & Regnier, C. M. (2023). *Lighting and visual comfort performance of commercially available tubular daylight devices*. *Solar Energy*, 251, 420–437. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.022>
- Fernández-Ahumada, L. M., Osuna-Mérida, M., López-Sánchez, J., Gómez-Uceda, F. J., López-Luque, R., & Varo-Martínez, M. (2022). *Use of polar heliostats to improve levels of natural lighting inside buildings with little access to sunlight*. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(16), 5996. <https://doi.org/10.3390/s22165996>
- Galeano, S. E. A., & Betanco, J. A. (2021). *Eficiencia energética: una tarea para las universidades*. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 166-177. <https://www.lamjol.info/index.php/FAREM/article/view/11617/13480>
- García-Fernández, B., & Omar, O. (2023). *Integrated innovative solar lighting system for optimization of daylight utilization for public library in Alexandria, Egypt*. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(1), 101819. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101819>
- Hota, S. P. (2023). *Education infrastructure, expenditure, enrollment & economic development in Odisha, India*. *International Journal of Educational Development*, 103(102903), 102903. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2023.102903>
- Inchuña, J. N. B., Calisaya Rojas, L. C., & Mamani, G. M. (2024). *Designing resilient bicycle paths in Puno, Peru: Combating urban CO<sub>2</sub> emissions with GIS analysis*. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 11(5), 96-102. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2024.05.010>
- Kartal, M. T., Magazzino, C., & Pata, U. K. (2024). *Marginal effect of electricity generation on CO<sub>2</sub> emissions: Disaggregated level evidence from China by KRLS method and high-frequency daily data*. *Energy Strategy Reviews*, 53(101382), 101382. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101382>
- Mazzeo, D., Leva, S., Matera, N., Kontoleon, K. J., Saboor, S., Pirouz, B., & Elkadeem, M. R. (2023). *A user-friendly and accurate machine learning tool for the evaluation of the worldwide yearly photovoltaic electricity production*. *Energy Reports*, 9, 6267–6294. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.221>



- Moazzen, N., Karagüler, M. E., & Ashrafian, T. (2021). *Comprehensive parameters for the definition of nearly zero energy and cost optimal levels considering the life cycle energy and thermal comfort of school buildings*. *Energy and Buildings*, 253(111487), 111487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111487>
- Ocaña Miguel, A. (2022). *Análisis teórico-experimental de eficiencia energética en infraestructuras urbanas*. UMA Editorial. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/25437>
- Pourasl, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023). *Solar energy status in the world: A comprehensive review*. *Energy Reports*, 10, 3474–3493. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>
- Ramos, I. S., Grau, J. F. R., Garrido, F. M., & Martín, D. M. (2022). *Energy and comfort. The historical evolution of the façade in Western Architecture*. *VLC Arquitectura Research Journal*, 9(2), 179–200. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8669003>
- Re, M. G., & Bianchi, M. F. (2020). *Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética en edificios escolares existentes*. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente; *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 45, 7. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/156390>
- Sánchez, O., & David, R. (2022). *Evolución urbana sostenible a través de las instalaciones de iluminación*. UMA Editorial. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/25446>
- Santos, M. D. V. (2022). *Los espacios educativos y su relación comunitaria en Quebrada Verde Pachacamac, Lima, Perú: un análisis sobre la calidad*. *REVISTA NODO*, 16(32), 74–97. <https://doi.org/10.54104/nodo.v16n32.1353>
- Sibley, M., & Peña-García, A. (2020). *¿Vidrio plano o abertura de cúpula de cristal? Un análisis comparativo de un año de duración del rendimiento de los conductos de luz en entornos residenciales reales y condiciones climáticas*. *Sustainability*, 12(9), 3858. <https://doi.org/10.3390/su12093858>
- Upadhyay, P., Kuchhal, P., & Mondal, S. (2024). *A review of the use of different technologies/methods for the transmission of solar radiation for lighting purposes using optical fibers*. *Renewable Energy Focus*, 50, 100614. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100614>



- Usta, P., & Zengin, B. (2021). *Energy assessment of different building materials in the education building*. *Energy Reports*, 7, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.126>
- Vaisi, S., Firouzi, M., & Varmazyari, P. (2022). *Energy benchmarking for secondary school buildings, applying the Top-Down approach*. *Energy and Buildings*, 279(112689), 112689. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112689>
- Wang, B., Zhang, X., Zhang, M., Cui, Y., & He, Y. (2024). *Development of novel variable building skin with solar concentrating technology for obtaining energy benefits and optimizing indoor daylighting*. *Energy and Buildings*, 310(114081), 114081. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114081>
- Zhang, M., Gao, X., Luo, Q., Lin, S., Lyu, M., Luo, X., Ke, C., & You, W. (2024). *Risk assessment of persistent exposure to artificial light at night revealed altered behavior and metabolic patterns of marine nocturnal shellfish*. *Ecological Indicators*, 160(111807), 111807. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111807>
- Zhang, Y., Chen, W., Yang, H., & Wang, H. (2024). *Renewable energy input strategy considering different electricity price regulation policies*. *Computers & Industrial Engineering*, 190(110092), 110092. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110092>



## ANEXOS

### ANEXOS 1: INFORMACIÓN DE LA REVISTA

Multidisciplinary Science Journal (ISSN 2675-1240). La revista está dirigida a científicos, investigadores y académicos que buscan compartir y difundir sus trabajos. Esta revista es indexada en bases de datos académicas de renombre como Scopus, Google Scholar, Dimensions, Latindex, CiteFactor, Scilit, Diadorim, Directorio de Indexación de Revistas de Investigación, CrossRef, Research Bible, entre otras, lo que le otorga prestigio y visibilidad internacional en la comunidad científica. Siendo evaluados para indexación en Web of Science (Clarivate Analytics) y CAB International.

<https://www.scopus.com/sourceid/21101133576>



Scopus Preview

## Source details

### Multidisciplinary Science Journal

Years currently covered by Scopus: from 2019 to 2025

Publisher: Malque Publishing

E-ISSN: 2675-1240

Subject area: Multidisciplinary

Source type: Journal

[View all documents >](#)

[Set document alert](#)

[Save to source list](#)

CiteScore 2023

0.1

SJR 2023

0.103

SNIP 2023

0.005

[CiteScore](#) [CiteScore rank & trend](#) [Scopus content coverage](#)

CiteScore 2023

$$0.1 = \frac{27 \text{ Citations } 2020 - 2023}{233 \text{ Documents } 2020 - 2023}$$

Calculated on 05 May, 2024

CiteScoreTracker 2024

$$0.4 = \frac{268 \text{ Citations to date}}{696 \text{ Documents to date}}$$

Last updated on 05 November, 2024 • Updated monthly

CiteScore rank 2023

Category	Rank	Percentile
Multidisciplinary	#164/171	4th



## ANEXOS 2: TRADUCCIÓN AL ESPAÑOL

### **Evaluación de factores lumínicos que influyen en la eficiencia energética para el diseño de espacios educativos del campus universitario de la UNA, Puno.**

**Kathy Deisy Machaca Gutierrez<sup>a</sup>   | Dayana Priscila Apaza Salgado<sup>a</sup>  | Grover Marín**

**Mamani<sup>a</sup> **

<sup>a</sup> *Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo, Perú.*

#### **Resumen**

La eficiencia energética en edificios educativos de nivel superior es crucial para reducir el consumo energético. El campus de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú, enfrenta desafíos únicos debido a su ubicación geográfica a más de 3800 msnm y su posición en el hemisferio sur, donde la iluminación es un desafío para las edificaciones. Este estudio evaluó la eficiencia lumínica y energética en espacios educativos mediante un prototipo de sistema con reflectores y tubo solar. Se midieron los niveles de iluminación en tres escuelas profesionales utilizando un luxómetro digital en diferentes periodos del día. Además, se desarrolló un prototipo experimental de iluminación natural basado en tubos solares. evaluándose su efectividad en aulas seleccionadas con déficit lumínico. Se demostró diferencias significativas en los niveles de iluminación en las aulas, especialmente en los pisos inferiores, donde los niveles de iluminancia no alcanzaron los 300 lux recomendados para aulas generales ni los 500 lux para laboratorios, en el aula 105 de la Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo, aula 101 de la Escuela Profesional de Nutrición Humana y el aula 203 de la Escuela Profesional de Sociología, los niveles de iluminancia estuvieron muy por debajo de los estándares requeridos. La implementación del prototipo de tubos solares aumentó significativamente los niveles de iluminancia en estos ambientes. Estos aumentos notables mejoraron el confort lumínico de las aulas, alcanzando y superando los estándares internacionales. Asimismo, se destaca la importancia de integrar soluciones de



iluminación natural en el diseño arquitectónico de edificios educativos. Se recomienda la adopción de estas tecnologías en regiones con condiciones geográficas y climáticas similares a Puno. La implementación de tecnologías de iluminación natural, como los tubos solares, es una estrategia efectiva para mejorar la calidad del ambiente de aprendizaje en edificios educativos.

**Palabras clave:** Déficit lumínico, Iluminación natural, Modelo a escala, Tubos solares.

## 1. INTRODUCCIÓN

La demanda mundial de electricidad creció un 2% en 2022 y se espera que crezca un 3% en los próximos tres años, distribuyéndose un 20% del uso eléctrico en el planeta a la iluminación (Sánchez & David, 2022; Zhang et al., 2024). Según los datos históricos, esta tendencia se ha mantenido constante en la última década, con variaciones menores debido a factores económicos y tecnológicos (Kartal et al., 2024). Actualmente, la producción de electricidad en su mayor parte se abastece por combustibles procedentes de hidrocarburos en un 74%, lo que es insostenible a largo plazo y afecta negativamente al medio ambiente (Ocaña, 2022; Cloete et al., 2023). Este impacto incluye emisiones significativas de CO<sub>2</sub>, contribuyendo al cambio climático y la contaminación del aire (Inchuña et al., 2024). Para 2040, se espera que el consumo de energía en el mundo incremente un 30%, y se prevé que un 37% de la generación eléctrica provenga de fuentes renovables, particularmente, generación eólica y solar (Ramos et al., 2022; Pourasl et al., 2023).

El aumento del uso de iluminación artificial afecta las emisiones en una red energética sin una visión más integral, lo que repercute negativamente en la economía, la salud, el paisaje, etc. (Vaisi et al., 2022). Estudios específicos han demostrado que la luz artificial nocturna puede alterar los ecosistemas, afectar los patrones de sueño humano y



aumentar el consumo energético (Zhang et al., 2024). Para mitigar los efectos negativos producidos por el consumo de energía, se buscan estrategias basadas en la arquitectura para aprovechar de forma inteligente los recursos naturales disponibles y así lograr un ambiente interior confortable y sostenible (Arvizu-Piña et al., 2023). Ejemplos exitosos incluyen el uso de tragaluces, fachadas ventiladas y materiales reflectantes que maximizan la luz natural (Bosu et al., 2023). La eficiencia energética implica la obtención de bienes y servicios energéticos con una disminución en la generación de emisiones y una mejora en la calidad de los espacios interiores, alargando la vida de los recursos (Re & Bianchi, 2020). Una baja incidencia de iluminación natural en espacios donde se desarrollan actividades implica una mayor necesidad de iluminación artificial y, por ende, mayor consumo energético para el edificio. Por ejemplo, estudios han mostrado que una reducción del 50% en la iluminación natural puede aumentar el consumo de electricidad en un 20% (Budhiyanto & Chiou, 2024). La iluminación natural contribuye a la eficiencia energética del sector residencial y mejora la salud y habitabilidad del espacio. Se ha demostrado que la exposición a la luz natural reduce el estrés y mejora el bienestar general de los ocupantes (Wang et al., 2024). Debido a la creciente necesidad de ahorro de energía eléctrica, la iluminación natural cobra cada vez mayor importancia en la edificación. Diversas estrategias lumínicas podrían permitir prescindir de luz artificial en determinados momentos, optimizando así el consumo energético (Moazzen et al., 2021). Diversos estudios demuestran que el uso de estrategias y sistemas de iluminación natural minimiza las pérdidas y usa la energía de manera más eficiente, incrementando así el confort de los ocupantes (Usta & Zengin, 2021). La implementación de medidas de eficiencia y ahorro energético en edificaciones es fundamental; sin embargo, los sistemas de iluminación natural dependerán de la latitud, la meteorología, la época del año y el momento del día, pudiendo ser predecibles o muy impredecibles (Galeano & Betanco,





2021). Por ejemplo, en regiones con alta variabilidad climática, la eficiencia de estos sistemas puede fluctuar significativamente (Degefu & Kifle, 2024).

Nuestra investigación se centra en la Ciudad de Puno, enfocada en el campus universitario de la UNA-Puno, debido a la demanda creciente de infraestructura educativa. El departamento de Puno está ubicado al extremo sureste del Perú, entre los 13°00'00" y 17°17'30" de latitud sur y los 71°06'57" y 68°48'46" de longitud oeste; cuenta con una extensión territorial de 71,999.0 km<sup>2</sup>. Puno tiene el puerto lacustre más importante del Perú y es la séptima ciudad más visitada por los turistas extranjeros (2.6%), con una demanda de infraestructura educativa que alberga al 18.7% de la población. La infraestructura educativa en Puno presenta desafíos únicos debido a su ubicación geográfica y clima, lo que requiere soluciones específicas para la eficiencia energética. Instituciones y organizaciones en varios países enfatizan la importancia de condiciones de iluminación sostenibles en los edificios educativos (Baydoğan & Özkantar, 2023). Los sistemas de luz natural proporcionan un medio para obtener un aprovechamiento óptimo del ahorro energético, siendo útiles para desarrollar espacios educativos contemporáneos (Santos, 2022). Un ejemplo notable es la Universidad de Córdoba de España, que implementó sistemas avanzados de iluminación natural, logrando reducir el consumo energético en un 64% (Fernández-Ahumada et al., 2022). Por ello, es fundamental analizar las variables que influyen en un espacio educativo para la reducción del uso de energía, obteniendo eficiencia energética y contribuyendo al medio ambiente. Por tal motivo se propone evaluar los niveles lumínicos y su influencia en la eficiencia energética en el diseño de espacios educativos ubicados sobre los 3800 m.s.n.m. en los Andes peruanos, mediante la aplicación de un prototipo de sistema compuesto por reflectores y tubo solar.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación sigue un enfoque cuantitativo, con un diseño observacional prospectivo, empleando mediciones longitudinales y analíticas. La población del estudio está compuesta por ambientes con función arquitectónica educativa de las 37 Escuelas Profesionales de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, distribuidas en tres áreas: 15 en Ingenierías, 8 en Biomédicas y 14 en Sociales, todas ubicadas en las 37.30 hectáreas del campus universitario. Las muestras fueron obtenidas de una escuela representativa por cada área: la Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo (EPAU), la Escuela Profesional de Nutrición Humana (EPNH) y la Escuela Profesional de Sociología (EPS), como se muestra en la Figura 1.

Los puntos de recolección de datos se ubicaron en las coordenadas UTM WGS84 zona 19 Sur: para Ingenierías (EPAU) en 8250186 m Sur y 391258 m Este; para Biomédicas (EPNH) en 8250082 m Sur y 391061 m Este; y para Sociales (EPS) en 8250210 m Sur y 391398 m Este. La selección de estas escuelas se basó en varios criterios: la cantidad de alumnos matriculados, una antigüedad de construcción mayor a 10 años, similitud en el número de pisos construidos y diferentes orientaciones de la fachada principal.

La investigación se dividió en dos etapas. En la primera etapa, se midieron los niveles de iluminación puntual por espacio educativo y se calculó el consumo energético, identificando los espacios con mayor déficit lumínico y detallando las mediciones mediante el método de la grilla. En la segunda etapa, se realizó un análisis bibliométrico, estableciendo los sistemas de reflectores con tubos solares como la alternativa viable para mejorar los niveles de iluminación en los espacios con mayor déficit lumínico. Para esto, se construyeron modelos a escala 1:5 de las aulas 105 de la EPAU, 101 de la EPNH y 203 de la EPS.



**Figura 1** Ubicación del campus universitario y Escuelas Profesionales del muestreo.

### **2.1. Verificación de niveles de iluminación en espacios educativos**

Las instalaciones de la EPAU, EPS y EPNH albergan un promedio de 460 estudiantes cada una y cuentan con cuatro niveles. La antigüedad promedio de construcción es de 12 años, y la variada orientación de sus fachadas resultó ideal para las mediciones. Se identificaron tres categorías de espacios educativos: aulas pedagógicas, bibliotecas y laboratorios de cómputo, los cuales son de uso común en la universidad.

En la EPAU se identificaron 17 aulas, una biblioteca y un centro de cómputo, con 7 de estas aulas orientadas con un azimut de  $85^\circ$  y 10 aulas orientadas con un azimut de  $175^\circ$ . La EPNH cuenta con 9 aulas, un centro de cómputo y un laboratorio, todos orientados con un azimut de  $82^\circ$ , y 5 aulas y un centro de cómputo orientados con un azimut de  $170^\circ$ . La EPS tiene 10 aulas, una biblioteca y un centro de cómputo orientados con un azimut de  $12^\circ$ , y 5 aulas, una



biblioteca y un centro de cómputo orientados con un azimut de 105°. Estos espacios fueron considerados para su evaluación lumínica.

Los datos se obtuvieron utilizando un Luxómetro Digital UNI-T UT382. Las mediciones se realizaron en dos etapas. La primera etapa consistió en medir los niveles de iluminación en la zona horaria UTC-5. Las estaciones de monitoreo se instalaron a una altura promedio de 1.10 metros, correspondiente al nivel de visión de los estudiantes, en los centros de gravedad de los espacios educativos de la EPAU, EPNH y EPS. Las mediciones se llevaron a cabo en tres periodos: mañana (7:00 a 9:00 horas), mediodía (11:00 a 13:00 horas) y noche (17:00 a 19:00 horas), durante tres meses: septiembre, octubre y noviembre de 2023.

Estos datos fueron analizados mediante el jamovi 2.3.28, aplicando estadística descriptiva (análisis de frecuencias y estimaciones puntuales), identificando la eficiencia energética de cada espacio educativo en relación con su consumo mensual. Además, los datos permitieron identificar los ambientes con valores extremos inferiores, información fundamental para la segunda etapa. En esta etapa, se reevaluaron los niveles de iluminación en el aula 105 (EPAU), aula 101 (EPNH) y aula 203 (EPS) utilizando el método de la grilla según la norma ISO 8995, con una media de  $K = 1.14$  para los nodos de la grilla y 9 puntos centrales de medición. El objetivo fue establecer la iluminancia promedio con un valor de contraste de 300 lux para aulas y 500 lux para laboratorios, conforme a la norma nacional G 0.40 del Reglamento Nacional de Edificaciones en Perú, y normas internacionales como ISO 8995-1:2002/CIE S 008/E:2001, Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) y el Comité Europeo de Normalización (EN 12464-1). Se compararon los valores obtenidos de la

uniformidad lumínica, medidos en la mañana, mediodía y noche durante el mes de diciembre de 2023.

## **2.2. Prototipo de tubo solar y sistema de fibra óptica para el diseño de espacios educativos.**

Se desarrolló un sistema experimental de iluminación natural utilizando tubos de PVC de 2" de diámetro, diseñado con características funcionales de receptor, transmisor y difusor de iluminación natural. El sistema incorpora tubos de PVC de 2" con longitudes variables adaptadas a cada módulo de estudio, así como codos de PVC forrados internamente con papel de aluminio para mejorar la transmisión de luz mediante reflexión. Para la recepción focalizada de luz, se empleó un cono trunco hecho de espejos trapezoidales, con diámetros de 3" en la parte más ancha y 1" en la parte más estrecha. Para la transmisión óptima de luz a través de los tubos, se utilizó un lente Fresnel solar de plástico PMMA con una longitud focal de 300 mm y un grosor de 2 mm, que ofrece una alta transmisión del 92% y una ampliación de 3x, optimizando la concentración de energía solar para una conversión eficiente, como se muestra en la Figura 2. El sistema incluye además un seguidor solar pasivo de dos ejes con ajuste manual de posición, montado sobre un soporte metálico en forma de H específicamente diseñado para el concentrador de lente Fresnel, con una altura ajustable de 30 cm mediante flejes adicionales. La lente Fresnel se posicionó sobre este soporte y se ajustó manualmente para maximizar su eficiencia. El punto de proyección del rayo luminoso proporcionado por el concentrador solar se utilizó como terminal de iluminación.



**Figura 2** Diseño del prototipo del Sistema reflectores con tubos solares.

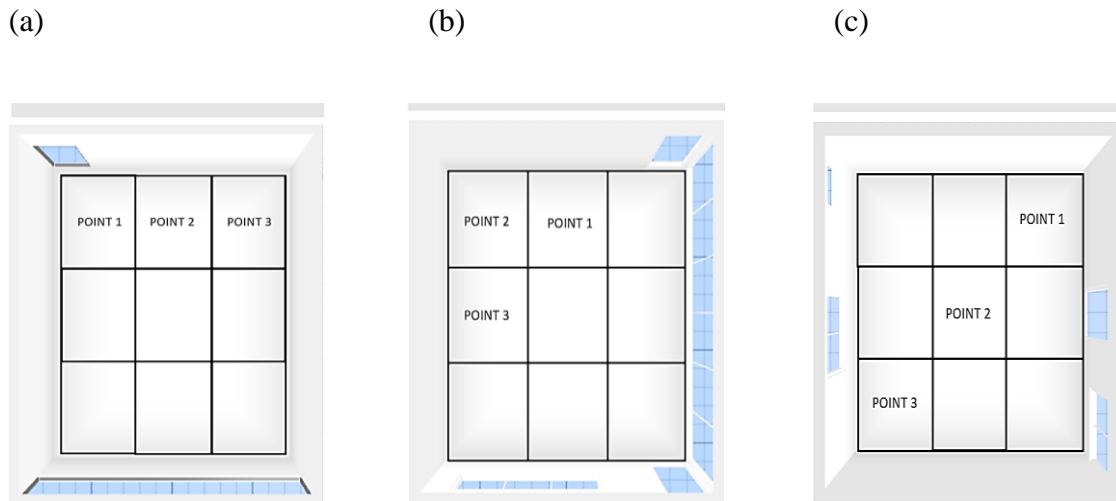
Para las mediciones, se construyeron prototipos a escala 1:5 de tres aulas que presentaban mayores deficiencias en iluminación según datos previamente recolectados. Los prototipos fueron construidos a escala real respecto a puertas y ventanas, utilizando material MDF y estructura de madera, y adaptados a las siguientes dimensiones específicas: el aula 105 de la EPAU, ubicada en el primer nivel con dimensiones de 9.10 x 6.85 m; el aula 101 de la EPNH, también en el primer nivel con dimensiones de 7.75 x 6.80 m; y el aula 101 de la EPS, situada en el segundo nivel con dimensiones de 5.60 x 6.80 m. El prototipo se instaló en los puntos con menor iluminación según el método de la cuadrícula como se muestra en la Figura 3, colocando el concentrador solar de lente Fresnel en la parte exterior superior, cercano al punto con menor iluminación y orientado al norte, definiendo el ángulo de incidencia del sol mediante los ángulos de azimut y elevación, considerando el período del día. Este concentrador enfoca la luz solar dispersa y la dirige hacia el domo solar, que actúa como receptor para potenciar la iluminación natural a través de los espejos trapezoidales. La luz natural emitida





pasa por los tubos de aluminio, dispuestos vertical y horizontalmente, y en los codos con un ángulo de incidencia axial, los rayos de luz pasan directamente a lo largo del tubo sin interreflejarse con la superficie interna del tubo, contribuyendo a la eficiencia de la transmisión de la luz. Finalmente, la luz llega al difusor en forma de aro o plafón, distribuyendo la iluminación de manera uniforme en el ambiente.

Para realizar el análisis inferencial de los datos, se empleó el software estadístico Jamovi, versión 2.3.28. En primer lugar, se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, la cual arrojó un valor de  $p$  superior a 0.05. Este resultado indica que los datos de iluminación siguen una distribución normal, permitiendo el uso de pruebas paramétricas en el análisis comparativo. Posteriormente, se realizó una prueba  $t$  de Student para muestras independientes con el fin de evaluar las diferencias en los niveles de iluminación entre el grupo control y el grupo experimental. Los resultados de esta prueba mostraron un valor de  $p$  menor a 0.05, señalando la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre ambos grupos. Específicamente, se observó que los ambientes con mayor déficit lumínico experimentaron un aumento significativo en los niveles de iluminación en el grupo experimental tras la intervención, en contraste con el grupo control, que no recibió ninguna modificación.



**Figure 3** Muestras con mayor déficit lumínico (a) aula 105 EPAU, (b) aula 101 EPNH, (c) aula 203 EPS.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis de los niveles de iluminancia en las aulas de diferentes entidades proyectivas (EPAU, EPNH, EPS) en la ciudad de Puno, Perú, situada a más de 3800 msnm, se observaron variaciones significativas entre pisos y períodos del día. En la EPAU, los pisos 1 y 2 mostraron niveles de iluminación insuficientes durante la mañana (288.34 y 286.00 lux, respectivamente) y la noche (311.74 y 308.86 lux), mientras que el piso 3 presentó niveles adecuados en todos los períodos, especialmente en la mañana (664.55 lux) y al mediodía (634.85 lux). En la EPNH, se destacó una alta iluminancia en el piso 1 durante la mañana (717.55 lux) y la noche (1021.22 lux), pero una disminución notable al mediodía (299.85 lux). La EPS mostró un desempeño más consistente, con niveles adecuados en todos los pisos y períodos, destacándose el piso 3 durante la noche (930.78 lux). Sin embargo, a pesar de algunos valores altos, muchas aulas no cumplieron consistentemente con la normativa internacional de 300 y 500 lux, especialmente durante la noche y en los pisos inferiores.

Estos resultados evidencian la necesidad de mejorar la infraestructura de iluminación para garantizar un ambiente de estudio óptimo y conforme a las normativas, particularmente



en una región de alta altitud donde la calidad de la iluminación natural puede verse afectada por condiciones climáticas y geográficas.

### 3.1 Niveles de iluminación en espacios educativos

La evaluación de los niveles de iluminancia en las escuelas profesionales EPAU, EPNH, EPS.

Se realizó considerando diversas normativas de iluminación, incluyendo la Norma Técnica G.050 del reglamento nacional de edificaciones del Perú, ISO 8995-1:2002, la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) y la norma europea EN 12464-1. Estas normativas establecen los requisitos mínimos de iluminación para diferentes tipos de espacios educativos, exigiendo un mínimo de 300 lux para aulas generales y 500 lux para áreas específicas como laboratorios los resultados se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1** Resultados de cumplimiento normativo nacional e internacional en espacios educativos EPAU, EPNH y EPS

E.P.	Piso	Periodo	G.050	ISO 8995 <sup>a</sup>	ISO 8995 <sup>b</sup>	IESNA <sup>a</sup>	IESNA <sup>b</sup>	EN 12464-1 <sup>a</sup>	EN 12464-1 <sup>b</sup>
EPAU	1	mañana	No	No	No	No	No	No	No
	1	medio día	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	1	noche	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	2	mañana	No	No	No	No	No	No	No
	2	medio día	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	2	noche	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	3	mañana	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	3	medio día	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	3	noche	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	4	mañana	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	4	medio día	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	4	noche	No	No	No	No	No	No	No
EPNH	1	mañana	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	1	medio día	No	No	No	No	No	No	No
	1	noche	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	2	mañana	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	2	medio día	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	2	noche	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	3	mañana	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	3	medio día	Si	Si	No	Si	No	Si	No



	3	noche	No	No	No	No	No	No	No
	2	mañana	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	2	medio día	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	2	noche	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	3	mañana	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
EPS	3	medio día	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	3	noche	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	4	mañana	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	4	medio día	Si	Si	No	Si	No	Si	No
	4	noche	Si	Si	No	Si	No	Si	No

*Fuente: elaborado por los autores.*

*(a) comparación con 300 lux para aulas, (b) comparación con 500 lux para laboratorios*

La tabla 1 muestra que el cumplimiento de las normativas de iluminación varía significativamente entre las diferentes escuelas profesionales y pisos. En general, la EPAU presenta un cumplimiento insuficiente, especialmente en los pisos 1 y 2, donde los niveles de iluminancia no alcanzan los 500 lux recomendados por las normas internacionales en ningún período. La EPNH tiene un mejor desempeño en los pisos 1 y 2, especialmente durante la noche, pero aún no cumple consistentemente con los 500 lux al mediodía. La EPS destaca por su alto cumplimiento, particularmente en los pisos 2 y 3, aunque el piso 4 no cumple con los 500 lux en ningún período.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de mejorar la infraestructura de iluminación en las aulas, especialmente en aquellos pisos y períodos donde los niveles de iluminación son insuficientes para cumplir con las normativas internacionales. Esto es crucial para asegurar un entorno de estudio óptimo y adecuado en Puno, una región de alta altitud donde las condiciones geográficas pueden afectar la calidad de la iluminación natural. La implementación de mejoras en la iluminación contribuirá a un mejor desempeño académico y al bienestar de los estudiantes y el personal educativo.

La evaluación de los niveles de iluminancia, presentada en la Tabla 1, revela que los espacios con la mayor deficiencia de iluminación se encuentran en el aula 105 de la Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo (EPAU), el aula 101 de la Escuela Profesional de Nutrición Humana (EPNH) y el aula 203 de la Escuela



Profesional de Sociología (EPS). Estos espacios requieren un análisis más profundo debido a sus consistentemente bajos niveles de iluminancia, que no cumplen con los 500 lux recomendados por las normativas internacionales en ningún período del día. Un análisis exhaustivo de estos espacios es crucial para implementar mejoras efectivas en la infraestructura de iluminación y asegurar un entorno de estudio adecuado y conforme a las normativas.

Con respecto al consumo eléctrico y los costos asociados a la iluminación en distintos espacios dentro de tres instituciones educativas: EPAU, EPNH y EPS. En la EPAU, las aulas bajo evaluación utilizan paneles de tubos fluorescentes de 60x60 cm y 4x18W, operando durante 12 horas promedio diarias. Con un total de 12 aulas, se registra un consumo diario de 11,520 Wh, equivalente a un consumo mensual de aproximadamente 230.4 kWh, generando un costo estimado de 2,245.3 nuevos soles mensuales. Además, otros espacios como aulas convencionales, biblioteca y área de cómputo contribuyen significativamente al consumo total, alcanzando un consumo mensual combinado de 112,320 Wh (2246.4 kWh) con un costo de 2246.4 nuevos soles.

En la EPNH, las aulas evaluadas también emplean paneles de tubos fluorescentes similares, con un horario de uso diario de 12 horas y un consumo diario de 10,560 Wh. Con 11 aulas en total, el consumo mensual asciende a 211.2 kWh, con un costo estimado de 1,498.6 nuevos soles. Otros espacios como aulas convencionales y área de cómputo contribuyen a un consumo total mensual de 75,040 Wh (1500.8 kWh) con un costo adicional de 1500.8 nuevos soles.

Por otro lado, en la EPS, las aulas evaluadas utilizan rejillas de tubos fluorescentes de mayor potencia, operando durante 10 horas diarias y registrando un consumo diario de 6,400 Wh. Con 8 aulas en total, el consumo mensual se estima en



128 kWh, generando un costo mensual de 1,215.3 nuevos soles. Las áreas restantes, incluyendo aulas estándar y biblioteca, contribuyen a un consumo total mensual de 60,800 Wh (1216 kWh) y un costo de 1216 nuevos soles.

El análisis de la eficiencia energética de las luminarias en los espacios educativos del campus universitario de la UNA, Puno, reveló variaciones significativas entre las diferentes escuelas profesionales. La eficiencia energética se calculó utilizando la relación entre la potencia en watts, las horas de uso diario y el consumo eléctrico de cada luminaria. Los resultados indican que la Escuela de Nutrición (aula en el primer piso) presenta la mayor eficiencia energética con un valor de 0.10, mientras que la Escuela de Arquitectura (aulas en los pisos 1°, 2°, 3° y 4°) muestra la menor eficiencia con un valor de 0.0093. La relación matemática permite determinar la eficiencia al considerar tanto la potencia y el tiempo de uso, como la eficiencia intrínseca de la luminaria.

El consumo energético mensual y los costos anuales asociados fueron calculados para cada escuela profesional. La Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo (EPAU) mostró un consumo energético total mensual de 2182.64 kWh, resultando en un costo anual de iluminación de 80,830.8 S/. La Escuela Profesional de Nutrición Humana (EPNH) registró un consumo mensual de 1515.68 kWh con un costo anual de 53,949.6 S/. Finalmente, la Escuela Profesional de Sociología (EPS) tuvo un consumo mensual de 288 kWh, lo que se traduce en un costo anual de 43,750.8 S/. Estas proyecciones indican un potencial significativo para la reducción de costos mediante la optimización de la eficiencia energética de las luminarias.



### **3.2. Análisis por el método de la grilla aulas 105 de la EPAU, 101 de la EPNH y 203 de la EPS**

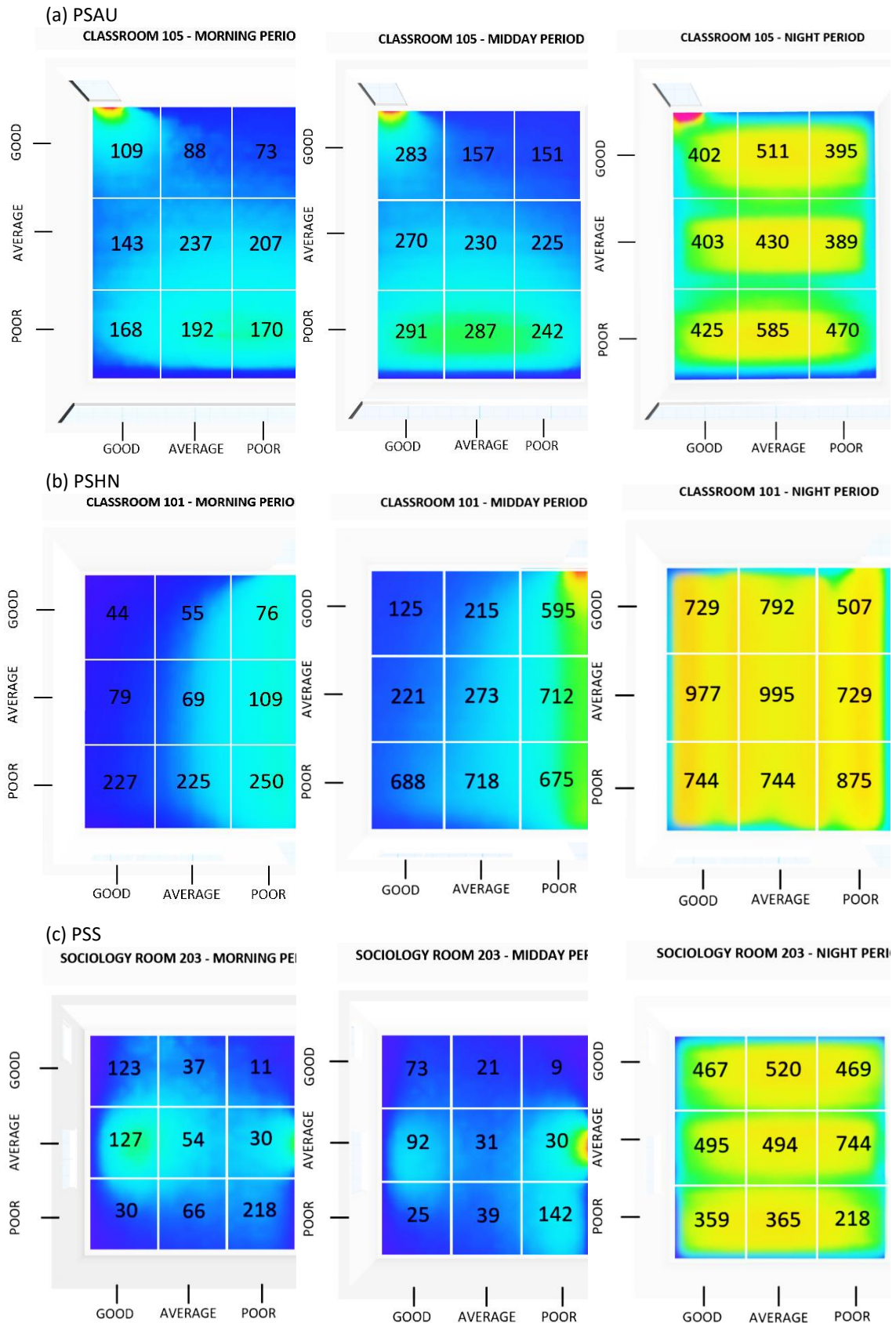
En el análisis de los niveles de iluminación mediante el método de la grilla en las aulas 105 de la EPAU, 101 de la EPNH y 203 de la EPS, se utilizaron croquis y planos actualizados para identificar los puntos de muestreo, distribuidos en cuadrículas para evaluar niveles de iluminación uniformes. Las dimensiones del área de estudio en la EPAU fueron de 6.80 m de ancho, 5.60 m de largo y una altura de montaje de 2.70 m. Las mediciones de iluminación realizadas en el centro de cada cuadrícula arrojaron los siguientes valores medios de iluminancia ( $E_m$ ) en lux y la mínima iluminancia requerida ( $E_{min}$ ). En la mañana, los valores medios de iluminancia fueron de 63.6 lux, y los mínimos de 31.8 lux, no cumpliendo con los requisitos normativos. Al mediodía, los valores medios fueron de 51.33 lux y los mínimos de 25.67 lux, tampoco cumpliendo con los requisitos. Sin embargo, en la tarde, los valores mejoraron significativamente con 467 lux de media y 233.5 lux mínimos, cumpliendo con los requisitos. La uniformidad de la iluminación fue inferior al requisito mínimo en los turnos de mañana y mediodía, pero adecuada en el turno de tarde como se muestra en figura 3a.

En el aula 101 de la Escuela Profesional de Nutrición Humana, los datos se recolectaron en tres intervalos horarios. Las dimensiones del área de estudio fueron de 6.80 m de ancho, 7.75 m de largo y una altura de montaje de 2.70 m. Las mediciones de iluminación arrojaron los siguientes resultados: en la mañana, los valores medios de iluminancia fueron de 126 lux y los mínimos de 63 lux, no cumpliendo con los requisitos. Al mediodía, los valores mejoraron considerablemente con 491.3 lux de media y 245.65 lux mínimos, cumpliendo con los requisitos normativos. En la tarde, los valores de iluminancia fueron aún mayores, con 788 lux de media y 394 lux



mínimos, también cumpliendo con los requisitos. La uniformidad de la iluminación fue insuficiente en el turno de mañana, pero adecuada en los turnos de mediodía y tarde.

En el aula 203 de la Escuela Profesional de Sociología, los datos se recolectaron en las aulas, la biblioteca y el centro de cómputo, utilizando la misma metodología. Las dimensiones del área de estudio fueron de 6.85 m de ancho, 9.10 m de largo y una altura de montaje de 2.70 m. Las mediciones de iluminación mostraron que, en la mañana, los valores medios de iluminancia fueron de 348.33 lux y los mínimos de 174.17 lux, no cumpliendo con los requisitos. Al mediodía, los valores medios fueron de 588.67 lux y los mínimos de 279.33 lux, tampoco cumpliendo. En la tarde, los valores fueron de 445 lux de media y 222.5 lux mínimos, cumpliendo con los requisitos. La uniformidad de la iluminación no cumplió con los requisitos en los turnos de mañana y mediodía, pero fue adecuada en el turno de tarde.



**Figura 4** Análisis de uniformidad de iluminación aulas 105 de la EPAU, 101 de la EPNH y 203 de la EPS.



El análisis comparativo de las tres escuelas profesionales reveló que las aulas 105 de la EPAU, 101 de la EPNH y 203 de la EPS presentan deficiencias significativas en los niveles de iluminación, especialmente en los periodos de mañana y mediodía. Estos resultados subrayan la necesidad de una revisión y mejora integral en el diseño y distribución de la iluminación para cumplir con los estándares de calidad establecidos y proporcionar un ambiente óptimo para el desempeño académico. La implementación de mejoras en la infraestructura de iluminación es crucial para asegurar que los niveles de iluminancia cumplan consistentemente con los requisitos normativos y para mejorar el entorno de estudio para los estudiantes y el personal educativo.

### **3.3. Prototipo de tubo solar y sistema de fibra óptica para el diseño de espacios educativos**

Los resultados de la tabla 2, muestran diferencias significativas en los niveles de iluminancia entre los grupos control y experimental en todos los periodos del día (mañana, mediodía y tarde). En la Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo (EPAU), los niveles de iluminación sin el prototipo eran bajos como se muestra en la Figura 4a, con un promedio de 7.42 lux en la mañana en el punto 1, aumentando a 15.03 lux en el punto 2, y 8.31 lux en el punto 3. Con el prototipo como se muestra en la figura 4b, estos niveles se incrementaron significativamente a 317.21 lux, 231.38 lux, y 196.66 lux respectivamente.



(a)



(b)



**Figura 5** Medición en modelo a escala (a) grupo control, (b) grupo experimental.

**Tabla 2** Resultados comparativos con la instalación del prototipo de tubo solar en modelos a 1:5

Periodo	Muestra	EPAU		EPNH		EPS	
		GC <sup>a</sup>	GE <sup>b</sup>	GC <sup>a</sup>	GE <sup>b</sup>	GC <sup>a</sup>	GE <sup>b</sup>
Mañana	P1	7.42	317.21	11.82	119.50	14.33	918.46
	P2	15.03	231.38	7.85	278.11	11.01	280.29
	P3	8.31	196.66	27.18	312.19	18.59	155.62
Medio día	P1	14.78	396.47	21.35	231.22	30.66	229.06
	P2	11.14	300.29	35.58	380.08	17.12	321.45
	P3	7.67	388.97	24.87	474.49	12.82	228.49
Tarde	P1	79.79	387.81	26.55	320.84	13.05	331.22
	P2	73.44	478.06	35.39	261.01	22.42	336.48
	P3	65.58	459.41	37.50	349.58	17.30	287.73

Fuente: elaborado por los autores.

(a) Grupo control, (b) Grupo experimental



Los resultados obtenidos en las escuelas profesionales de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno demuestran la efectividad significativa de los tubos solares como sistema de iluminación natural. Los niveles de iluminación alcanzados en la Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo (EPAU) con 350.70 lux, la Escuela Profesional de Nutrición Humana (EPNH) con 303.00 lux, y la Escuela Profesional de Sociología (EPS) con 343.20 lux, confirman la capacidad de estos sistemas para proporcionar una iluminación adecuada en espacios educativos. Estos hallazgos se alinean con las investigaciones recientes que respaldan la eficacia de los dispositivos tubulares de iluminación natural (TDD) para iluminar espacios interiores (Fernandes et al., 2023). Además, la efectividad observada coincide con estudios previos que han demostrado que los sistemas con cúpulas de cristal son particularmente eficientes en espacios educativos, especialmente durante los meses de invierno (Sibley et al., 2020).

En términos de eficiencia económica, la implementación del sistema ha demostrado beneficios sustanciales en las tres escuelas profesionales. En la EPAU, el ahorro mensual alcanza los 648.67 soles, en la EPNH se registra un ahorro de 432.95 soles, y en la EPS se logra un ahorro de 351.10 soles, representando en conjunto una reducción promedio del 28.89% en los costos operativos. Esta optimización del consumo energético y la consecuente reducción de costos se alinea con los hallazgos de investigaciones similares en otras instituciones (García-Fernández et al., 2023). Sin embargo, es importante considerar que, como señalan algunos investigadores, la implementación generalizada de estos sistemas enfrenta desafíos significativos, principalmente relacionados con los costos iniciales y la variabilidad en su eficiencia (El-saggan et al., 2023).



Desde una perspectiva técnica, las investigaciones recientes sugieren posibles mejoras en la eficiencia del sistema mediante la incorporación de tecnologías específicas. Por ejemplo, el uso de lentes Fresnel como medio concentrador ha demostrado ventajas significativas en términos de simplicidad fotométrica y relación costo-beneficio (Upadhyay et al., 2024). Esta información resulta valiosa para futuras optimizaciones del sistema implementado en las tres escuelas profesionales estudiadas.

Los resultados observados en la EPAU, EPNH y EPS tienen implicaciones más allá del ahorro energético y económico. La mejora en los niveles de iluminación contribuye directamente a la creación de un ambiente de aprendizaje más confortable y eficiente, lo cual puede tener un impacto positivo en el desempeño académico de los estudiantes. Este aspecto se ve respaldado por investigaciones que destacan la importancia de la iluminación natural en espacios de trabajo y estudio (Fernandes et al., 2023). Además, la significativa reducción en el consumo energético demuestra el potencial de estos sistemas para contribuir a la sostenibilidad ambiental en edificios educativos, un aspecto cada vez más crucial en el contexto actual.

Sin embargo, es importante considerar las limitaciones y desafíos identificados en investigaciones recientes. El-saggan et al. (2023) señalan que, a pesar del potencial demostrado para mejorar la sostenibilidad en la iluminación, existen obstáculos importantes que deben abordarse, como los costos elevados de implementación y las variaciones en la eficiencia según las condiciones específicas del entorno. Estos aspectos deben ser considerados en la planificación de futuras implementaciones y en el desarrollo de estrategias para optimizar el rendimiento a largo plazo en las tres escuelas profesionales. En conjunto, la implementación de



tubos solares en la EPAU, EPNH y EPS demuestra ser una solución efectiva que equilibra las necesidades de iluminación con la eficiencia energética. Los resultados positivos en términos de ahorro económico y mejora de la iluminación, respaldados por la literatura internacional reciente, sugieren que esta tecnología representa una inversión viable para instituciones educativas, especialmente cuando se consideran los beneficios a largo plazo en términos de sostenibilidad y confort de los usuarios. La evidencia acumulada tanto en este estudio como en la literatura existente apunta hacia la importancia de continuar investigando y optimizando estos sistemas para maximizar su eficacia y superar las limitaciones actuales.

#### **4. CONCLUSIONES**

Se ha revelado que los niveles de iluminación en los espacios educativos de la UNA-Puno revela deficiencias significativas que impactan la eficiencia energética y el confort de los ocupantes. Los datos obtenidos muestran que las aulas de los pisos inferiores tienen niveles de iluminación insuficientes. El análisis del consumo energético y los costos asociados reveló variaciones significativas en los niveles de consumo y costos asociados. El consumo medio mensual de las tres escuelas es de aproximadamente 1328.77 kWh, con un costo mensual promedio de 4959.2 soles y un costo anual promedio de 59510.4 soles.

La implementación del prototipo de iluminación natural basado en tubos solares demostró ser una solución efectiva para mejorar los niveles de iluminación en las aulas con mayor déficit lumínico. Los resultados experimentales indicaron un aumento significativo en los niveles de iluminación, alcanzando y superando los estándares recomendados, lo que podría llevar a una reducción en el consumo de energía eléctrica debido a una menor necesidad de iluminación artificial.

Es fundamental considerar la adopción de estas tecnologías en el diseño y renovación de infraestructuras educativas, especialmente en regiones con condiciones geográficas y climáticas desafiantes como Puno. Además, se sugiere realizar estudios adicionales para evaluar el impacto a largo plazo de estas intervenciones y explorar otras tecnologías de iluminación sostenible que puedan complementar los sistemas existentes. La integración de soluciones de iluminación natural en el diseño arquitectónico de edificios educativos es crucial para lograr espacios sostenibles y energéticamente eficientes, mejorando significativamente la calidad del ambiente de aprendizaje y reduciendo los costos operativos asociados con el consumo energético. Esta estrategia no solo optimiza la eficiencia energética, sino que también contribuye a un mejor desempeño académico y bienestar de los estudiantes y el personal educativo.

#### **Consideraciones éticas**

No aplica.

#### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflictos de intereses

#### **Fondos**

Esta investigación no recibió ningún apoyo financiero.

### **5. REFERENCIAS**

- Arvizu-Piña, V. A., Armendáriz López, J. F., García González, A. A., & Barrera Alarcón, I. G. (2023). *An open access online tool for LCA in building's early design stage in the Latin American context. A screening LCA case study for a bioclimatic building.* *Energy and Buildings*, 295(113269), 113269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113269>
- Baydoğan, M. Ç., & Özkantar, V. (2023). *Evaluation of daylight performance metrics according to country guidelines: The case of educational buildings in Turkey.* *Energy and Buildings*, 297(113487), 113487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113487>



- Bosu, I., Mahmoud, H., Ookawara, S., & Hassan, H. (2023). *Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review*. *Solar Energy* (Phoenix, Ariz.), 259, 188–228. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.006>
- Budhiyanto, A., & Chiou, Y.-S. (2024). *Visual comfort and energy savings in classrooms using surveillance camera derived HDR images for lighting and daylighting control system*. *Journal of Building Engineering*, 86(108841), 108841. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108841>
- Cloete, S., Arnaiz del Pozo, C., Cloete, J. H., & Jiménez Álvaro, Á. (2023). *The future of fuels: Uncertainty quantification study of mid-century ammonia and methanol production costs*. *Energy Conversion and Management*, 297(117701), 117701. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117701>
- Degefu, M. A., & Kifle, F. (2024). *Impacts of climate variability on the vegetable production of urban farmers in the Addis Ababa metropolitan area: Nexus of climate-smart agricultural technologies*. *Climate Services*, 33(100430), 100430. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100430>
- El-Saggan, M. E., Abdelrahman, A. R., Aissa, W. A., & Reda, A. M. A. (2023). *A review of the evolution of daylighting applications and systems over time for green buildings*. *International Journal of Applied Energy Systems*, 5(2), 31–47. [https://ijaes.journals.ekb.eg/article\\_292026.html](https://ijaes.journals.ekb.eg/article_292026.html)
- Fernandes, L. L., & Regnier, C. M. (2023). *Lighting and visual comfort performance of commercially available tubular daylight devices*. *Solar Energy*, 251, 420–437. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.022>
- Fernández-Ahumada, L. M., Osuna-Mérida, M., López-Sánchez, J., Gómez-Uceda, F. J., López-Luque, R., & Varo-Martínez, M. (2022). *Use of polar heliostats to improve levels of natural lighting inside buildings with little access to sunlight*. *Sensors* (Basel, Switzerland), 22(16), 5996. <https://doi.org/10.3390/s22165996>
- Galeano, S. E. A., & Betanco, J. A. (2021). *Eficiencia energética: una tarea para las universidades*. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 166-177. <https://www.lamjol.info/index.php/FAREM/article/view/11617/13480>
- García-Fernández, B., & Omar, O. (2023). *Integrated innovative solar lighting system for optimization of daylight utilization for public library in Alexandria, Egypt*. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(1), 101819. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101819>
- Hota, S. P. (2023). *Education infrastructure, expenditure, enrollment & economic development in Odisha, India*. *International Journal of Educational Development*, 103(102903), 102903. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2023.102903>
- Inchuña, J. N. B., Calisaya Rojas, L. C., & Mamani, G. M. (2024). *Designing resilient bicycle paths in Puno, Peru: Combating urban CO<sub>2</sub> emissions with GIS analysis*. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 11(5), 96-102. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2024.05.010>



- Kartal, M. T., Magazzino, C., & Pata, U. K. (2024). *Marginal effect of electricity generation on CO2 emissions: Disaggregated level evidence from China by KRLS method and high-frequency daily data*. *Energy Strategy Reviews*, 53(101382), 101382. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101382>
- Mazzeo, D., Leva, S., Matera, N., Kontoleon, K. J., Saboor, S., Pirouz, B., & Elkader, M. R. (2023). *A user-friendly and accurate machine learning tool for the evaluation of the worldwide yearly photovoltaic electricity production*. *Energy Reports*, 9, 6267–6294. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.221>
- Moazzen, N., Karagüler, M. E., & Ashrafiyan, T. (2021). *Comprehensive parameters for the definition of nearly zero energy and cost optimal levels considering the life cycle energy and thermal comfort of school buildings*. *Energy and Buildings*, 253(111487), 111487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111487>
- Ocaña Miguel, A. (2022). *Análisis teórico-experimental de eficiencia energética en infraestructuras urbanas*. UMA Editorial. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/25437>
- Pourasl, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023). *Solar energy status in the world: A comprehensive review*. *Energy Reports*, 10, 3474–3493. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>
- Ramos, I. S., Grau, J. F. R., Garrido, F. M., & Martín, D. M. (2022). *Energy and comfort. The historical evolution of the façade in Western Architecture*. *VLC Arquitectura Research Journal*, 9(2), 179–200. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8669003>
- Re, M. G., & Bianchi, M. F. (2020). *Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética en edificios escolares existentes*. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente; *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 45, 7. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/156390>
- Sánchez, O., & David, R. (2022). *Evolución urbana sostenible a través de las instalaciones de iluminación*. UMA Editorial. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/25446>
- Santos, M. D. V. (2022). *Los espacios educativos y su relación comunitaria en Quebrada Verde Pachacamac, Lima, Perú: un análisis sobre la calidad*. *REVISTA NODO*, 16(32), 74–97. <https://doi.org/10.54104/nodo.v16n32.1353>
- Sibley, M., & Peña-García, A. (2020). *¿Vidrio plano a abertura de cúpula de cristal? Un análisis comparativo de un año de duración del rendimiento de los conductos de luz en entornos residenciales reales y condiciones climáticas*. *Sustainability*, 12(9), 3858. <https://doi.org/10.3390/su12093858>
- Upadhyay, P., Kuchhal, P., & Mondal, S. (2024). *A review of the use of different technologies/methods for the transmission of solar radiation for lighting purposes using optical fibers*. *Renewable Energy Focus*, 50, 100614. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100614>





- Usta, P., & Zengin, B. (2021). *Energy assessment of different building materials in the education building*. *Energy Reports*, 7, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.126>
- Vaisi, S., Firouzi, M., & Varmazyari, P. (2022). *Energy benchmarking for secondary school buildings, applying the Top-Down approach*. *Energy and Buildings*, 279(112689), 112689. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112689>
- Wang, B., Zhang, X., Zhang, M., Cui, Y., & He, Y. (2024). *Development of novel variable building skin with solar concentrating technology for obtaining energy benefits and optimizing indoor daylighting*. *Energy and Buildings*, 310(114081), 114081. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114081>
- Zhang, M., Gao, X., Luo, Q., Lin, S., Lyu, M., Luo, X., Ke, C., & You, W. (2024). *Risk assessment of persistent exposure to artificial light at night revealed altered behavior and metabolic patterns of marine nocturnal shellfish*. *Ecological Indicators*, 160(111807), 111807. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111807>
- Zhang, Y., Chen, W., Yang, H., & Wang, H. (2024). *Renewable energy input strategy considering different electricity price regulation policies*. *Computers & Industrial Engineering*, 190(110092), 110092. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110092>





## ANEXO 3: ARTICULO PUBLICADO



RESEARCH ARTICLE  
Published Online: November 18, 2024  
<https://doi.org/10.31893/multiscience.2025284>

# Evaluation of lighting factors that influence energy efficiency for the design of educational spaces on the university campus of the UNA, Puno



Kathy Deisy Machaca Gutierrez<sup>a</sup> | Dayana Priscila Apaza Salgado<sup>a</sup> | Grover Marín Mamani<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo, Perú.

**Abstract** Energy efficiency in higher education buildings is crucial to reduce energy consumption. The campus of the Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Peru, faces unique challenges due to its geographical location at over 3800 masl and its position in the southern hemisphere, where lighting is a challenge for buildings. This study evaluated the lighting and energy efficiency in educational spaces using a prototype system with reflectors and a solar tube. Lighting levels were measured in three vocational schools using a digital lux meter at different periods of the day. In addition, an experimental prototype of natural lighting based on solar tubes was developed and its effectiveness was evaluated in selected classrooms with lighting deficits. Significant differences were demonstrated in the lighting levels in the classrooms, especially on the lower floors, where the illuminance levels did not reach the 300 lux recommended for general classrooms and 500 lux for laboratories. In classroom 105 of the Professional School of Architecture and Urbanism, classroom 101 of the Professional School of Human Nutrition, and classroom 203 of the Professional School of Sociology, the illuminance levels were well below the required standards. The implementation of the solar tube prototype significantly increased the illuminance levels in these environments. These remarkable increases improved the lighting comfort of the classrooms, meeting and exceeding international standards. It also highlights the importance of integrating daylighting solutions into the architectural design of educational buildings. Adopting these technologies is recommended in regions with similar geographic and climatic conditions to Puno. Implementing daylighting technologies, such as solar tubes, is an effective strategy to improve the quality of the learning environment in educational buildings.

**Keywords:** light deficit, natural lighting, scale model, solar tubes

### 1. Introduction

Global electricity demand grew by 2% in 2022 and is expected to grow by 3% in the next three years, with 20% of the planet's electricity use being distributed to lighting (Sanchez & David, 2022; Zhang et al., 2024). According to historical data, this trend has remained constant over the last decade, with minor variations due to economic and technological factors (Kartal et al., 2024). Currently, 74% of electricity production is supplied by hydrocarbon fuels, which are unsustainable in the long term and negatively affect the environment (Ocaña, 2022; Cloete et al., 2023). This impact includes significant CO<sub>2</sub> emissions, which contribute to climate change and air pollution (Inchuña et al., 2024). By 2040, global energy consumption is expected to increase by 30%, and 37% of electricity generation is expected to come from renewable sources, particularly wind and solar generation (Ramos et al., 2022; Pourasl et al., 2023).

The increased use of artificial lighting affects emissions in an energy grid without a more holistic view, which negatively impacts the economy, health, landscape, etc. (Vaisi et al., 2022). Specific studies have shown that artificial light at night can alter ecosystems, affect human sleep patterns, and increase energy consumption (Zhang et al., 2024). To mitigate the negative effects produced by energy consumption, architecture-based strategies are sought to make intelligent use of available natural resources to achieve a comfortable and sustainable indoor environment (Arvizu-Piña et al., 2023). Successful examples include the use of skylights, ventilated facades, and reflective materials that maximize natural light (Bosu et al., 2023). Energy efficiency involves obtaining energy goods and services with a decrease in emissions generation and an improvement in the quality of indoor spaces, extending the life of resources (Re & Bianchi, 2020). A low incidence of natural lighting in spaces where activities are carried out implies a greater need for artificial lighting and, therefore, higher energy consumption for the building. For example, studies have shown that a 50% reduction in natural lighting can increase electricity consumption by 20% (Budhiyanto & Chiou, 2024). Daylighting contributes to the energy efficiency of the residential sector and improves the health and livability of space. Exposure to natural light has been shown to reduce stress and improve the overall well-being of occupants (Wang et al., 2024). Owing to the increasing need for electrical energy savings, daylighting is becoming increasingly important in





buildings. Various lighting strategies could make dispensing artificial lighting at certain times possible, thus optimizing energy consumption (Moazzen et al., 2021). Several studies have shown that the use of natural lighting strategies and systems minimizes losses and uses energy more efficiently, thus increasing occupant comfort (Usta & Zengin, 2021). The implementation of efficiency and energy-saving measures in buildings is fundamental; however, daylighting systems depend on latitude, meteorology, time of year, and time of day and can be predictable or very unpredictable (Galeano & Betanco, 2021). For example, in regions with high climatic variability, the efficiency of these systems can fluctuate significantly (Degefu & Kifle, 2024).

Our research focuses on the city of Puno, focusing on the university campus of UNA-Puno, owing to the growing demand for educational infrastructure. The department of Puno is in the extreme southeast of Peru, between 13°00'00" and 17°17'30" south latitude and 71°06'57" and 68°48'46" west longitude; it has a territorial extension of 71,999.0 km<sup>2</sup>. Puno has the most important lake port in Peru and is the seventh most visited city by foreign tourists (2.6%), with a demand for educational infrastructure that accommodates 18.7% of the population. The educational infrastructure in Puno presents unique challenges due to its geographic location and climate, requiring specific solutions for energy efficiency. Institutions and organizations in several countries emphasize the importance of sustainable lighting conditions in educational buildings (Baydoğan & Özkantar, 2023). Daylighting systems provide a means to obtain optimal energy savings, which is useful for developing contemporary educational spaces (Santos, 2022). A notable example is the University of Cordoba in Spain, which implemented advanced daylighting systems to reduce energy consumption by 64% (Fernandez-Ahumada et al., 2022). Therefore, it is essential to analyze the variables that influence an educational space for reducing energy use, obtaining energy efficiency, and contributing to the environment. For this reason, it is proposed to evaluate the lighting levels and their influence on energy efficiency in the design of educational spaces located above 3800 m.a.s.l. in the Peruvian Andes through the application of a prototype system composed of reflectors and solar tubes.

## 2. Materials and methods

The research follows a quantitative approach, with a prospective observational design, and uses longitudinal and analytical measurements. The study population is composed of environments with the educational architectural function of the 37 professional schools of the Universidad Nacional del Altiplano de Puno, distributed in three areas: 15 in Engineering, 8 in Biomedical, and 14 in Social, all located in the 37.30 hectares of the university campus. The samples were obtained from one representative school for each area: the Professional School of Architecture and Urbanism (PSAU), the Professional School of Human Nutrition (PSHN), and the Professional School of Sociology (PSS), as shown in Figure 1.

The data collection points were located at UTM coordinates WGS84 Zone 19 South: Engineering (PSAU) at 8250186 m South and 391258 m East; Biomedical (PSHN) at 8250082 m South and 391061 m East; and Social (PSS) at 8250210 m South and 391398 m East. The selection of these schools was based on several criteria: the number of students enrolled, age of construction greater than 10 years, similarity in the number of floors built, and different orientations of the main façade.

The research was divided into two stages. In the first stage, the lighting levels were measured by educational space, and the energy consumption was calculated, identifying the spaces with the greatest lighting deficit and detailing the measurements via the grid method. In the second stage, a bibliometric analysis was carried out, establishing reflector systems with solar tubes as a viable alternative to improve lighting levels in spaces with the greatest lighting deficit. For this purpose, 1:5 scale models of classrooms 105 of the PSAU, 101 of the PSHN, and 203 of the PSS were built.

### 2.1. Verification of lighting levels in educational spaces.

The PSAU, PSS, and PSHN facilities house an average of 460 students each and have four levels. The average age of construction is 12 years, and the varied orientations of their facades were ideal for the measurements. Three categories of educational spaces were identified: classrooms, libraries, and computer laboratories, which are commonly used at the university.

In the PSAU, 17 classrooms, a library, and a computer center were identified, with 7 of these classrooms oriented with an azimuth of 85° and 10 classrooms oriented with an azimuth of 175°. The PSHN has 9 classrooms, a computer center, and a laboratory, all oriented with an azimuth of 82°, and 5 classrooms and a computer center oriented with an azimuth of 170°. The PSS has 10 classrooms, a library, and a computer center oriented with an azimuth of 12°, 5 classrooms, a library, and a computer center oriented with an azimuth of 105°. These spaces were considered for lighting evaluation.

Data were obtained via a UNI-T UT382 digital luxmeter. The measurements were performed in two stages. The first stage consisted of measuring the illumination levels in the UTC-5 time period. The monitoring stations were installed at an average height of 1.10 m, corresponding to the students' viewing level, at the centers of gravity of the educational spaces of the PSAU, PSHN, and PSS. The measurements were carried out in three periods—morning (7:00 am to 9:00 am), noon (11:00 am to 1:00 pm) and night (5:00 pm to 7:00 pm) for three months: September, October and November 2023.

These data were analyzed using jamovi 2.3.28, applying descriptive statistics (frequency analysis and point estimates), identifying the energy efficiency of each educational space in terms of its monthly consumption. In addition, the data allowed



the identification of environments with lower extreme values, fundamental information for the second stage. In this stage, the illuminance levels in classrooms 105 (PSAU), 101 (PSHN), and 203 (PSS) were reevaluated via the grid method according to ISO 8995, with a mean of  $K = 1.14$  for the grid nodes and 9 central measurement points. The objective was to establish the average illuminance with a contrast value of 300 lux for classrooms and 500 lux for laboratories, according to the national standard G 0.40 of the National Building Regulations in Peru, and international standards such as ISO 8995-1:2002/CIE S 008/E:2001, the Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) and the European Committee for Standardization (EN 12464-1). The values obtained for light uniformity, measured in the morning, at noon, and at night during December 2023, were compared.



Figure 1 Locations of the university campuses and professional schools used for sampling.

## 2.2. Prototype solar tube and fiber optic system for the design of educational spaces.

An experimental daylighting system was developed using 2" diameter PVC pipes designed with the functional characteristics of a daylighting receiver, transmitter, and diffuser. The system incorporates 2" PVC pipes with variable lengths adapted to each study module, as well as PVC elbows internally lined with aluminum foil to improve light transmission by reflection. For focused light reception, a truncated cone made of trapezoidal mirrors was used, with diameters of 3" at the widest part and 1" at the narrowest part. For optimal light transmission through the tubes, a PMMA plastic solar Fresnel lens with a focal length of 300 mm and a thickness of 2 mm was used, offering a high transmission of 92% and 3x magnification, optimizing the solar energy concentration for efficient conversion, as shown in Figure 2. The system also includes a two-axis passive solar tracker with manual position adjustment, mounted on an H-shaped metal bracket specifically designed for the Fresnel lens concentrator, with an adjustable height of 30 cm by additional strapping. The Fresnel lens was positioned on this bracket and manually adjusted to maximize its efficiency. The projection point of the light beam provided by the solar concentrator was used as the illumination terminal.

For the measurements, 1:5 scale prototypes were built of three classrooms with the greatest lighting deficiencies according to previously collected data. The prototypes were built to full scale concerning doors and windows, using MDF material and wood structure, and adapted to the following specific dimensions: classroom 105 of the PSAU, located on the first level with dimensions of  $9.10 \times 6.85$  m, as shown in Figure 3a; PSHN classroom 101, also on the first level with dimensions of  $7.75 \times 6.80$  m, as shown in Figure 3b; and PSS classroom 101, located on the second level with dimensions of  $5.60 \times 6.80$  m, as shown in Figure 3c. The prototype was installed at points with lower illumination according to the grid method, placing the Fresnel lens solar concentrator on the upper exterior part, close to the point with lower illumination and oriented to the north, defining the angle of incidence of the sun using the azimuth and elevation angles, considering the day. This concentrator focuses the scattered sunlight and directs it toward the solar dome, which acts as a receiver to enhance natural lighting through trapezoidal mirrors. The emitted daylight passes through the aluminum tubes, which are arranged vertically and horizontally,

and at bends with an axial angle of incidence, the light rays pass directly along the tube without interreflecting with the inner surface of the tube, contributing to the efficiency of light transmission. Finally, the light reaches the diffuser in the form of a ring or soffit, distributing the illumination uniformly in the environment.



Figure 2 Design of the prototype reflector system with solar tubes.

The statistical software Jamovi, version 2.3.28, was used to conduct the inferential analysis of the data. First, the Kolmogorov-Smirnov normality test was applied, which yielded a P-value greater than 0.05. This result indicates that the lighting data follow a normal distribution, allowing the use of parametric tests for comparative analysis. Subsequently, an independent samples t-test was conducted to assess the differences in lighting levels between the control and experimental groups. The results of this test showed a P-value less than 0.05, indicating the presence of a statistically significant difference between the two groups. Specifically, it was observed that the environments with higher lighting deficits experienced a significant increase in lighting levels in the experimental group following the intervention, in contrast to the control group, which received no modification.

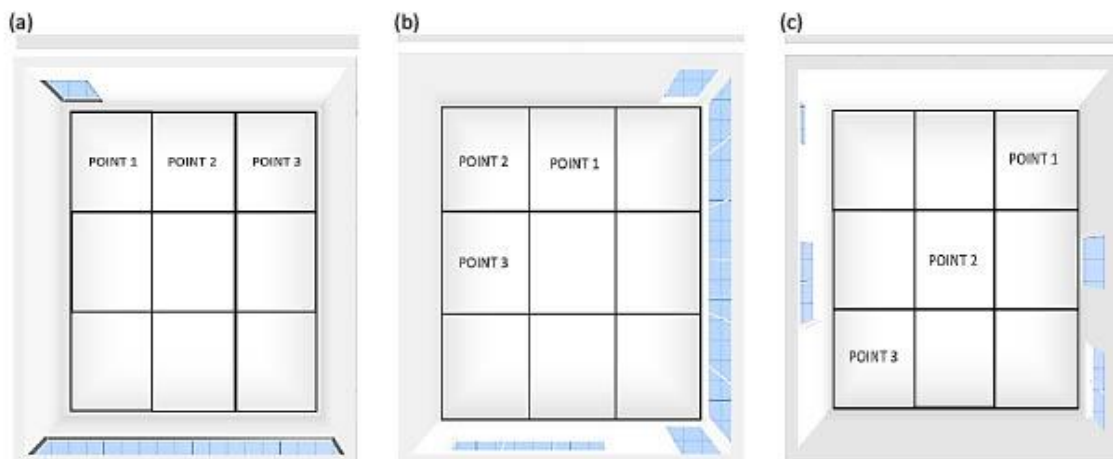


Figure 3 Samples with higher luminance deficits: (a) classroom 105 PSAU, (b) classroom 101 PSHN, (c) classroom 203 PSS.

### 3. Results and Discussion

In the analysis of illuminance levels in the classrooms of different projective entities (PSAU, PSHN, PSS) in the city of Puno, Peru, located at more than 3800 masl, significant variations were observed between floors and periods of the day. In the PSAU, floors 1 and 2 presented insufficient illumination levels during the morning (288.34 and 286.00 lux, respectively) and



night (311.74 and 308.86 lux), whereas floor 3 presented adequate levels in all periods, especially in the morning (664.55 lux) and at noon (634.85 lux). In the PSHN, high illuminance was highlighted on floor 1 during the morning (717.55 lux) and evening (1021.22 lux), but it noticeably decreased at midday (299.85 lux). The PSS showed a more consistent performance, with adequate levels on all floors and during all periods, with floor 3 standing out at night (930.78 lux). However, despite some high values, many classrooms did not consistently meet the international standard of 300 and 500 lux, especially at night and on the lower floors.

These results highlight the need to improve the lighting infrastructure to ensure an optimal and compliant study environment, particularly in high-altitude regions where the quality of natural lighting can be affected by climatic and geographic conditions.

### 3.1. Lighting levels in educational spaces

#### 3.1.1. The illuminance levels in professional schools PSAU, PSHN, PSS were evaluated.

The study was carried out considering various lighting standards, including the Technical Standard G.050 of the Peruvian national building regulations, ISO 8995-1:2002, the Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), and the European standard EN 12464-1. These standards establish minimum lighting requirements for different types of educational spaces, requiring a minimum of 300 lux for general classrooms and 500 lux for specific areas such as laboratories, the results of which are shown in Table 1.

**Table 1** Results of national and international regulatory compliance in the PSAU, PSHN and PSS educational spaces.

P.S	Floor	Period	G.050	ISO 8995 <sup>a</sup>	ISO 8995 <sup>b</sup>	IESNA <sup>a</sup>	IESNA <sup>b</sup>	EN 12464-1 <sup>a</sup>	EN 12464-1 <sup>b</sup>	
PSAU	1	morning	No	No	No	No	No	No	No	
	1	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	1	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	2	morning	No	No	No	No	No	No	No	
	2	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	2	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	3	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
	3	midday	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
	3	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	4	morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	4	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	4	night	No	No	No	No	No	No	No	
	PSHN	1	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
		1	midday	No	No	No	No	No	No	No
		1	night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
		2	morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
2		midday	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
2		night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
3		morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
3		midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
3		night	No	No	No	No	No	No	No	
PSS		2	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
		2	midday	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
		2	night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	3	morning	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
	3	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	3	night	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
	4	morning	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	4	midday	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	
	4	night	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	

(a) Comparison with 300 lux for classrooms, (b) comparison with 500 lux for laboratories.

Table 1 shows that compliance with lighting regulations varies significantly across professional schools and floors. Overall, the PSAU has poor compliance, especially on floors 1 and 2, where illuminance levels do not reach the 500 lux recommended by international standards in any period. PSHN performs better on floors 1 and 2, especially during the night, but still does not consistently meet 500 lux at midday. The PSS stands out for its high compliance, particularly on floors 2 and 3, although floor 4 does not meet 500 lux in any period.

These findings underscore the need to improve the lighting infrastructure in classrooms, especially for floors and periods where lighting levels are insufficient to meet international standards. This is crucial to ensure an optimal and adequate study environment in Puno, a high-altitude region where geographical conditions can affect the quality of natural lighting. The

lux, and the minimum value was 174.17 lux, failing to meet the requirements. At midday, the average value was 588.67 lux, and the minimum value was 279.33 lux, which also failed to meet the requirements. At night, the values were 445 lux on average and 222.5 lux at minimum, meeting the requirements. The lighting uniformity did not meet the requirements in the morning and midday shifts but was adequate in the night shifts, as shown in Figure 4c.

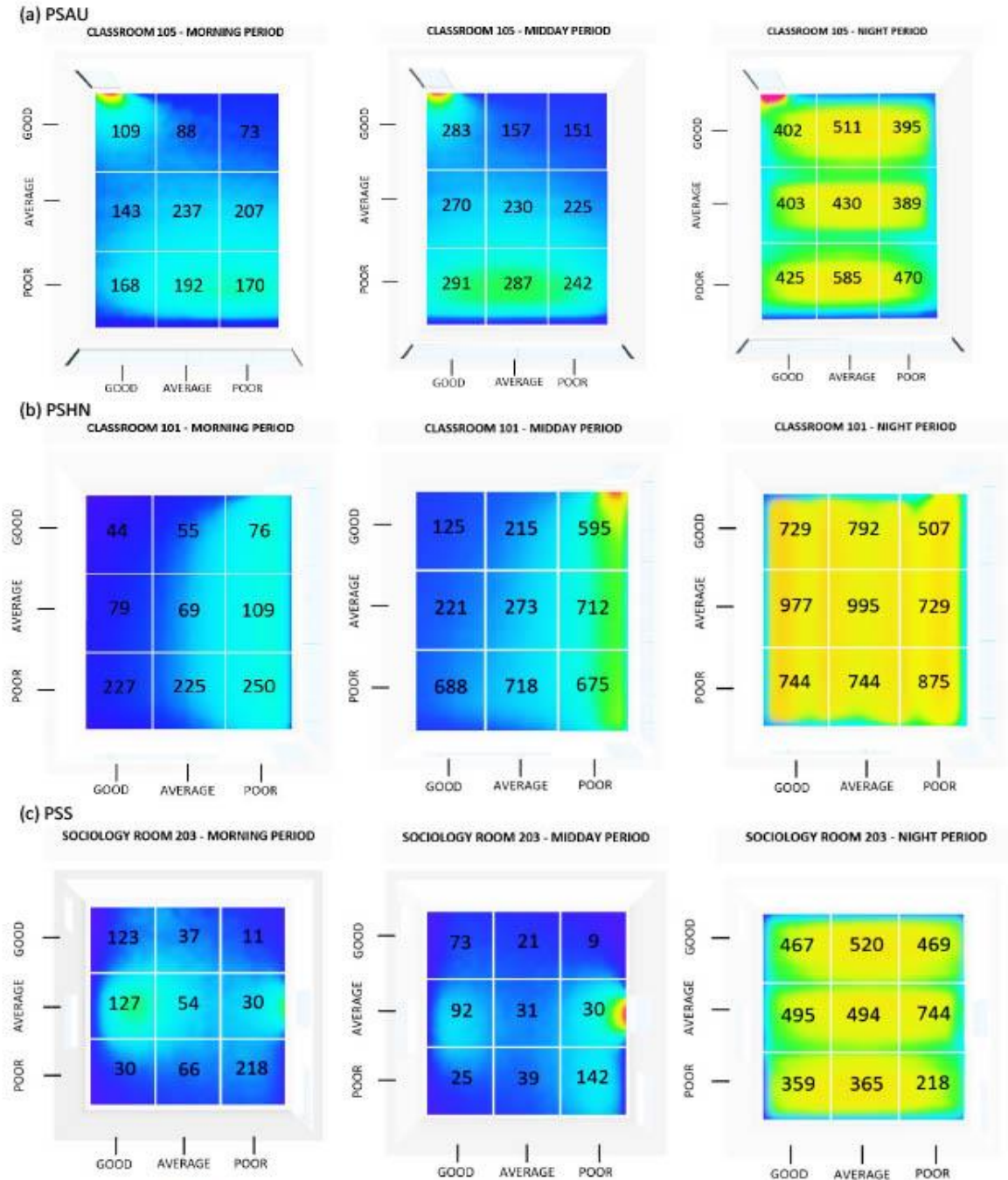


Figure 4 Analysis of Lighting Uniformity in Classrooms 105 of PSAU, 101 of PSHN, and 203 of PSS.



A comparative analysis of the three professional schools revealed that classrooms 105 in the PSAU, 101 in the PSHN, and 203 in the PSS presented significant deficiencies in terms of lighting levels, especially during the morning and midday periods. These results underscore the need for a comprehensive review and improvement in the design and distribution of lighting to meet established quality standards and provide an optimal environment for academic performance. Improving the lighting infrastructure is crucial to ensure that illuminance levels consistently meet regulatory requirements and to enhance the study environment for students and educational staff.

### 3.2. Prototype of the Solar Tube and Fiber Optic System for the Design of Educational Spaces

The results in Table 2 show significant differences in illuminance levels between the control and experimental groups across all periods of the day (morning, midday, and night). In the Professional School of Architecture and Urbanism (PSAU), the lighting levels without the prototype were low, as shown in Figure 5a, with an average of 7.42 lux in the morning at point 1, increasing to 15.03 lux at point 2 and 8.31 lux at point 3. With the prototype, as shown in Figure 5b, these levels increased significantly to 317.21 lux, 231.38 lux, and 196.66 lux, respectively.

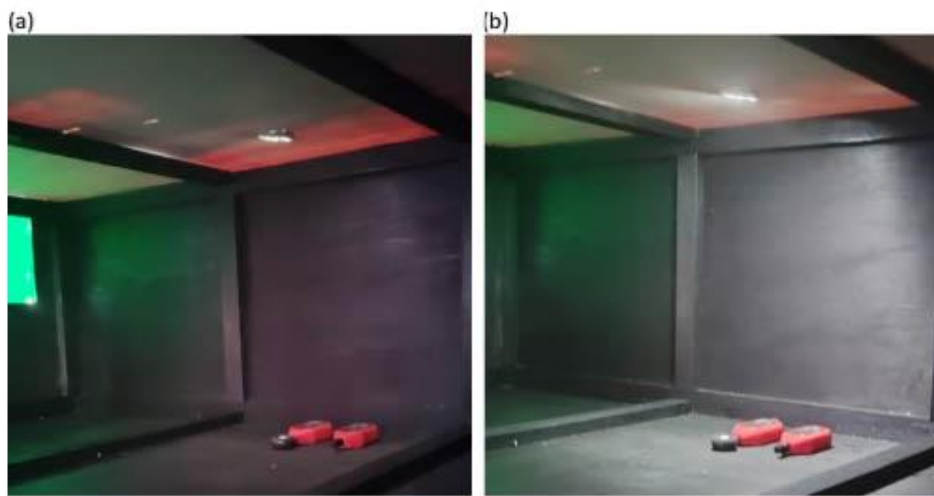


Figure 5 Scale model measurements of the (a) control group and (b) experimental group.

Table 2 Comparative results with the installation of the solar tube prototype in 1:5 scale models.

Period	Muestra	PSAU		PSHN		PSS	
		CG <sup>a</sup>	EG <sup>b</sup>	CG <sup>a</sup>	EG <sup>b</sup>	CG <sup>a</sup>	EG <sup>b</sup>
Morning	P1	7.42	317.21	11.82	119.50	14.33	918.46
	P2	15.03	231.38	7.85	278.11	11.01	280.29
	P3	8.31	196.66	27.18	312.19	18.59	155.62
Midday	P1	14.78	396.47	21.35	231.22	30.66	229.06
	P2	11.14	300.29	35.58	380.08	17.12	321.45
	P3	7.67	388.97	24.87	474.49	12.82	228.49
Night	P1	79.79	387.81	26.55	320.84	13.05	331.22
	P2	73.44	478.06	35.39	261.01	22.42	336.48
	P3	65.58	459.41	37.50	349.58	17.30	287.73

(a) Control group, (b) Experimental group.

The results obtained in the professional schools of the Universidad Nacional del Altiplano de Puno demonstrate the significant effectiveness of solar tubes as a natural lighting system. The lighting levels achieved in the Professional School of Architecture and Urbanism (EPAU) at 350.70 lux, the Professional School of Human Nutrition (EPNH) at 303.00 lux, and the Professional School of Sociology (EPS) at 343.20 lux, confirm the ability of these systems to provide adequate lighting in educational spaces. These findings align with recent research supporting the effectiveness of tubular daylighting devices (TDDs) for illuminating indoor spaces (Fernandes et al., 2023). Furthermore, the observed effectiveness is in line with previous studies that have shown that glass-domed systems are particularly efficient in educational spaces, especially during winter months (Sibley et al., 2020).

In terms of economic efficiency, the implementation of the system has shown substantial benefits at all three vocational schools. At EPAU, monthly savings reach 648.67 soles, at EPNH a savings of 432.95 soles, and at EPS a savings of 351.10 soles,

representing an average reduction of 28.89% in operating costs. This optimization of energy consumption and the consequent reduction in costs is in line with the findings of similar research in other institutions (García-Fernández et al., 2023). However, it is important to consider that, as pointed out by some researchers, the widespread implementation of these systems faces significant challenges, mainly related to initial costs and variability in their efficiency (El-saggan et al., 2023). From a technical perspective, recent research suggests possible improvements in system efficiency through the incorporation of specific technologies. For example, the use of Fresnel lenses as a concentrating medium has demonstrated significant advantages in terms of photometric simplicity and cost-effectiveness (Upadhyay et al., 2024). This information is valuable for future optimizations of the system implemented at the three professional schools studied.

The results observed at EPAU, EPNH, and EPS have implications beyond energy and economic savings. Improved lighting levels contribute directly to the creation of a more comfortable and efficient learning environment, which can have a positive impact on student academic performance. This aspect is supported by research highlighting the importance of natural lighting in work and study spaces (Fernandes et al., 2023). Furthermore, the significant reduction in energy consumption demonstrates the potential of these systems to contribute to environmental sustainability in educational buildings, an increasingly crucial aspect in the current context.

However, it is important to consider the limitations and challenges identified in recent research. El-saggan et al. (2023) point out that, despite the demonstrated potential to improve sustainability in lighting, there are significant barriers to be addressed, such as high implementation costs and variations in efficiency depending on specific environmental conditions. These aspects must be considered in planning future implementations and developing strategies to optimize long-term performance at the three vocational schools.

Overall, the implementation of solar tubes at EPAU, EPNH, and EPS proves to be an effective solution that balances lighting needs with energy efficiency. The positive results in terms of economic savings and improved lighting, supported by recent international literature, suggest that this technology represents a viable investment for educational institutions, especially when considering the long-term benefits in terms of sustainability and user comfort. The evidence accumulated both in this study and in the existing literature points to the importance of continuing to research and optimize these systems to maximize their efficiency and overcome current limitations.

## 5. Conclusions

The lighting levels in the educational spaces of UNA-Puno show significant deficiencies that impact energy efficiency and occupant comfort. The data obtained show that classrooms on the lower floors have insufficient lighting levels. The analysis of energy consumption and associated costs revealed significant variations in consumption levels and associated costs. The average monthly consumption of the three schools is approximately 1328.77 kWh, with an average monthly cost of 4959.2 soles and an average annual cost of 59510.4 nuevos soles.

The implementation of the natural lighting prototype based on solar tubes proved to be an effective solution to improve lighting levels in classrooms with the greatest lighting deficit. The experimental results indicated a significant increase in lighting levels, reaching and exceeding the recommended standards, which could lead to a reduction in electricity consumption due to a lower need for artificial lighting.

It is essential to consider adopting these technologies in the design and renovation of educational infrastructures, especially in regions with challenging geographical and climatic conditions, such as Puno. Additionally, further studies are suggested to evaluate the long-term impact of these interventions and explore other sustainable lighting technologies that can complement existing systems. Integrating natural lighting solutions into the architectural design of educational buildings is crucial for achieving sustainable and energy-efficient spaces, significantly improving the quality of the learning environment and reducing the operating costs associated with energy consumption. This strategy not only optimizes energy efficiency but also contributes to better academic performance and the well-being of students and educational staff.

## Ethical considerations

Not applicable.

## Conflict of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

## Funding

This research did not receive any financial support.

## References

Arvizu-Piña, V. A., Armendáriz López, J. F., García González, A. A., & Barrera Alarcón, I. G. (2023). An open access online tool for LCA in building's early design stage in the Latin American context: A screening LCA case study for a bioclimatic building. *Energy and Buildings*, 295, 113269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113269>



- Baydoğan, M. Ç., & Özkantar, V. (2023). Evaluation of daylight performance metrics according to country guidelines: The case of educational buildings in Turkey. *Energy and Buildings*, 297, 113487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113487>
- Bosu, I., Mahmoud, H., Ookawara, S., & Hassan, H. (2023). Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review. *Solar Energy*, 259, 188–228. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.006>
- Budhiyanto, A., & Chiou, Y.-S. (2024). Visual comfort and energy savings in classrooms using surveillance camera derived HDR images for lighting and daylighting control system. *Journal of Building Engineering*, 86, 108841. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.108841>
- Cloete, S., Arnaiz del Pozo, C., Cloete, J. H., & Jiménez Álvaro, Á. (2023). The future of fuels: Uncertainty quantification study of mid-century ammonia and methanol production costs. *Energy Conversion and Management*, 297, 117701. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117701>
- Degefu, M. A., & Kifle, F. (2024). Impacts of climate variability on the vegetable production of urban farmers in the Addis Ababa metropolitan area: Nexus of climate-smart agricultural technologies. *Climate Services*, 33, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100430>
- El-Saggan, M. E., Abdelrahman, A. R., Aissa, W. A., & Reda, A. M. A. (2023). A review of the evolution of daylighting applications and systems over time for green buildings. *International Journal of Applied Energy Systems*, 5(2), 31–47. [https://ijaes-journals.ekb.eg/article\\_292026.html](https://ijaes-journals.ekb.eg/article_292026.html)
- Fernandes, L. L., & Regnier, C. M. (2023). Lighting and visual comfort performance of commercially available tubular daylight devices. *Solar Energy*, 251, 420–437. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.022>
- Fernández-Ahumada, L. M., Osuna-Mérida, M., López-Sánchez, J., Gómez-Uceda, F. J., López-Luque, R., & Varo-Martínez, M. (2022). Use of polar heliostats to improve levels of natural lighting inside buildings with little access to sunlight. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(16), 5996. <https://doi.org/10.3390/s22165996>
- Galeano, S. E. A., & Betanco, J. A. (2021). Eficiencia energética: Una tarea para las universidades. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 166–177. <https://www.lamjol.info/index.php/FAREM/article/view/11617/13480>
- García-Fernández, B., & Omar, O. (2023). Integrated innovative solar lighting system for optimization of daylight utilization for public library in Alexandria, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(1), 101819. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101819>
- Hota, S. P. (2023). Education infrastructure, expenditure, enrollment & economic development in Odisha, India. *International Journal of Educational Development*, 103, 102903. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2023.102903>
- Inchuña, J. N. B., Calisaya Rojas, L. C., & Mamani, G. M. (2024). Designing resilient bicycle paths in Puno, Peru: Combating urban CO<sub>2</sub> emissions with GIS analysis. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 11(5), 96–102. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2024.05.010>
- Kartal, M. T., Magazzino, C., & Pata, U. K. (2024). Marginal effect of electricity generation on CO<sub>2</sub> emissions: Disaggregated level evidence from China by KRLS method and high-frequency daily data. *Energy Strategy Reviews*, 53, 101382. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101382>
- Mazzeo, D., Leva, S., Matera, N., Kontoleon, K. J., Saboor, S., Pirouz, B., & Elkadeem, M. R. (2023). A user-friendly and accurate machine learning tool for the evaluation of the worldwide yearly photovoltaic electricity production. *Energy Reports*, 9, 6267–6294. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.221>
- Moazzen, N., Karagüler, M. E., & Ashrafian, T. (2021). Comprehensive parameters for the definition of nearly zero energy and cost optimal levels considering the life cycle energy and thermal comfort of school buildings. *Energy and Buildings*, 253, 111487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111487>
- Ocaña Miguel, A. (2022). *Análisis teórico-experimental de eficiencia energética en infraestructuras urbanas*. UMA Editorial. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/25437>
- Pourasi, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports*, 10, 3474–3493. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.022>
- Ramos, I. S., Grau, J. F. R., Garrido, F. M., & Martín, D. M. (2022). Energy and comfort: The historical evolution of the façade in Western architecture. *VLC Architecture Research Journal*, 9(2), 179–200. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8669003>
- Re, M. G., & Bianchi, M. F. (2020). Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética en edificios escolares existentes. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 45, 7. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/156390>
- Sánchez, O., & David, R. (2022). Evolución urbana sostenible a través de las instalaciones de iluminación. *UMA Editorial*. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/25446>
- Santos, M. D. V. (2022). Los espacios educativos y su relación comunitaria en Quebrada Verde Pachacamac, Lima, Perú: Un análisis sobre la calidad. *REVISTA NODO*, 16(32), 74–97. <https://doi.org/10.54104/nodo.v16n32.1353>
- Sibley, M., & Peña-García, A. (2020). ¿Vidrio plano o abertura de cúpula de cristal? Un análisis comparativo de un año de duración del rendimiento de los conductos de luz en entornos residenciales reales y condiciones climáticas. *Sustainability*, 12(9), 3858. <https://doi.org/10.3390/su12093858>
- Upadhyay, P., Kuchhal, P., & Mondal, S. (2024). A review of the use of different technologies/methods for the transmission of solar radiation for lighting purposes using optical fibers. *Renewable Energy Focus*, 50, 100614. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100614>
- Usta, P., & Zengin, B. (2021). Energy assessment of different building materials in the education building. *Energy Reports*, 7, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.126>
- Vaisi, S., Firouzi, M., & Varmazyari, P. (2022). Energy benchmarking for secondary school buildings, applying the Top-Down approach. *Energy and Buildings*, 279, 112689. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112689>
- Wang, B., Zhang, X., Zhang, M., Cui, Y., & He, Y. (2024). Development of novel variable building skin with solar concentrating technology for obtaining energy benefits and optimizing indoor daylighting. *Energy and Buildings*, 310, 114081. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114081>
- Zhang, M., Gao, X., Luo, Q., Lin, S., Lyu, M., Luo, X., Ke, C., & You, W. (2024). Risk assessment of persistent exposure to artificial light at night revealed altered behavior and metabolic patterns of marine nocturnal shellfish. *Ecological Indicators*, 160, 111807. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111807>
- Zhang, Y., Chen, W., Yang, H., & Wang, H. (2024). Renewable energy input strategy considering different electricity price regulation policies. *Computers & Industrial Engineering*, 190, 110092. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110092>



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo KATHY DEISY MACHACA GUTIERREZ,  
identificado con DNI 70772543 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
“ EVALUACIÓN DE FACTORES LUMÍNICOS QUE INFLUYEN EN LA  
EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA EL DISEÑO DE ESPACIOS EDUCATIVOS  
DEL CAMPUS UNIVERSITARIO DE LA UNA - PUNO ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de DICIEMBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella





## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo KATHY DEISY MACHACA GUTIERREZ,  
identificado con DNI 70772543 en mi condición de egresado de:

**Escuela Profesional**,  **Programa de Segunda Especialidad**,  **Programa de Maestría o Doctorado**

ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

informo que he elaborado el/la  **Tesis** o  **Trabajo de Investigación** denominada:

“ EVALUACIÓN DE FACTORES LUMÍNICOS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA EL DISEÑO DE ESPACIOS EDUCATIVOS DEL CAMPUS UNIVERSITARIO DE LA UNA - PUNO ”

para la obtención de  **Grado**,  **Título Profesional** o  **Segunda Especialidad**.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de DICIEMBRE del 20 24

FIRMA (obligatoria)



Huella



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo DAYANA PRISILLA APAZA SALGADO,  
identificado con DNI 76551423 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO,

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ EVALUACION DE FACTORES LUMINICOS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA  
ENERGETICA PARA EL DISEÑO DE ESPACIOS EDUCATIVOS EN EL CAMPUS  
UNIVERSITARIO DE LA UNA - PUNO ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de DICIEMBRE del 2021

FIRMA (obligatoria)



Huella



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo DAYANA PRISCILA APAZA SOLGADO,  
identificado con DNI 76551423 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO,  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"EVALUACIÓN DE FACTORES HUMÁNICOS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA  
ENERGÉTICA PARA EL DISEÑO DE ESPACIOS EDUCATIVOS EN EL CAMPO  
UNIVERSITARIO DE LA UNA-PUNO"

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de DICIEMBRE del 20 24

  
FIRMA (obligatoria)

