

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



TESIS

**VARIABILIDAD DEL ALBEDO EN ASFALTO, CONCRETO, GRASS Y
SU INFLUENCIA EN EL CALENTAMIENTO DE LA ATMÓSFERA EN
LA CIUDAD DEL CUSCO, 2023**

PRESENTADO POR:

Br. ROCIO ENRIQUEZ MEZA

Br. FABIOLA CANDIA VILLA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE FÍSICO**

ASESOR:

Dr. JULIO LUCAS WARTHON ASCARZA

CUSCO – PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: **VARIABILIDAD DEL ALBEDO EN ASFALTO, CONCRETO, GRASS Y SU INFLUENCIA EN EL CALENTAMIENTO DE LA ATMOSFERA EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2023.**

Presentado por: Br. **FABIOLA CANDIA VILLA** con DNI Nro.: 47086095.

Presentado por Br. **ROCIO ENRIQUEZ MEZA** con DNI Nro.: 23975787.

Para optar el título profesional de Físico.

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (x)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 22 de agosto de 2025.

Dr. Julio Lucas Warthon Ascarza

Nro. De DNI 23929253

Código de ORCID: 0000-0002-9242-7102

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace de Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:485775622

FABIOLA CANDIA VILLA Y ROCIO ENRIQUEZ MEZA

VARIABILIDAD DEL ALBEDO EN ASFALTO, CONCRETO, GRASS Y SU INFLUENCIA EN EL CALENTAMIENTO DE LA ATMÓSFERA

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::27259:485775622

134 páginas

Fecha de entrega

22 ago 2025, 10:21 a.m. GMT-5

20.745 palabras

Fecha de descarga

22 ago 2025, 10:27 a.m. GMT-5

106.557 caracteres

Nombre del archivo

Variabilidad del Albedo en asfalto concreto grass y su influencia en el calentamiento de la atmósfera.docx

Tamaño del archivo

13.1 MB

4% 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 15 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  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.

DEDICATORIA

Agradecer a Dios por ser mi guía, la fortaleza de seguir adelante y por permitirme cumplir una de mis metas.

A mis queridos padres, María Carmela Villa y Roman Candia, a quienes debo todo lo que soy y todo lo que he logrado hasta hoy.

A mis hijos Thiago, Lía y compañero de vida Klimton. Esta tesis es un testimonio de su amor incondicional, su apoyo constante y su fe inquebrantable en mí. A través de cada desafío y cada éxito, su presencia ha sido mi guía y mi fuerza. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo no lo hacía. Gracias por enseñarme que, con trabajo duro y determinación, no hay sueño que no pueda alcanzar. Este logro es tanto suyo como mío. Con todo mi amor y gratitud.

Fabiola Candia Villa

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía diaria.

A mi madre Luisa, por ser desde siempre mi fortaleza y ejemplo de coraje y lucha continua ante cualquier adversidad; a mi hijo Unay Alessandro, quien con su presencia me motiva a levantarme y seguir avanzando; a mis hermanos, que con su cariño y energía están siempre presentes.

A mis amigos, que de diferentes maneras estuvieron dándome ánimo y empuje para avanzar esta tesis.

Rocio Enriquez Meza

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad San Antonio Abad del Cusco, por la formación profesional brindada.

A cada uno de nuestros docentes, que fueron parte de nuestra formación profesional y su permanente apoyo con sugerencia y orientaciones durante el proceso de la elaboración de nuestra tesis.

Y, en especial, al Dr. Julio Lucas Warthon Ascarza, por brindarnos apoyo continuo para sacar adelante la tesis; su conocimiento, exigencia y paciencia nos permitió continuar con esta investigación. También agradecer al Dr. Edilberto Atao Enriquez y a la Dra. Salinova Carrillo Segura, por sus sugerencias y su paciencia.

RESUMEN

En los últimos años, la ciudad de Cusco viene presentando cambios en su infraestructura de suelos. Las principales avenidas de la ciudad presentan extensiones de asfalto y concreto; las veredas también son de concreto reduciendo las áreas verdes de grass natural. Cusco recibe radiación solar intensa debido a su altitud; sus superficies absorben y reflejan esta radiación, lo que permite cuantificarlo mediante la propiedad de albedo. Este hecho incentivó realizar la presente investigación, con el objetivo de determinar la variabilidad del albedo en asfalto, concreto, grass y su influencia en el calentamiento de la atmosfera; la metodología fue cuantitativa, experimental dado que para determinar la variabilidad del albedo de las diferentes superficies se construyó el Dispositivo Experimental para Determinación de Albedo (DEDA) que aisló luz difusa, se midió la luz solar incidente y reflejada con un radiómetro digital considerando los ángulos de 53° , 45° y 30° ; asimismo, analíticamente mediante relaciones de termodinámica y electromagnetismo, se determinó la variación de temperatura resultando que la variabilidad del albedo influye en el calentamiento de la atmosfera. Esta investigación se constituye en un primer trabajo de investigación en el campo de la Física del Medio Ambiente en nuestra región. Además, su relevancia reside en el uso de los resultados para orientar la selección de materiales de construcción y el diseño de áreas verdes.

Palabras clave: albedo, calentamiento de la atmósfera, influencia, variabilidad.

ABSTRACT

In recent years, the city of Cusco has undergone changes in its soil infrastructure. The city's main avenues feature expanses of asphalt and concrete; sidewalks are also made of concrete, reducing areas of natural grass. Cusco receives intense solar radiation due to its altitude; its surfaces absorb and reflect this radiation, which can be quantified using the property of albedo. This fact prompted the present research, with the aim of determining the variability of albedo in asphalt, concrete, and grass and its influence on atmospheric warming. The methodology was quantitative and experimental, given that to determine the variability of the albedo of the different surfaces, the Experimental Device for Determining Albedo (DEDA) was constructed, which isolated diffuse light. Incident and reflected sunlight was measured with a digital radiometer considering angles of 53° , 45° , and 30° . Likewise, analytically, through thermodynamic and electromagnetic relationships, the temperature variation was determined, resulting in the conclusion that albedo variability influences atmospheric warming. This research constitutes the first research work in the field of Environmental Physics in our region. Furthermore, its relevance lies in the use of the results to guide the selection of construction materials and the design of green areas.

Translated Keywords: albedo, atmospheric warming, influence, variability.

ÍNDICE

Dedicatoria	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen.....	IV
Abstract	V
Índice.....	VI
Índice de Figuras.....	X
Índice de Tablas	XIII
Introducción	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Formulación del Problema.....	2
1.2.1. Problema General	2
1.2.2. Problemas Específicos.....	3
1.4. Objetivos de la Investigación.....	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes.....	6

2.2. Bases Teóricas	8
2.2.1. Radiación Electromagnética.....	8
2.2.2. Espectro Electromagnético y Longitudes de Onda Relevantes	8
2.2.3. Radiación Visible	9
2.2.4. El Sol	9
2.2.5. Relaciones Astronómicas Tierra-Sol.....	10
2.2.6. La Declinación Solar	10
2.2.7. Cenit	11
2.2.8. Azimut Solar.....	12
2.2.9. Ángulo Horario.....	12
2.2.10. Declinación Solar (δ).....	12
2.2.11. Radiación Solar	12
2.2.12. La Radiación Solar Directa	14
2.2.13. La Radiación Solar Difusa.....	14
2.2.14. Dispersión de la Radiación.....	15
2.2.15. Vector de Poynting y la Intensidad de Radiación Solar	16
2.2.16. Intensidad de Radiación Electromagnética.....	18
2.2.17. La constante solar	20
2.2.18. La Radiometría.....	21
2.2.19. Medición de la Radiación Solar Global.....	22
2.2.20. Piranómetro	22
2.2.21. Radiómetro Digital	22
2.2.22. Interacción entre la Radiación Solar y la Superficie Terrestre: Reflexión, Absorción y Transmisión.....	23
2.2.23. Coeficiente de Reflectancia, Transmitancia y Absortancia.....	24
2.2.24. Albedo	26
2.2.25. Atmosfera	32

2.2.26. Energía Solar	33
2.2.27. Balance de Energía	36
2.2.28. Primera Ley de la Reflexión.....	36
2.2.29. Fundamentos Metodológicos.....	37
MARCO METODOLÓGICO	38
3.1. Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica	38
3.2. Tipo de Investigación.....	39
3.3. Nivel y Diseño de la Investigación	39
3.4. Unidad de Análisis	39
3.5. Población de Estudio	40
3.6. Operacionalización de Variables.	40
3.7. Hipótesis	41
3.7.1. Hipótesis General	41
3.7.2. Hipótesis Específicos	41
3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	41
3.8.1. Diseño del Equipo	42
3.8.2. Construcción de Dispositivo Experimental para la Determinación de Albedo (DEDA) .	46
3.8.3. Procedimiento.....	52
3.8.3.1. Proceso de Medición de la Intensidad de Luz Incidente y Reflejada.....	52
RESULTADOS.....	66
4.1. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información.....	66
4.2. Técnicas para Demostrar la Verdad o Falsedad de las Hipótesis Planteadas	66
4.3. Recolección de Datos y Muestra Gráfica	67

4.3.1. Muestra de Asfalto	67
4.3.2. Muestra de Concreto	73
4.3.3. Muestra de Grass	80
4.4. Análisis de la Variabilidad del Albedo	86
4.4.1. Cálculo de la Desviación Estándar Muestral:.....	87
4.5. Determinación del Calor Promedio	91
4.6. Determinación de la Temperatura Promedio del Aire Circundante	92
4.6.1. Análisis del Incremento de la Temperatura en la Atmósfera de la Ciudad de Cusco.....	93
REFERENCIAS.....	103
ANEXOS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	El espectro electromagnético y el rango de la luz visible.	9
Figura 2	Declinación Solar.	11
Figura 3	Distribución espectral de la radicación solar.	13
Figura 4	Radicación solar directa y difusa.	15
Figura 5	La Magnitud I.	17
Figura 6	Intensidad de la radiación solar durante un día en la ciudad del Cusco	18
Figura 7	Área sobre la cual incide, se refleja y transmite la luz solar.	20
Figura 8	La radiación solar en la atmosfera superior.	21
Figura 9	Radiómetro digital, medidor de luz solar.	23
Figura 10	La reflexión, absorción y transmisión en una superficie.	24
Figura 11	Radiación incidente y porcentaje de albedo.	27
Figura 12	Energía incidente y reflejada en la muestra.	34
Figura 13	Reflexión del rayo incidente.	37
Figura 14	Mapa satelital de ubicación de la Universidad San Antonio Abad del Cusco.	38
Figura 15	Prototipo DEDA construido incluido el esquema de toma de datos.	42
Figura 16	H Vista de horizontal, F vista de frente, P vista perpendicular.	43
Figura 17	H Vista de horizontal, F vista de frente, P vista perpendicular.	44
Figura 18	Prototipos del DEDA, esquema de posiciones para momento de medidas.	45
Figura 19	Colimador elaborado.	45
Figura 20	Representación de muestras de concreto, asfalto y grass.	46
Figura 21	Medidas del DEDA.	46
Figura 22	DEDA construido.	47

Figura 23	Corte de los orificios en la caja.	48
Figura 24	Instalación del colimador de luz.	48
Figura 25	DEDA para diferentes ángulos de incidencia.	49
Figura 26	Ubicación en diferentes superficies.	50
Figura 27	Muestra el desplazamiento del sol.	51
Figura 28	Ángulos considerados con respecto a la normal en la presente investigación.	52
Figura 29	Esquema del DEDA.	53
Figura 30	Luz incidente y reflejada en la muestra.	61
Figura 31	Área donde se produce la variación de temperatura.	62
Figura 32	Gráfico de la luz incidente en la muestra de asfalto para un ángulo de 53° .	68
Figura 33	Gráfico de la luz reflejada en la muestra de asfalto para un ángulo de 53° .	68
Figura 34	Gráfico de valores de albedo en la muestra de asfalto para un ángulo de 53° .	69
Figura 35	Gráfico de la luz incidente en la muestra de asfalto para un ángulo de 45° .	70
Figura 36	Gráfico de la luz reflejada en la muestra de asfalto para un ángulo de 45° .	70
Figura 37	Gráfico de valores de albedo en la muestra de asfalto para un ángulo de 45° .	71
Figura 38	Gráfico de la luz incidente en la muestra de asfalto para un ángulo de 30° .	72
Figura 39	Gráfico de la luz reflejada en la muestra de grass para un ángulo de 30° .	72
Figura 40	Gráfico de los valores del albedo en la muestra de asfalto para un ángulo de 30° .	73
Figura 41	Gráfico de luz incidente en la muestra de concreto para un ángulo de 53° .	74
Figura 42	Gráfico de la luz reflejada en la muestra de concreto para un ángulo de 53° .	75
Figura 43	Gráfico de los valores del albedo en la muestra de concreto para un ángulo de 53° .	75
Figura 44	Gráfico de la luz incidente en la muestra de concreto para un ángulo de 45° .	76
Figura 45	Gráfico de la luz reflejada en la muestra de concreto para un ángulo de 45° .	77

Figura 46 Gráfico de valores albedo en la muestra de concreto para un ángulo de 45°.	77
Figura 47 Gráfico de la luz incidente en la muestra de concreto para un ángulo de 30°.	78
Figura 48 Gráfico de la luz reflejada en la muestra de concreto para un ángulo de 30°.	79
Figura 49 Gráfico de valores albedo en la muestra de concreto para un ángulo de 30°.	79
Figura 50 Gráfico de la luz incidente en la muestra de Grass para un ángulo de 53°.	81
Figura 51 Gráfico de la luz reflejada en la muestra de Grass para un ángulo de 53°.	81
Figura 52 Gráfico de valores de albedo para la muestra de Grass en el ángulo de 53°.	82
Figura 53 Gráfico de la luz incidente en la muestra de Grass para un ángulo de 45°.	83
Figura 54 Gráfico de la luz reflejada en la muestra de Grass para un ángulo de 45°.	83
Figura 55 Gráfico de los valores del albedo en la muestra de grass para un ángulo de 45°.	84
Figura 56 Gráfico de la luz incidente en muestra de grass para un ángulo de 30°.	85
Figura 57 Gráfico de la luz reflejada en muestra de Grass para un ángulo de 30°.	85
Figura 58 Gráfico de los valores del albedo en la muestra de grass para un ángulo de 30°.	86
Figura 59 Análisis de la variabilidad del albedo según el ángulo de incidencia y cada muestra.	87
Figura 60 Área de la atmosfera de la ciudad de Cusco.	94
Figura 61 Área y volumen equivalente a la ciudad del Cusco.	94
Figura 62 Ubicación de DEDAs en espera de ingreso de luz incidente	110
Figura 63 Inicio de ingreso de luz solar incidente	110
Figura 64 Luz solar incidente completo listo para medir	111
Figura 65 Ubicación del sensor para medir el rayo de sol incidente.	111
Figura 66 Medición de luz solar incidente y la luz solar reflejada en asfalto.	112
Figura 67 Medición de luz incidente y reflejada en concreto	112
Figura 68 Medición de luz incidente y reflejada en grass	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Albedo de superficies de pavimentos.	30
Tabla 2	Albedo de superficies de césped.	32
Tabla 3	Cuadro de operacionalización de variables.	40
Tabla 4	Registro de mediciones.	53
Tabla 5	Recolección de medidas para el asfalto a 53°.	54
Tabla 6	Recolección de medidas para asfalto a 45°.	55
Tabla 7	Recolección de medidas para asfalto a 30°.	55
Tabla 8	Recolección de medidas para concreto a 53°.	56
Tabla 9	Recolección de datos para el concreto a 45°.	57
Tabla 10	Recolección de datos para muestra de concreto a 30°.	57
Tabla 11	Recolección de medidas para el grass 53°.	58
Tabla 12	Recolección de medidas para el grass a 45°.	59
Tabla 13	Recolección de medidas para el grass a 30°.	59
Tabla 14	Registro de medidas de luz incidente y reflejado.	61
Tabla 15	Registro para determinar el calor $Q = \epsilon r$	63
Tabla 16	<i>Registro para determinar la variación de la temperatura del aire.</i>	65
Tabla 17	Registro de medidas para el ángulo de 53° en la muestra de asfalto.	67
Tabla 18	Registro de medidas para el ángulo de 45° en la muestra de asfalto.	69
Tabla 19	Registro de medidas para un ángulo de 30° en la muestra de asfalto.	71
Tabla 20	Registro de medidas para un ángulo de 53° en la muestra de concreto.	74
Tabla 21	Registro de medidas para un ángulo de 45° en la muestra de concreto.	76
Tabla 22	Registro de medidas para un ángulo de 30° en la muestra de concreto.	78

Tabla 23 Registro de medidas para un ángulo de 53° en la muestra de grass.	80
Tabla 24 Registro de medidas para un ángulo de 45° en la muestra de grass.	82
Tabla 25 Registro de medidas para un ángulo de 30° de la muestra grass.	84
Tabla 26 Análisis de la Variabilidad del Albedo.	87
Tabla 27 Registro de la determinación del calor $Q \approx \mathcal{E}_r$	92
Tabla 28 Obtención de la temperatura en la atmosfera de la ciudad de Cusco.....	95
Tabla 29 Resumen de albedo y variación de temperatura	96
Tabla 30 Determina las desviaciones para el asfalto	97
Tabla 31 Determina las desviaciones para el concreto	98
Tabla 32 Determina las desviaciones para el grass.....	98
Tabla 33 Tabla Resumen de desviaciones	99

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la ciudad del Cusco y a nivel nacional, existen escasos estudios sobre el albedo en diferentes materiales, lo que resalta la importancia de conocer de manera empírica esta magnitud y sus efectos en la temperatura de la atmosfera local. Para alcanzar los objetivos de esta investigación, se recurrió a información sobre albedo global, así como factores astronómicos, trigonométricos, topográficos y atmosféricos característicos de la ciudad del Cusco, los cuales inciden en el albedo generado por las superficies urbanas. En este contexto, durante las últimas décadas, se han producido importantes cambios en el uso del suelo, como el incremento de construcciones destinadas a viviendas y la habilitación de vías de transporte automotor como peatonal, aspectos que han contribuido significativamente a la modificación del albedo en la ciudad del Cusco.

Según Ramírez (2016), el albedo absoluto se define como la relación entre la radiación solar reflejada por una superficie y la radiación solar incidente sobre la misma, considerando todas las longitudes de onda de la luz solar. Este valor varía según la interacción entre la luz solar y el tipo de superficie, que tiene características espectrales y reflectividad propia. El albedo de una superficie depende de su color, composición material y rugosidad; los suelos más claros tienen un albedo mayor que los oscuros. El albedo es un factor clave en la climatología, ya que la capacidad de las superficies para reflejar la radiación solar afecta la cantidad de energía absorbida y convertida en calor.

El estudio de las interacciones entre la luz solar, la atmósfera y la superficie terrestre es fundamental para comprender y abordar los desafíos del cambio climático, tanto a nivel local como global. Estas interacciones ocurren de manera constante, ya que la radiación solar afecta a la

atmósfera y la superficie terrestre, influyendo directamente en el clima y, por lo tanto, en la vida en la Tierra. En este contexto, la presente tesis se centra en analizar cómo estas interacciones entre la luz solar y la superficie terrestre influyen en la atmósfera, contribuyendo a una mejor comprensión de los procesos electromagnéticos y termodinámicos.

El propósito de esta investigación ha sido determinar el albedo en forma experimental en superficies de concreto, asfalto y grass para posteriormente evaluar las contribuciones energéticas a la atmósfera de la ciudad del Cusco.

En la presente tesis se ha llevado a cabo la medición de la luz solar incidente y reflejada en tres tipos de superficies, asfalto, concreto y grass, lo que ha permitido determinar el albedo y cuantificar sus efectos en el calentamiento de la cuenca atmosférica de la ciudad del Cusco. Esta investigación ha evidenciado la variabilidad del albedo en función del tipo de superficie y su influencia directa en el proceso de calentamiento atmosférico. Los resultados obtenidos contribuyen al fortalecimiento del conocimiento en el campo de la climatología y la física atmosférica en el contexto local, y al mismo tiempo, ofrecen información relevante para la toma de decisiones y la planificación urbana sostenible en la ciudad del Cusco.

La metodología empleada en la presente investigación incluye la radiometría y el balance de energía. Para obtener valores del albedo, se diseñaron y construyeron tres equipos denominados “Dispositivo Experimental para Determinación de Albedo (DEDA)”, los cuales permitieron erradicar la luz solar difusa y poder medir, mediante un radiómetro digital, la luz solar incidente y la luz solar reflejada en diferentes ángulos de incidencia y reflexión. Obtenido estas mediciones, se calculó el albedo de diversos materiales. Este proceso resultó fundamental para conocer la variabilidad del albedo en diferentes muestras de superficie determinadas para la investigación.

La relevancia de esta investigación reside en el uso de los resultados para orientar la selección de materiales de construcción y el diseño de áreas verdes, contribuyendo a mitigar el calentamiento atmosférico urbano y mejorar la calidad de vida.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

La ciudad del Cusco, desde hace décadas, viene experimentando cambios como el incremento poblacional y urbano; asimismo, la contaminación del medio ambiente es incesante. En este contexto, la interacción entre la radiación solar, las superficies terrestres y la temperatura local de la atmósfera ha adquirido relevancia ambiental.

La interacción de la radiación solar con la atmósfera y la superficie terrestre es permanente. El albedo es un parámetro que mide la cantidad de luz reflejada por una superficie respecto de la luz incidente (Lodosa, 2018).

En el contexto global, la modificación del uso del suelo, en particular la tala de bosques y su conversión en áreas agrícolas o urbanizadas ha generado cambios sustanciales en el albedo del planeta, afectando el equilibrio energético de la Tierra. El albedo, que representa la proporción de radiación solar reflejada por una superficie, varía según el tipo de cobertura terrestre. Las zonas boscosas, al tener un albedo bajo, absorben una mayor cantidad de energía solar, mientras que las superficies agrícolas, más claras, reflejan una mayor parte de dicha radiación, (Bonan, 2008).

En cuanto al efecto del albedo en las políticas climáticas, se ha cuantificado el cambio en la reflectividad de regiones cubiertas de nieve y hielo en el hemisferio norte, evidenciando su retroalimentación positiva sobre el calentamiento global. El retroceso de la criosfera genera un forzamiento radiativo considerable, que equivale a más del 20 % del forzamiento provocado por las emisiones de CO₂ (Flanner et al., 2011).

En el contexto nacional, el efecto de las partículas absorbentes de luz en la nieve sobre el balance radiativo del nevado Coropuna, Arequipa, describe el problema del depósito de hollín y

polvo sobre la nieve, lo cual reduce su albedo, aumentando la absorción de radiación solar. Esta disminución del albedo acelera el derretimiento glaciar y eleva la temperatura de la superficie y la atmósfera local, donde el forzamiento radiativo calculado fue de 4.86 W/m^2 , contribuyendo significativamente al calentamiento regional (Cuadros, 2019).

El crecimiento urbano acelerado en la región de Piura en las últimas décadas ha generado cambios importantes en el uso del suelo, reemplazando áreas agrícolas y entornos naturales por superficies impermeables como concreto, asfalto y techos de metal. Esta transformación ha provocado una notable disminución del albedo en la zona, aumentando la absorción de radiación solar por parte del suelo. La reducción de la reflectividad ha incidido directamente en el incremento de la temperatura ambiental y ha potenciado el fenómeno de isla de calor urbana, lo que repercute negativamente en la calidad de vida de los habitantes y en la modificación de los microclimas locales (Zorogastúa et al., 2011).

En el contexto local, la falta de información detallada sobre cómo la variabilidad del albedo en diferentes tipos de superficies contribuye al calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco presenta una brecha significativa en el conocimiento científico y la capacidad técnica arquitectónica.

El problema científico identificado es la variabilidad del albedo en superficies asfalto, concreto y Grass, y su influencia en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo influye la variabilidad del albedo en asfalto, concreto y grass en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco, 2023?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo influye la variabilidad del albedo en asfalto en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco?
- ¿Cómo influye la variabilidad del albedo en concreto en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco?
- ¿Cómo influye la variabilidad del albedo en grass en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco?

1.3. Justificación de la Investigación

La presente investigación tuvo como objetivo contribuir a la comprensión fundamental de la relación entre la variabilidad del albedo en asfalto, concreto, grass y el calentamiento atmosférico en la ciudad del Cusco. Mediante los fundamentos teóricos en climatología y física, se pudo comprender cómo las superficies terrestres influyen en la transferencia de energía y calor a la atmósfera.

La ciudad del Cusco enfrenta desafíos derivados del cambio climático que amenazan su entorno urbano y la calidad de vida de sus habitantes. La variabilidad del albedo, que refleja la radiación solar en diferentes superficies como asfalto, concreto y grass, es un elemento clave en la dinámica de calentamiento atmosférico. Esta tesis contribuye con información científica entre el albedo y su influencia en la atmosfera de la ciudad del Cusco.

La investigación desarrollada en la ciudad del Cusco hizo posible determinar de manera experimental el albedo de superficies como el asfalto, el concreto y el grass, así como comprender su efecto en la atmósfera que las rodea. La relevancia de este estudio radica en aportar información técnica y científica que enriquezca el conocimiento sobre el cambio climático, considerando el

impacto que ejerce el albedo en el calentamiento atmosférico. Además, los valores hallados y analizados pueden aplicarse en la selección de materiales de construcción y en el diseño de áreas verdes, contribuyendo a disminuir los efectos negativos sobre el clima y a mejorar la calidad de vida de la población. Estos resultados también serán útiles para fortalecer la conciencia pública, ya que brindan evidencia clara sobre la problemática del cambio climático y la necesidad urgente de tomar medidas. La divulgación de esta información facilitará la sensibilización social respecto a la importancia de adoptar hábitos responsables y fomentar decisiones comprometidas con el cuidado ambiental, promoviendo prácticas sostenibles y acciones individuales que favorezcan la mitigación de esta problemática global.

Esta investigación contribuye al entendimiento científico de cómo las superficies terrestres estudiados en esta tesis influyen en el calentamiento atmosférico. Mediante la obtención y análisis de datos empíricos, se obtuvo información relevante sobre los diferentes materiales y su interacción con la radiación solar que incide sobre ellos. Asimismo, se pudo medir el albedo en cada caso, estos resultados proporcionarán una base sólida para guiar acciones que promuevan la resiliencia climática y el desarrollo sostenible en el Cusco y otras ciudades.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. *Objetivo General*

Determinar la variabilidad del albedo, en las superficies de asfalto, concreto y grass, y su efecto en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco - 2023.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Determinar la variabilidad del albedo en asfalto y su influencia en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.

- Determinar la variabilidad del albedo en concreto y su influencia en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco
- Determinar la variabilidad del albedo en grass y su influencia en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En el contexto internacional, el trabajo de investigación que realizó Andrés (2021) denominado *Aplicación de imágenes satelitales en energías renovables: cálculo de albedo*, considera a la radiación solar como una fuente de energía renovable que se pueda aprovechar. Expresa que ya hay estudios que cuantifican la radiación solar directa, pero que no hay metodologías estándar para la cuantificación de la luz solar reflejada o radiación reflejada, y el albedo, que es el porcentaje de radiación que una superficie refleja. Su investigación tiene como objetivo determinar la mejor metodología para la estimación del albedo a partir del uso de imágenes satelitales para cualquier lugar geográfico. Su metodología consiste en comparar metodologías satelitales, la cuantificación del albedo permite evaluar la contribución del albedo a nivel energético para ser aprovechada mediante una planta solar en la provincia de Segovia. Mientras esta investigación tiene un objetivo de aprovechamiento energético, en nuestra investigación vemos cómo el conocimiento de la variabilidad del albedo nos puede permitir evaluar su influencia en el calentamiento de la atmosfera, además de hacer un análisis sobre como las superficies consideradas en el suelo urbano pueden ser partícipes para determinar la cuantificación del albedo.

En el contexto Nacional, el trabajo realizado por Basurto (2022) en su trabajo de investigación denominado *Propuesta de concreto con adición de diatomita que aumenta la reflectancia en pavimentos para mitigar el efecto isla de calor en zonas urbanas de Lima*, determinaron que uno de los problemas que afectan a las zonas urbanas es el efecto de Isla de calor urbano. Este fenómeno consiste en la presencia de diferentes temperaturas en una misma localidad,

lo que atribuye a la disminución del confort térmico y mayor uso de recursos energéticos. Ante esta situación, consideran que una de las causas sería el uso de materiales en el pavimento que tiene baja reflectividad (albedo), lo cual cuantifica cuánto refleja la superficie de un material que hace que determine el incremento de temperatura en su entorno. El objetivo de esta investigación fue elaborar un pavimento adicionando diatomita que aumenta la reflectancia del pavimento y mitigar el efecto de isla de calor. La metodología es experimental de nivel explicativo, en la investigación varían la reflexión del concreto agregando diferentes porcentajes de diatomita y modelan un microclima mediante el software ENVI-met. En los resultados, pudieron determinar que el uso de diatomita en la composición de mezcla de pavimento aumenta la reflexión de la radiación solar, incrementando la cantidad de albedo mitigando así el efecto de isla de calor.

En el contexto local, el trabajo realizado por Pazos (2021) en su investigación denominado *Impacto del material particulado PM 2,5 en la fusión del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco 2021*, manifiesta que el efecto del cambio climático es el causante del retroceso de los glaciares en la Cordillera del Vilcabamba, así como el incremento de los gases de efecto invernadero y los diversos contaminantes que se usan en las actividades realizadas por el hombre. Considera que uno de los más contaminantes es el material particulado PM 2,5, o conocido como hollín, que tiene la capacidad de absorber la radiación solar produciendo el derretimiento glaciar. El objetivo de la investigación es determinar el impacto del material particulado PM 2,5 en la disminución de la superficie del glaciar Incachiriasca. La metodología es deductiva y cuantitativa, y utilizando el método LAHM (Light Absorption Heating Method), se determinó el material particulado y aplica el programa SNICAR (Snow, Ice, and Aerosol Radiative) para estimar la disminución del albedo en la nieve. Entre sus resultados determinó que el material particulado hace que se disminuya la masa de la nieve. Esta investigación

evidencia que un material oscuro hace que se absorba la radiación solar lo que contribuye a la disminución del albedo.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Radiación Electromagnética*

Las radiaciones electromagnéticas son campos eléctricos y magnéticos que pueden propagarse tanto a través de un medio material como en el vacío. Su diferencia fundamental radica en su frecuencia, ya que, a medida que esta se incrementa, la cantidad de energía transportada también aumenta (Sears et al., 2009).

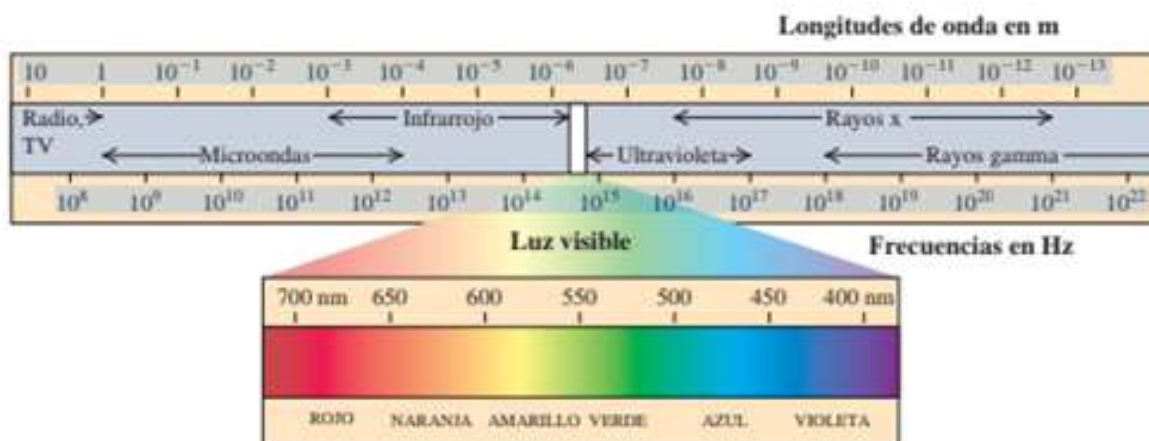
2.2.2. *Espectro Electromagnético y Longitudes de Onda Relevantes*

El espectro electromagnético es el conjunto de frecuencias y longitudes de onda electromagnética que existe en la naturaleza, y abarca desde la radiofrecuencia, las microondas, el infrarrojo, la luz visible, el ultravioleta, los rayos X, los rayos gamma y los rayos cósmicos. El ser humano puede observar un intervalo de frecuencias y longitudes de onda relativamente muy pequeñas dentro del espectro electromagnético denominado luz visible (Krauss, 1998).

De acuerdo con la Ley de Planck ($E=hf$), la energía de las ondas electromagnéticas está en relación directa con la frecuencia; a mayor frecuencia, se tiene mayor energía transportada por la onda, donde h es la constante de Planck.

Figura 1

El espectro electromagnético y el rango de la luz visible.



Nota: La figura muestra el espectro electromagnético. En la parte superior se observan las longitudes de onda, que disminuyen de izquierda a derecha, y en la parte inferior se encuentran las frecuencias, las cuales se incrementan a medida que las longitudes de onda disminuyen. Adaptado de Sears et al. (2009).

2.2.3. Radiación Visible

Según Sears et al. (2009), la radiación visible cubre un rango de longitudes de onda de aproximadamente 400 a 700 nm, y es esencial tanto para la percepción visual humana como para varias aplicaciones científicas. Usualmente, la radiación visible consta de 7 colores: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta.

2.2.4. El Sol

Es una estrella que tiene unos 4.600 millones de años de vida y se encuentra a la mitad de su existencia. Representa casi el 99% de la masa del Sistema Solar y está compuesto principalmente de hidrógeno y helio. Con una temperatura superficial de 5 600° C y un radio 110

veces mayor que el de la Tierra, se encuentra a 150 millones de kilómetros de nuestro planeta. La luz solar tarda 8,3 minutos en llegar a la Tierra. El Sol sigue un ciclo de actividad solar de 11 años, con máximos y mínimos de actividad y cambios en su campo magnético. En su superficie, aparecen manchas solares, que son áreas frías que emiten partículas cargadas; durante los máximos del ciclo se produce las denominadas eyecciones de masa coronal, las cuales pueden generar auroras (Díaz et al., 2014).

Hecht et al. (2000), también destaca la importancia del Sol en el contexto del sistema solar, ya que es el cuerpo celeste que domina gravitacionalmente a todos los planetas y otros cuerpos, manteniéndolos en órbita. Además, es crucial para los procesos atmosféricos y climáticos de la Tierra.

2.2.5. *Relaciones Astronómicas Tierra-Sol*

Diariamente se puede observar cómo el Sol parece surgir desde el este, se eleva en el cielo cambiando su altura dependiendo de la estación del año, y finalmente se oculta en el oeste.

Las relaciones astronómicas entre la Tierra y el Sol son fundamentales para la vida en el planeta, se basan en la órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol, la rotación de la Tierra sobre su eje, completando una revolución cada 24 horas y la influencia de la actividad solar. La esfera celeste es una superficie esférica imaginaria, de gran radio, cuyo centro coincide con el centro de la Tierra. Los astros del cielo, incluyendo el Sol, parecen moverse sobre esta esfera alrededor de la Tierra (Censolar, 2013).

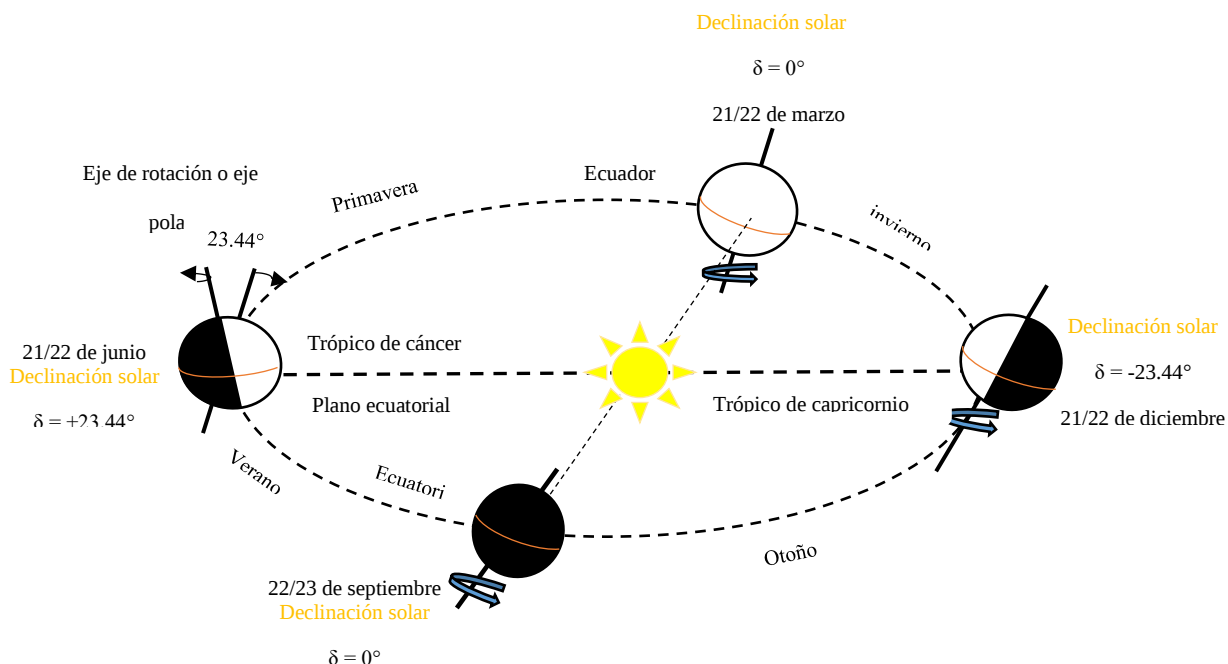
2.2.6. *La Declinación Solar*

Para Censolar (2013) la tierra órbita alrededor del Sol en un plano llamado eclíptica y rota sobre su propio eje polar, el cual está inclinado $23,5^\circ$ respecto a la normal en el plano eclíptico.

Esta rotación provoca los cambios diarios en la radiación solar que llega a la Tierra, mientras que la posición relativa del eje polar al Sol causa las variaciones estacionales en la radiación solar. Los ángulos entre el eje polar y la normal al plano eclíptico, y entre el plano ecuatorial de la Tierra y el plano eclíptico, permanecen constantes. Sin embargo, el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que une los centros del Sol y la Tierra cambia constantemente; este ángulo es conocido como declinación solar δ . Como podemos ver en la figura 2, esta muestra la declinación solar.

Figura 2

Declinación Solar.



Nota: Adaptado de Censolar (2013)

2.2.7. Cenit

Para Iqbal (1983), el ángulo cenital es el ángulo entre el cenit local (punto directamente sobre la cabeza del observador) y la línea que une al observador y al sol. Este ángulo varía entre 0 y 90 grados.

2.2.8. Azimut Solar

Según Iqbal (1983), el azimut solar o ángulo azimutal es el ángulo, en el cenit local, entre el plano meridiano (plano norte-sur) del observador y el plano del gran círculo que pasa por el cenit y el sol. Se mide de forma positiva hacia el este y negativa hacia el oeste. Este ángulo varía entre 0 y 360 grados.

2.2.9. Ángulo Horario

Iqbal (1983) señala que el ángulo entre el polo celestial y el meridiano del observador, contado en grados y cambiando aproximadamente 15 grados por hora a medida que el tiempo avanza.

2.2.10. Declinación Solar (δ)

Para Iqbal (1983), la declinación solar corresponde a la posición angular del Sol durante el día con respecto al plano del ecuador. Este ángulo varía en un rango de $\pm 23^\circ$ entre los solsticios de verano e invierno. La latitud geográfica del lugar (ϕ) corresponde a la posición angular hacia el norte o el sur del ecuador. Este ángulo varía en un rango de 90° entre los polos geográficos norte y sur, siendo positivo en el hemisferio norte, donde va desde 0° a 90° , y negativo en el hemisferio sur, donde va desde 0° hasta -90° .

2.2.11. Radiación Solar

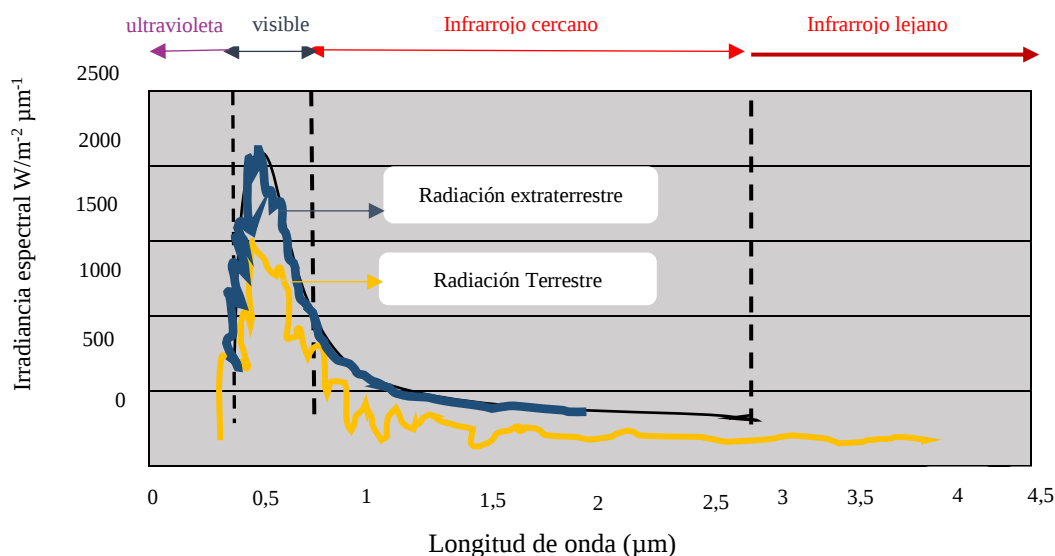
Según Sears et al. (2009), la radiación solar es la principal fuente de energía para la Tierra, y tiene efectos importantes sobre el clima, el tiempo atmosférico y los procesos biológicos, como la fotosíntesis.

Sears et al. (2009) también manifiesta que la radiación interactúa con la atmósfera terrestre de tal forma que las distintas longitudes de onda son absorbidas o reflejadas por diferentes componentes atmosféricos. Esta radiación es fundamental no solo para la vida, sino también para entender los fenómenos naturales y el uso de tecnologías basadas en energía solar.

Por su parte, Censolar (2013) expresa que la distribución espectral de la radiación solar presenta diversos niveles de intensidad, debido a la interacción con otras partículas. Algunas logran atravesar el trayecto sin colisionar significativamente con otras y sin procesos de absorción y dispersión, lo cual ocurre tanto en el trayecto desde el núcleo del Sol hasta el límite superior de la atmósfera como hasta la superficie del suelo.

Figura 3

Distribución espectral de la radiación solar.



Nota: La figura muestra la radiación incidente sobre una superficie horizontal en el tope de la atmósfera que es conocido como la radiación solar extraterrestre. Al atravesar la atmósfera, los componentes atmosféricos actúan sobre la radiación solar en parte reflejándola (nubes), en parte

absorben (ozono, oxígeno, anhídrido carbónico, vapor de agua, etc.) y en parte dispersándola (moléculas, gotas de agua y polvo en suspensión, etc.). El resultado de estos efectos es la descomposición de la radiación solar incidente sobre una superficie en dos componentes. Adaptado de Censolar (2013).

2.2.12. La Radiación Solar Directa

Según Sánchez *et al.* (2003) la radiación que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del Sol sin cambios de dirección.

Por su parte, Hecht (2000) señala que la radiación directa es aquella que proviene del Sol en línea recta hacia la superficie terrestre, sin que haya sufrido dispersión debido a las moléculas de aire, partículas u otros componentes atmosféricos. Esta radiación es responsable de la iluminación directa del Sol que se experimenta en un día despejado y es la más intensa cuando se recibe en condiciones sin nubosidad o contaminación.

2.2.13. La Radiación Solar Difusa

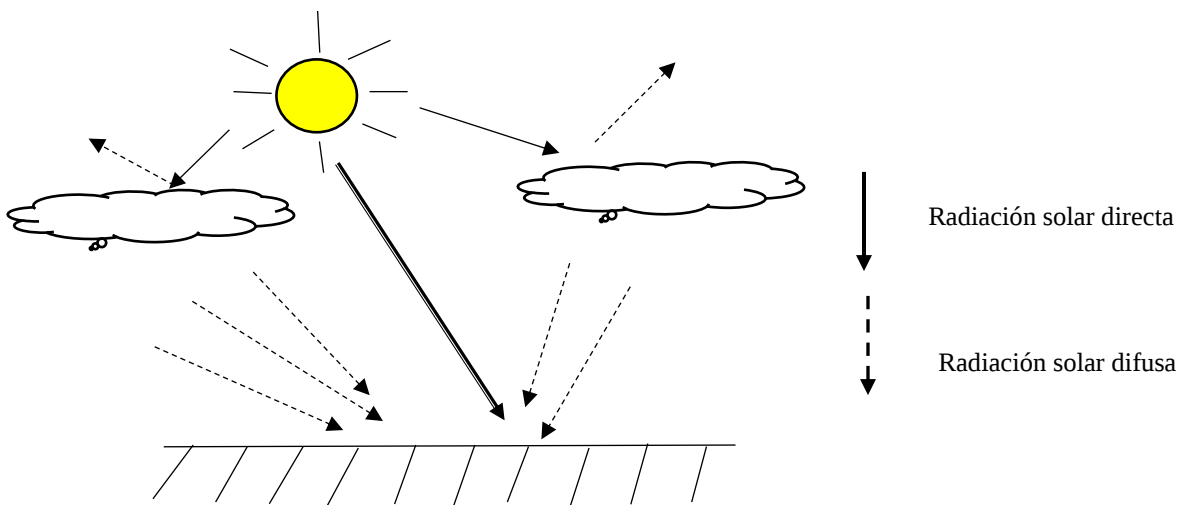
Según Hernández (1991), la distribución espectral de la radiación solar difusa se refiere a la radiación que alcanza la superficie terrestre, la cual proviene de diversas direcciones debido a los efectos de reflexión y dispersión causados por la atmósfera y las nubes.

De igual manera, Hecht (2000) indica que la radiación difusa se refiere a la luz solar que ha sido dispersada en la atmósfera debido a la interacción con moléculas, partículas y aerosoles. Como resultado de esta dispersión, la luz no llega directamente en línea recta desde el Sol, sino que proviene de diversas direcciones del cielo, proporcionando iluminación incluso cuando el Sol

no es visible directamente. Este proceso es fundamental para entender cómo la luz se distribuye y por qué el cielo está iluminado en condiciones de nubosidad o atmósfera clara.

Figura 4

Radiación solar directa y difusa.



Nota: La figura muestra la relación entre la radiación directa y difusa que interactúan en una superficie. Adaptado de Sarmiento (1995).

2.2.14. Dispersión de la Radiación

En el caso de la radiación electromagnética, los fotones son las partículas dispersadas, mientras que los "dispersantes" son las partículas y moléculas presentes en la atmósfera que interactúan con los fotones (Serrano, 2007).

Estos dispersantes pueden ser moléculas, átomos, aerosoles o vapor de agua. El comportamiento de la dispersión varía según el tamaño de las partículas: cuando el tamaño de las partículas es comparable o más pequeño que la longitud de onda de la radiación, la dispersión

tiende a ser direccional. En cambio, cuando las partículas son mucho más grandes que la longitud de onda, la radiación puede reflejarse en lugar de dispersarse, (Serrano, 2007).

La dispersión de la radiación electromagnética es provocada por las variaciones en la constante dieléctrica del medio por donde se propaga. En la atmósfera, las principales influencias que afectan la dispersión incluyen cambios en la densidad del aire y variaciones en la anisotropía de las moléculas y partículas de aerosoles, tanto en condiciones secas como húmedas (Serrano 2007).

La dispersión es el cambio de dirección que experimenta un haz de luz al interactuar con partículas o irregularidades en un medio, resultando en una distribución de la luz en múltiples direcciones. En la atmósfera, esta dispersión es responsable de la radiación difusa, que es la luz solar que llega a la superficie desde diferentes ángulos, no solo de forma directa (Hecht, 2000).

2.2.15. Vector de Poynting y la Intensidad de Radiación Solar

Según Hecht (2000), la magnitud de $\vec{S}$ es la potencia por unidad de área que cruza una superficie cuya normal es paralela a $\vec{S}$.

$$\vec{S}_x = \vec{E}_y \times \vec{H}_z \quad (1)$$

Donde $\vec{S}_x$: es el vector de Poynting

Este mide el flujo de la energía electromagnética y describe la dirección de propagación de dicha energía.

El valor promedio en un intervalo de tiempo ($T \gg \tau$) de la magnitud del vector de Poynting, simbolizado por $\langle S \rangle_T$, es una medición de I.

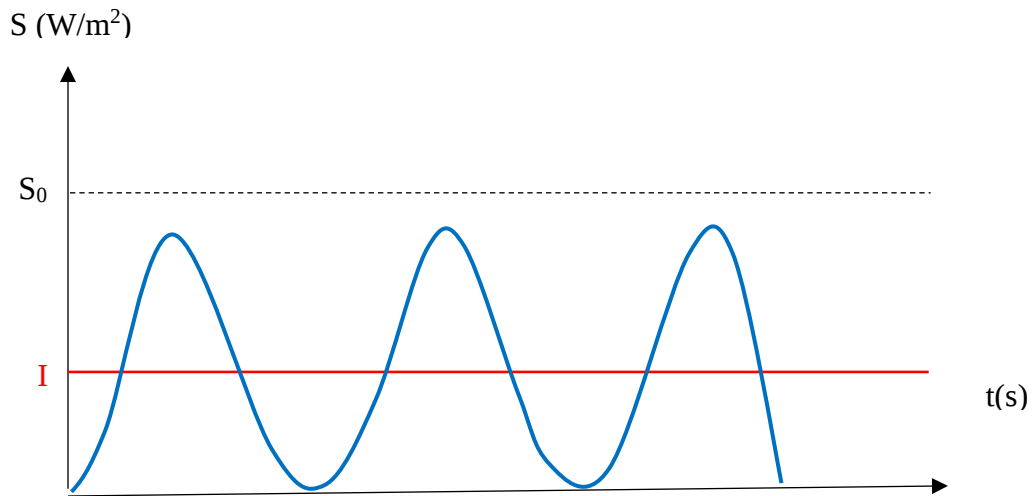
$$I = \langle S \rangle_T = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{0y}^2 \quad (2)$$

Donde I representa el valor medio de la magnitud del vector de Poynting; mide la energía por unidad de área y por unidad de tiempo.

Debido a que las ondas electromagnéticas presentan alta frecuencia, su energía (densidad de energía) también varía a esa misma rapidez. Por esta razón, y para situaciones prácticas se emplea la magnitud I.

Figura 5

La Magnitud I.



Nota: Adaptado de Krauss (1998)

$$\vec{S}_x = \vec{E}_y \times \vec{H}_z = EH\hat{i} = E_{0y} \sin(kx - \omega t) H_{0z} \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$= E_{0y} H_{0z} \sin^2(kx - \omega t) \hat{i} \quad (4)$$

Donde la magnitud del vector de Poynting es:

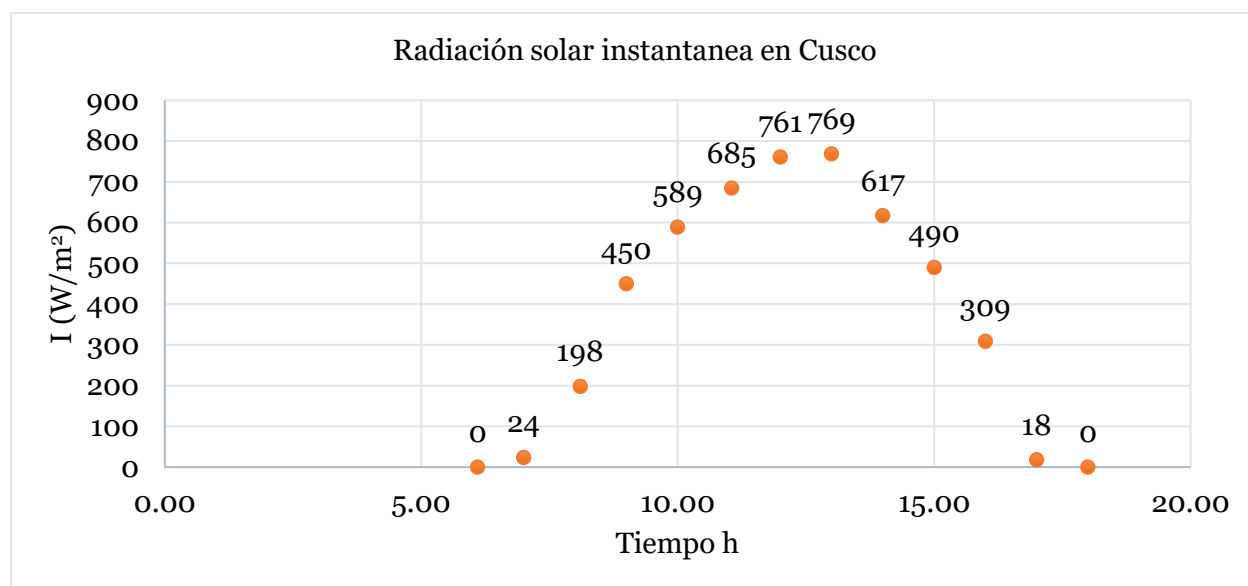
$$S = S_{0x} \sin^2(kx - \omega t) \quad (5)$$

La razón de emplear I es que los instrumentos, como el radiómetro, pueden medir este valor y no $S(x,t)$.

La intensidad de radiación solar (I) varía en el día. Es decir, cuando el cielo está despejado se puede tener el valor de I dentro de un rango aproximado en magnitud. Sin embargo, si se incorporan nubes se incorporan entonces, el valor cambia rápidamente, dependiente de la situación climática. A pesar de ello, los valores durante el día (de 6:00 a. m. a 6:00 p. m.) se encuentran en un rango de $1\ 200\ \text{W/m}^2$ aproximadamente, es decir, no puede ser mayor a este.

Figura 6

Intensidad de la radiación solar durante un día en la ciudad del Cusco



Nota: La figura muestra la variación de la intensidad de la luz solar durante un día. Datos obtenidos del Observatorio Meteorológico “Luis Olazo Olivera-Perayoc” UNSAAC (2023)

2.2.16. Intensidad de Radiación Electromagnética

Según Hecht (2000), la intensidad de una onda electromagnética corresponde a la energía que atraviesa una unidad de área en un tiempo específico, tomando en cuenta una superficie

perpendicular a la dirección en que la onda se desplaza. Esta medida indica la cantidad de potencia que la radiación transporta y varía según la distancia a la fuente emisora y las propiedades del medio por donde se transmite. En términos matemáticos, se expresa como:

$$I = \frac{P}{A} \quad (6)$$

Donde: I es la intensidad de la radiación (W/m²).

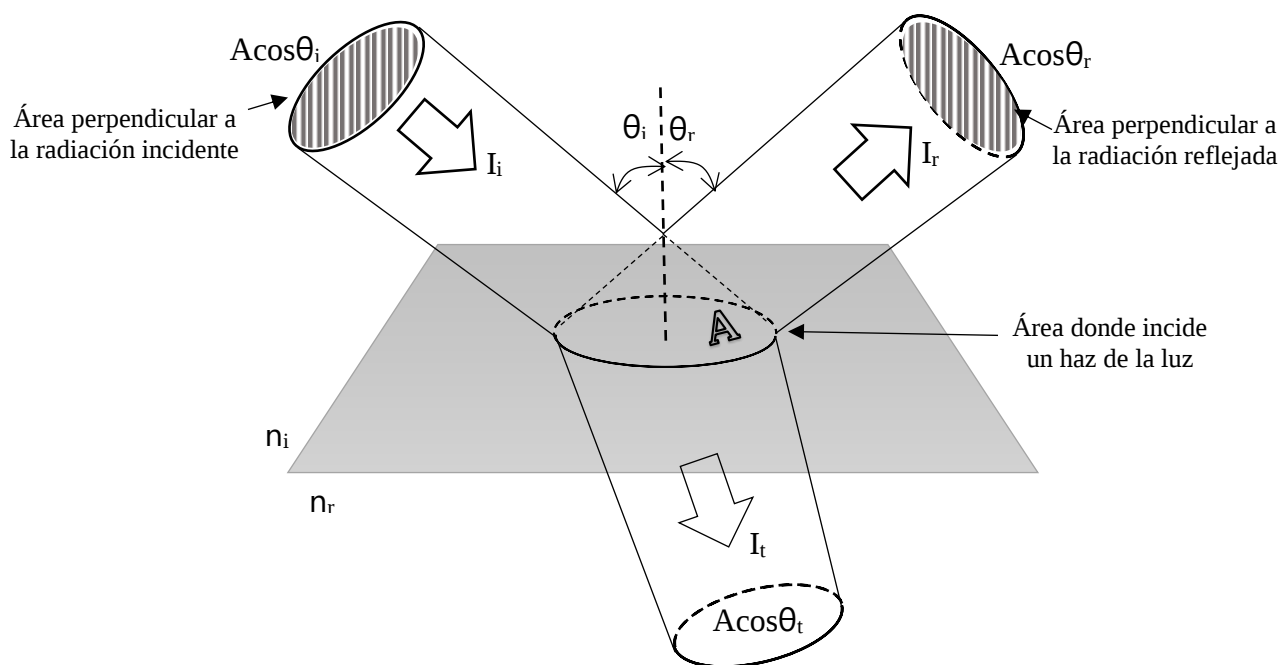
P es la potencia total de la onda electromagnética (W).

A es el área sobre la cual se distribuye la potencia (m²).

La intensidad varía dependiendo de factores como la distancia al Sol, las condiciones atmosféricas, el ángulo de incidencia de la luz y el tipo de superficie que recibe la radiación; sus características importantes son: la unidad de medida que es la intensidad de la radiación electromagnética, se mide generalmente en watts por metro cuadrado (W/m²) y la dependencia de la frecuencia y longitud de onda que es la intensidad de la radiación que también está vinculada a la frecuencia (o longitud de onda) de la onda electromagnética, ya que diferentes longitudes de onda transportan diferentes cantidades de energía. Por ejemplo, la radiación visible tiene una intensidad específica que es relevante para la fotosíntesis y otras aplicaciones, mientras que la radiación infrarroja o ultravioleta produce efectos distintos, según su energía.

Figura 7

Área sobre la cual incide, se refleja y transmite la luz solar.



Nota: En la figura se observa la radiación incidente I_i , la radiación reflejada I_r y la radiación transmitida I_t , así mismo, los ángulos de incidencia θ_i , de reflexión θ_r y el área sobre la cual interactúa un haz de luz. Adaptado de Hecht (2000).

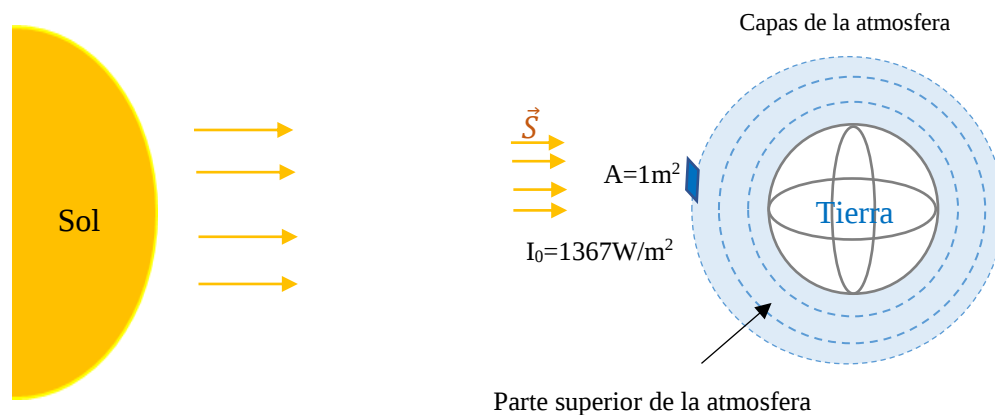
2.2.17. La constante solar

Según Sears et al. (2009), la constante solar es la cantidad de energía que el Sol emite hacia la tierra, medida en watts por metro cuadrado (W/m^2), y tiene un valor aproximado de 1361 W/m^2 . Esta constante representa la cantidad de radiación solar que llega a la atmósfera terrestre desde el Sol por unidad de área. Se trata de una medida clave en la física solar y en la investigación sobre

energía renovable, ya que indica la cantidad de energía disponible en la parte superior de la atmósfera terrestre.

Figura 8

La radiación solar en la atmosfera superior.



Nota: La figura muestra cómo el sol emite una cantidad de energía solar hacia la Tierra y, al ser medida, esta se denomina la constante solar. Adaptado de Sears et al. (2009).

2.2.18. La Radiometría

Según Sears et al. (2009), la radiometría es una disciplina que se ocupa de medir la radiación electromagnética, como la luz, los rayos ultravioletas, la radiación infrarroja, etc. Las mediciones que realiza permiten cuantificar la intensidad de la radiación en diferentes longitudes de onda (ya sea visible, ultravioleta, infrarroja, etc.) y en diferentes condiciones (como la radiación difusa o directa). La radiometría comprende un conjunto de técnicas que permiten medir la energía electromagnética, como la luz visible, la radiación infrarroja y los rayos ultravioleta.

2.2.19. Medición de la Radiación Solar Global

La radiación solar global es la densidad de flujo de energía electromagnética proveniente del Sol que alcanza la superficie del suelo, su valor depende de la radiación solar extraterrestre, así como del estado en la que se encuentre la atmósfera, siendo compuesta por dos componentes: la radiación solar directa y la radiación solar difusa (Iqbal, 1983).

2.2.20. Piranómetro

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en sus manuales de instrumentación meteorológica, se define el piranómetro como el instrumento estándar para medir la radiación solar global.

2.2.21. Radiómetro Digital

También denominado medidor de luz solar, medidor solar portátil, medidor de índice UV digital portátil o probador de radiación UV con pantalla LCD para medir la luz UV. Es de marca Mokernali y es un dispositivo mejorado con sonda fotométrica para mediciones precisas, velocidad de respuesta más rápida y controles de botones convenientes, lo que garantiza una operación precisa y fácil de usar. Es ideal para pruebas de óptica física, estaciones meteorológicas y monitoreo de radiación solar, ya que garantiza resultados precisos.

El sensor (color negro y blanco), por su versatilidad, puede ser requerido de diferentes maneras: en dirección perpendicular al sol y en dirección oblicua. Estas orientaciones influyen en la obtención de datos requeridos.

La figura 9 muestra el radiómetro digital utilizado para las medidas de la luz solar de la investigación.

Figura 9

Radiómetro digital, medidor de luz solar.



Nota: Tomada de Amazon (2023)

2.2.22. Interacción entre la Radiación Solar y la Superficie Terrestre: Reflexión, Absorción y Transmisión

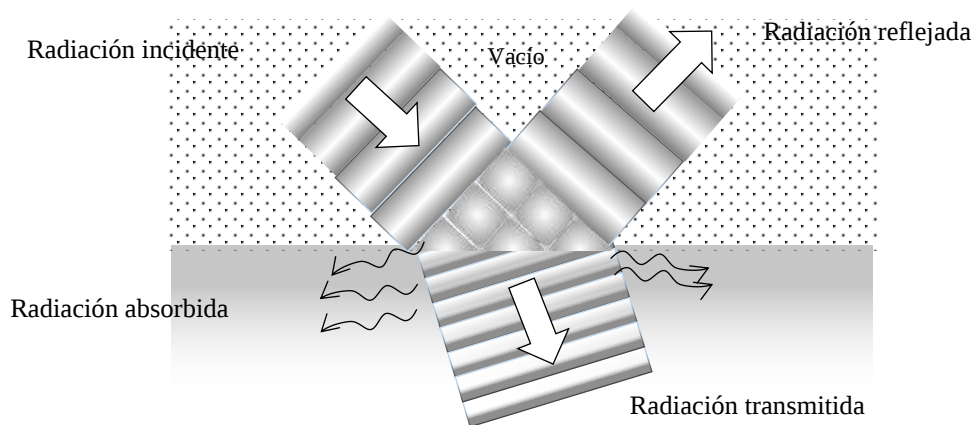
2.2.22.1. Reflexión. Según Sears et al. (2009), es cuando una onda llega a un medio o superficie, y parte de ella puede ser reflejada de nuevo hacia el medio original, en lugar de ser absorbida o transmitida.

2.2.22.2. Absorción. Según Sears et al. (2009), la absorción se refiere al proceso en el cual la energía de una onda es absorbida por un material en lugar de ser reflejada o transmitida a través de él.

2.2.22.3. Transmisión. Según Sears et al. (2009), es el proceso por el cual una onda pasa a través de un material sin ser absorbida ni reflejada por él. Es decir, cuando una onda incide sobre un medio, parte de la energía puede atravesarlo, manteniendo sus características. En el caso de la radiación electromagnética, como la luz visible, la transmisión ocurre cuando los fotones atraviesan un material sin perderse significativamente.

Figura 10

La reflexión, absorción y transmisión en una superficie.



Nota: La figura muestra como la radiación incidente al llegar a una superficie (material), una parte se refleja, otra se absorbe y la otra parte se transmite. Adaptado de Hecht (2000).

2.2.23. *Coeficiente de Reflectancia, Transmitancia y Absortancia*

Según Hecht et al. (2000), la reflectancia se refiere a la fracción de la radiación incidente que es reflejada por una superficie. Es una medida de cuánta luz (o cualquier otro tipo de onda electromagnética) se refleja cuando incide sobre un material. La reflectancia depende de las propiedades del material, como su textura, composición y la longitud de onda de la radiación incidente.

Matemáticamente, la reflectancia (R) se expresa como:

$$R = \frac{I_{reflejada}}{I_{incidente}} \quad (7)$$

Donde: $I_{reflejada}$ es la intensidad de la luz reflejada por la superficie.

$I_{incidente}$ es la intensidad de la luz que incide sobre ella.

En la óptica, este concepto se utiliza para caracterizar cómo las superficies interactúan con la luz y se aplica en muchos contextos, como el diseño de espejos, filtros ópticos y el análisis de superficies en materiales.

Según Hecht et al. (2000), la transmitancia se refiere a la fracción de la radiación incidente que atraviesa un material sin ser absorbida ni reflejada.

Matemáticamente, la transmitancia (T) reflectancia (R) se expresa como:

$$T = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} \quad (8)$$

Donde: $I_{transmitida}$ es la intensidad de la radiación que pasa a través del material.

$I_{incidente}$ es la intensidad de la radiación que incide sobre el material.

La transmitancia depende de factores como la composición del material, su grosor y la longitud de onda de la radiación incidente. Este concepto es esencial en óptica y en el estudio de la interacción de la luz con diferentes materiales, como en lentes, filtros ópticos y en la evaluación de la transparencia de materiales como vidrio, plásticos y líquidos.

Según Hecht et al. (2000), la absorptancia se define como la proporción de la radiación incidente que es absorbida por un material. Matemáticamente, la absorptancia (A) se expresa como:

$$A = \frac{E_{absorbida}}{E_{incidente}} \quad (9)$$

Donde:

$E_{absorbida}$ es la intensidad de la radiación que queda en el material tras la interacción.

$E_{incidente}$ es la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie del material.

La transmitancia, junto con la reflectancia y la absorción, forma parte de los principios fundamentales que gobiernan cómo la luz interactúa con los materiales.

Con base en el principio de conservación de energía, se tiene:

$$A + R + T = 1 \quad (10)$$

Siendo:

A: absorción

R: reflectancia

T: transmitancia

2.2.24. Albedo

Según Feynman (1964), el albedo es la fracción de la luz que una superficie refleja de vuelta al espacio, en lugar de absorberla. Este concepto, descrito por Feynman, hace énfasis en cómo una superficie refleja la radiación, lo cual es un principio fundamental no solo para la física de la luz, sino también para el estudio del clima.

Vera (2005) expresa que determinar el albedo es importante para evaluar la insolación total, como un parámetro relevante en el balance radiactivo Tierra-Atmosfera. Además, señala que el albedo de una superficie varía con el color, la humedad, el contenido de materia mineral y orgánica, así como con el estado de la superficie. La disminución de albedo dependerá de la humedad en materia orgánica y la rugosidad en una superficie, donde las tonalidades claras resultaran mayor albedo que las oscuras.

$$a = \frac{I_r}{I_i} \quad , \quad 0 < a < 1 \quad (11)$$

Donde: a es el albedo, cuyo valor está entre 0 y 1

I_r es la intensidad de luz solar reflejada

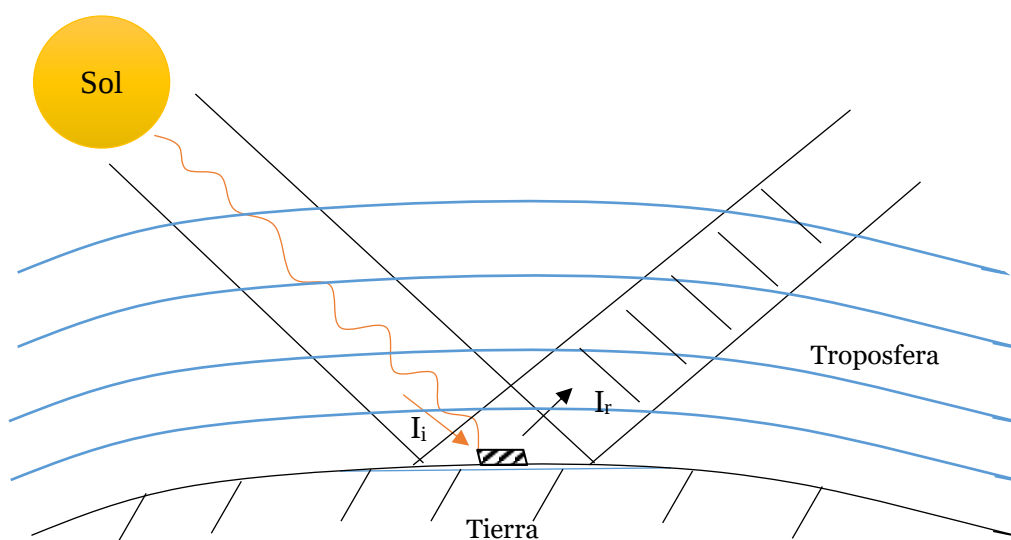
I_i es la intensidad de luz solar incidente

Porcentualmente la ecuación (2.12), se puede reescribir como:

$$a = \frac{I_r}{I_i} 100(\%) \quad (12)$$

Figura 11

Radiación incidente y porcentaje de albedo.



Nota: La radiación solar incide (I_i) sobre la tierra. En este proceso de interacción se produce la reflexión (I_r) y transmisión de la luz solar. El porcentaje o albedo que retorna a la atmósfera genera el calentamiento de la atmósfera terrestre; sin embargo, una parte importante se transmite a la superficie, produciendo calentamiento local. Esto, a su vez, se transmite a la atmósfera. Adaptado de Sears et al. (2009).

2.2.24.1. Importancia del Albedo en el Calentamiento de la Atmósfera.

Pelkowski et al. (2008) refieren que el albedo es un factor clave en el balance de energía en subsistemas geofísicos. De su valor dependen muchas características climatológicas, donde un cambio ínfimo del albedo en la superficie terrestre implica cambios significativos en la temperatura global.

2.2.24.2. Factores que afectan al albedo. Según Hansen (2009), en sus investigaciones y escritos sobre el cambio climático y el albedo, menciona diversos factores que afectan al albedo de la Tierra. Estos factores pueden influir en la cantidad de radiación solar que es reflejada de vuelta al espacio, afectando así el balance energético de la Tierra y contribuyendo al calentamiento o enfriamiento global. A continuación, se describen algunos de los factores clave que Hansen destaca en sus trabajos:

2.24.2.1. Cobertura de Nieve y Hielo. Hansen (2009) señala que las áreas cubiertas de nieve o hielo tienen un alto albedo porque reflejan una gran parte de la radiación solar. Sin embargo, con el calentamiento global, las capas de hielo y nieve en regiones como el Ártico están disminuyendo rápidamente, lo que reduce el albedo de esas áreas.

2.24.2.2. Nubes y Aerosoles. Según Hansen (2009), las nubes y los aerosoles pueden influir en el albedo al reflejar o absorber la radiación solar. Por ejemplo, las nubes blancas y densas tienen un albedo alto, reflejando más luz solar, mientras que las nubes más oscuras o finas tienen un albedo más bajo. Asimismo, los aerosoles, provenientes de fenómenos como las erupciones volcánicas o la contaminación, pueden modificar el albedo al afectar la cantidad de radiación solar reflejada o absorbida.

2.24.2.3. Desertificación y Cambio en la Cubierta Terrestre. La expansión de los desiertos o la conversión de tierras agrícolas en áreas áridas puede afectar el albedo, ya que las superficies desérticas son generalmente más oscuras y absorben más energía solar. Esto es particularmente relevante en el contexto del cambio climático, donde el cambio en el uso del suelo puede alterar significativamente el albedo y contribuir al calentamiento regional (Hansen, 2009).

2.24.2.4. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Aunque no está directamente relacionado con el albedo en sí, Hansen (2009) también subraya que las emisiones de gases de efecto invernadero pueden modificar el clima de manera indirecta, afectando factores como la nube y la cobertura de nieve que, a su vez influyen en el albedo. Por ejemplo, el aumento de las concentraciones de CO₂ y metano en la atmósfera puede alterar los patrones climáticos, lo que puede afectar las regiones con alta cobertura de nieve y hielo. Por otro lado, Hansen (2009) resalta que el albedo es un factor clave en el balance energético de la Tierra y, por ende, en el cambio climático. El albedo de la Tierra puede verse alterado por factores naturales y humanos, como la reducción de los glaciares, el cambio en el uso del suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye al calentamiento global. La interacción entre estos factores es compleja y puede dar lugar a retroalimentaciones que amplifican los efectos del cambio climático, lo que hace necesario estudiar y monitorear el albedo en el contexto de la lucha contra dicho fenómeno.

2.2.24.3. Albedo en Superficies Materiales. Según Mann (2012), el albedo de la superficie terrestre juega un papel crucial en la dinámica climática global. En particular, menciona cómo las superficies de hielo y nieve, el cambio en el uso del suelo, y las superficies oceánicas con diferentes propiedades de albedo tienen un impacto significativo en el calentamiento global y

el cambio climático. El albedo está intrínsecamente vinculado con retroalimentaciones climáticas, lo que puede amplificar el calentamiento global a través de la absorción de energía adicional. Además, resalta que los cambios en el albedo deben ser considerados al abordar las políticas climáticas y las estrategias de mitigación.

2.2.24.3.1. **Superficie de Asfalto.** El asfalto es un compuesto negro viscoso, aglutinante, impermeabilizante y duradero que se obtiene del petróleo de forma natural o de una combinación de hidrocarburos obtenidos por destilación. Este componente se utiliza como conglomerante en la producción de mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de pavimentos (Cornejo et al., 2018).

En un estudio reciente, patrocinado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, y la Agencia de Protección Ambiental, y los investigadores del Grupo de Isla de Calor en el Laboratorio Nacional Lawrence, de la universidad de California, Berkeley, se investigaron métodos para desarrollar pavimentos de hormigón más frescos utilizando cemento Portland blanco y agregados reflectores. Asociación Americana del Hormigón (ACPA, 2002).

Tabla 1

Albedo de superficies de pavimentos.

Tipo de Pavimento	Albedo
Asfalto	0,05-0,10 (nuevo)
	0,10-0,15 (usado)
Hormigón con cemento Portland gris	0,35-0,40 (nuevo)
	0,20-0,30 (usado)
Hormigón con cemento Portland blanco	0,70-0,80 (nuevo)
	0,40-0,60 (usado)

Nota: Tomado de ACPA, (2002)

2.2.24.3.2. **Superficie de Concreto.** Abanto (s.f.) afirma que “Es una mezcla de cemento Portland, agregados (fino y grueso), aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades prefijadas; y algunas veces se añaden sustancias llamados aditivos que mejoran o modifican las propiedades del concreto” (p .11).

El albedo es un indicador de la capacidad de reflejo de una superficie. Se utiliza para evaluar el efecto de enfriamiento de los materiales (H. Li et al., 2013).

Algunos investigadores han intentado evaluar el albedo de diferentes pavimentos, especialmente de hormigón convencional, obteniendo resultados interesantes que dependen del sitio de estudio y de la técnica aplicada, logrando alcanzar niveles de albedo entre 0.5 – 0.9. (Karlessi et al., 2009).

2.2.24.3.3. **Superficie de Grass.** Se define al grass como el tapiz vegetal herbáceo de escasa altura que cubre la superficie del suelo. El grass se encuentra integrado por especies de la familia de las gramíneas y es considerado la base del jardín (Parracia, 2012).

El albedo medio es el promedio de los factores de reflectancia en todas las bandas espectrales, ponderado por el flujo solar descendente en cada banda (Irons et al., 1988). La radiancia reflejada en cada banda se mide con un radiómetro. Estas mediciones pueden proporcionar estimaciones con una precisión del 3% (Ranson et al., 1991).

Tabla 2

Albedo de superficies de césped.

Tabla 1. Valores típicos del albedo medio.			
Tipo (1)	Descripción (2)	Albedo (3)	Fuente (4)
Superficie de agua	Elevación solar alta	0.03-0.10	Sumner (1988)
	Elevación solar baja	0.10-1.00	Sumner (1988)
	Océano	0.03-0.10	Geiger (1965)
Bosques	Pantano	0.11-0.19	Kriebel (1979)
	Bosques de coníferas	0.05-0.15	Sumner (1988)
	Bosque de hoja caducifolia	0.10-0.20	Sumner (1988)
	Maderas duras mixtas, en hoja	0.18	Lee (198)
	Bosques de robles	0.18	Eagleson (1970)
	Bosques de pinos	0.14	Eagleson (1970)
	Selvas tropicales	0.07-0.15	Sumner (1988)
Pastizales	Césped de hierba azul	0.20-0.30	Ranson <i>et al.</i> (1991)
	Césped verde	0.26	Eagleson (1970)
	Prados	0.12-0.30	Geiger (1965)
	Pastos	0.12-0.20	Gutman <i>et al.</i> (1989)
	Sabana	0.16-0.18	Kriebel (1979)

Nota. Ponce (2018).

2.2.25. *Atmosfera*

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea la Tierra y que se mantiene unida a ella por la fuerza de la gravedad. Está formada por una mezcla de gases, vapor de agua y partículas sólidas y líquidas, desempeñando funciones vitales, como la protección de la radiación solar, la regulación térmica y el suministro de gases indispensables para la vida (Chan, 2002).

2.2.25.1. Composición de la Atmosfera. La atmósfera terrestre está compuesta principalmente por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), argón y dióxido de carbono, así como vapor de agua y otros gases en menor proporción, cuya distribución tiene importancia decisiva en los procesos meteorológicos y climáticos (Chan, 2002).

2.2.25.2. Calentamiento de la Atmosfera. La NASA explica que la atmósfera atrapa el calor emitido en forma de radiación infrarroja por la superficie terrestre, la cual previamente fue calentada por la radiación solar. Parte de esa energía infrarroja es absorbida por gases de efecto invernadero como el vapor de agua, CO₂, CH₄ y otros, que luego reirradian el calor en todas direcciones, incluyendo de vuelta hacia la superficie. Este proceso, conocido como efecto invernadero natural, es esencial para mantener la temperatura promedio del planeta en cerca de 15 °C, en lugar de los -18 °C que tendría sin él, (NASA Earth Observatory, 2010).

2.2.25.3. Variabilidad del Albedo en el Calentamiento de la Atmosfera. Hansen (2012), destaca cómo el cambio en el albedo, particularmente en las zonas polares (debido al deshielo), influye en el calentamiento global. Cuando el hielo y la nieve (que tienen un alto albedo) se derriten, se expone una superficie más oscura (como agua o tierra), lo que disminuye el albedo y aumenta la absorción de energía solar, acelerando el calentamiento global. Este fenómeno forma parte de las retroalimentaciones climáticas que afectan el balance energético.

2.2.26. Energía Solar

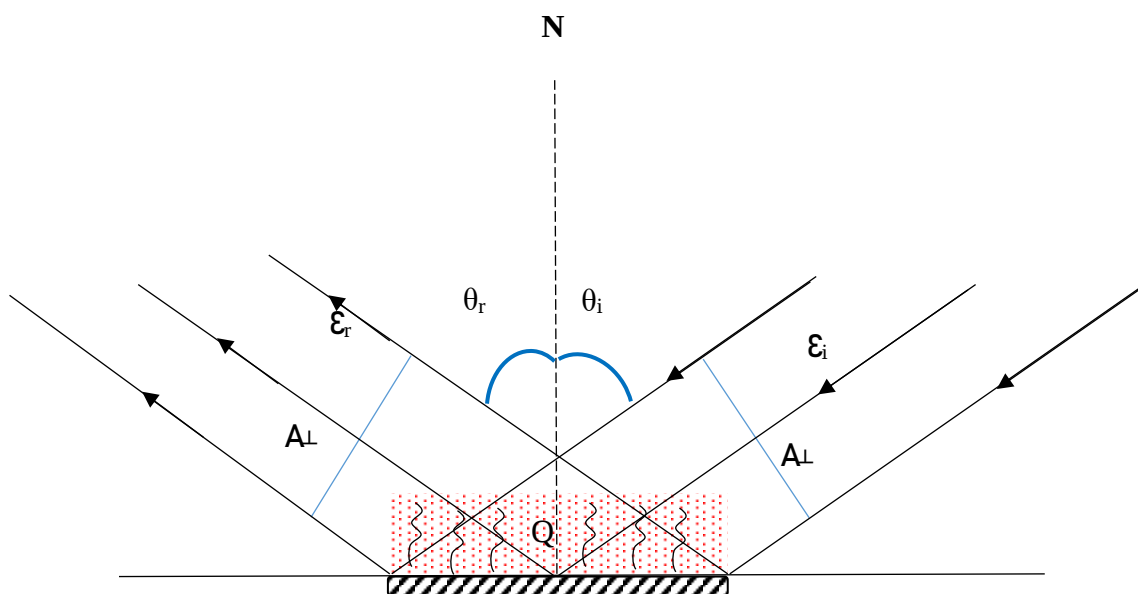
La energía solar es una fuente de energía abundante, no contaminante y se encuentra disponible, en mayor o menor medida, en cualquier parte del planeta, pudiendo ser colectada y transformada en energía térmica o eléctrica en el lugar de utilización (Laborde, et al., 2016).

2.2.26.1. Ecuación de la Intensidad de Radiación Solar y Conservación de

Energía. Por el principio de conservación de energía, la energía de la luz reflejada (ϵ_r) es equivalente a la energía calorífica (Q) transferida al aire por la superficie.

Figura 12

Energía incidente y reflejada en la muestra.



Nota. Fuente propia.

De la ecuación (2.6) sabemos que la intensidad de radiación electromagnética (luz) se define como:

$$I = \frac{P}{A}$$

Entonces, podemos decir que:

$$P = I \cdot A \quad (13)$$

La potencia se define como la rapidez con que se desarrolla trabajo (energía) por unidad de tiempo:

$$P = \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\varepsilon}{t} \quad (14)$$

Donde ε es energía electromagnética.

Luego:

$$\varepsilon = P \cdot t \quad (15)$$

La energía referente a la luz incidente es:

$$\varepsilon_i = I_i A_{\perp} t \quad (16)$$

La energía referente a la luz reflejada, es:

$$\varepsilon_r = I_r A_{\perp} t \quad (17)$$

La energía que corresponde a la luz transferida, es:

$$\varepsilon_t = I_t A_{\perp} t \quad (18)$$

La energía absorbida por la superficie A se transforma en calor de dicha superficie:

$$\varepsilon_a = Q \quad (19)$$

El principio de conservación de energía, en este proceso, es:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_r + \cancel{\varepsilon_t} + \varepsilon_a \quad (20)$$

En materiales opacos a la luz, la onda transmitida o refractada se atenúa a una distancia muy pequeña; por ello, la energía transmitida es aproximadamente igual a cero.

2.2.27. Balance de Energía

Según Duffie et al. (2013), el balance de energía establece que la cantidad de energía que entra a un sistema debe ser igual a la energía que se acumula dentro del sistema más la energía que sale del mismo. Esto constituyó una expresión fundamental del principio de conservación de la energía.

La Ecuación general del balance de energía puede expresarse como:

$$Q_{in} - Q_{out} = \Delta E \quad (21)$$

Donde:

Q_{in} es la energía que entra al sistema (radiación solar)

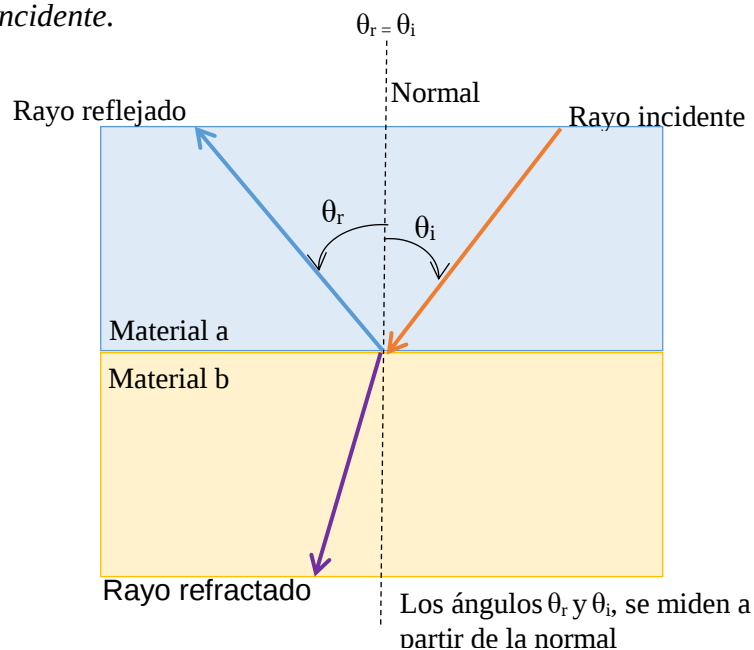
Q_{out} es la energía que sale del sistema (radiación emitida)

ΔE es el cambio de energía interna del sistema (esto incluye la acumulación de energía en forma de calor).

Este concepto y su correspondiente ecuación son fundamentales en diversas aplicaciones, como en la climatología para estudiar el balance energético de la Tierra. La ecuación de balance de energía propuesta por Duffie y Beckman describe cómo la energía se distribuye y se conserva dentro de un sistema térmico o energético, considerando todas las formas de entrada, salida y acumulación de energía.

2.2.28. Primera Ley de la Reflexión

Los rayos incidentes, reflejados y refractados, así como la normal a la superficie, se encuentran todos en el mismo plano (Sears et al., 2009).

Figura 13*Reflexión del rayo incidente.**Nota:* Adaptado de Sears et al. (2009)**2.2.29. Fundamentos Metodológicos**

En el enfoque cuantitativo según Sampieri et al. (2014), manifiesta que recolectar datos en base a mediciones numéricas y hacer análisis estadístico permite probar hipótesis.

Bunge (2004) expresa en el método científico que se requiere de un conjunto de métodos y técnicas especiales para tratar cada clase de problemas, también manifiesta en el experimento científico que a la observación añade el control de ciertos factores y se provoca deliberadamente algún cambio.

MARCO METODOLÓGICO

3.1. **Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica**

La ciudad del Cusco está situada en los Andes peruanos, en una cuenca montañosa rodeada por montañas y valles. Sus coordenadas geográficas aproximadas son $13^{\circ}31'14''$ de latitud sur y $71^{\circ}58'03''$ de longitud oeste. La altitud significativa y la topografía diversa influyen en su clima y condiciones climáticas específicas.

En esta ciudad se encuentra la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), lugar donde se desarrolló la investigación. Este lugar fue elegido por reunir, dentro de su infraestructura, las tres superficies urbanas objeto de análisis: asfalto, concreto y grass, lo que proporcione un contexto idóneo para examinar la variabilidad del albedo. La investigación se centró en analizar cómo estas variaciones influyen en el calentamiento de la atmosfera dentro de un entorno urbano específico, considerando las condiciones geográficas y climáticas propias de la ciudad del Cusco durante el año 2023.

Figura 14

Mapa satelital de ubicación de la Universidad San Antonio Abad del Cusco.



Nota: Mapa satelital de la ciudad de Cusco con ubicación de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, tomado de Google Earth (2024).

3.2. Tipo de Investigación

El tipo de investigación es aplicativo y cuantitativo, en la investigación este enfoque permitió abordar objetivamente como la variabilidad del albedo en superficies de asfalto, concreto y Grass que influyen en el calentamiento atmosférico en la ciudad del Cusco en el año 2023.

3.3. Nivel y Diseño de la Investigación

La investigación consideró dos etapas: en una primera etapa se hizo de manera experimental y en una segunda etapa, se hizo un análisis de nivel correlacional y explicativo, porque analiza la relación entre la variabilidad del albedo (superficies de asfalto, concreto y grass) y el calentamiento de la atmósfera.

Por su diseño, es experimental considerando el método científico de Bunge, la investigación aplicó control para determinar la variabilidad del albedo, se midió en el contexto real y por el tiempo es transversal porque la recolección de datos se realiza en un periodo específico (durante el año 2023).

3.4. Unidad de Análisis

Para nuestro estudio la unidad de análisis se refirió a las áreas de superficie (asfalto, concreto, grass) que se encuentran en las inmediaciones de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), ubicada en el distrito, provincia y región de Cusco, en la república del Perú. Cada área se caracteriza por sus propiedades físicas; el albedo se convierte en una unidad independiente de observación y análisis. En estas áreas se realizaron mediciones de luz incidente y luz reflejada de ángulos de incidencia empleando un radiómetro.

3.5. Población de Estudio

En este caso, la población de estudio son áreas con diferentes tipos de superficie, como asfalto, concreto y Grass, que se encuentran en la UNSAAC. Se seleccionaron áreas representativas mediante un muestreo estratégico, teniendo en cuenta la diversidad geográfica y temporal. Este enfoque permitió determinar cómo estas áreas urbanas influyen en el calentamiento de la atmosfera de la ciudad del Cusco el año 2023.

3.6. Operacionalización de Variables.

Para la medición de variables realizamos la operacionalización de variables como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3

Cuadro de operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones / Indicadores
x: Albedo de superficies urbanas	Proporción de radiación solar reflejada por una superficie en relación con la radiación incidente	Cálculo del porcentaje de reflectividad mediante ecuación y un radiómetro que mide la radiación incidente y reflejada en diferentes superficies: grass, concreto, asfalto.	Valor de albedo (%) por superficie
y: Incremento térmico en la atmósfera	Aumento de la temperatura del aire en función de la absorción de energía en áreas urbanas (IPCC, 2021)	Cálculo de variación de temperatura atmosférica a 10000 m de altura en la ciudad del Cusco(°C).	Variación de temperatura (°C) en la atmosfera de la ciudad del Cusco

Nota: La tabla muestra la operacionalización de variables de la investigación.

3.7. Hipótesis

3.7.1. Hipótesis General

La variabilidad del albedo en superficies de asfalto, concreto y grass son influentes en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco - 2023.

3.7.2. Hipótesis Específicos

- La variabilidad del albedo en asfalto influye significativamente en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.
- La variabilidad del albedo en concreto influye significativamente en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.
- La variabilidad del albedo en grass influye significativamente en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.

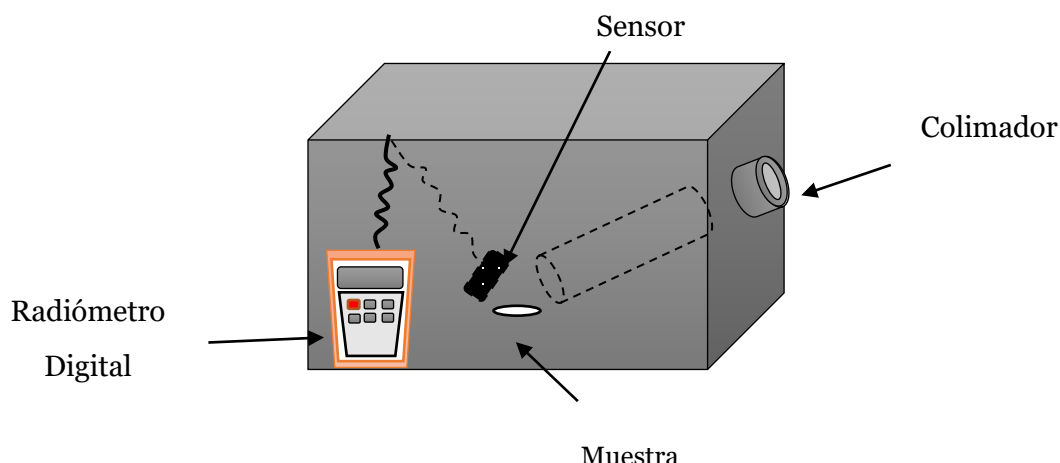
3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En este estudio se eligió las muestras de tres materiales que predominan en las edificaciones en función de otros estudios; las mediciones directas se hicieron con un radiómetro para obtener medidas de la intensidad de luz solar (radiación directa) y el albedo de diferentes superficies considerando ángulos (θ) de incidencia de la luz solar respecto a la normal y ángulos de reflexión para cada muestra.

Se construyó un equipo que contribuyó en la medición del albedo, al cual se le denominó “Dispositivo experimental para determinación de albedo (DEDA)”.

Figura 15

Prototipo DEDA construido incluido el esquema de toma de datos.



3.8.1. Diseño del Equipo

El equipo construido para la presente tesis tiene el objetivo de contribuir en la obtención del albedo, ha sido denominado “DEDA”. Este dispositivo está diseñado para medir con precisión la radiación incidente y reflejados en las áreas o superficies de las muestras en estudio.

El diseño del DEDA consiste en un sistema fabricado de forma que garantiza la incidencia de la luz solar directa. Su diseño modular permite una fácil instalación para las diversas ubicaciones, ajustándose a las necesidades específicas de mediciones.

El DEDA está equipado también con un radiómetro que tiene un sensor de alta sensibilidad capaz de captar una variación instantánea de la intensidad de la radiación solar.

Asimismo, el DEDA incluye un sensor de temperatura para captar la variación térmica en la atmósfera generada por el rayo de luz reflejado.

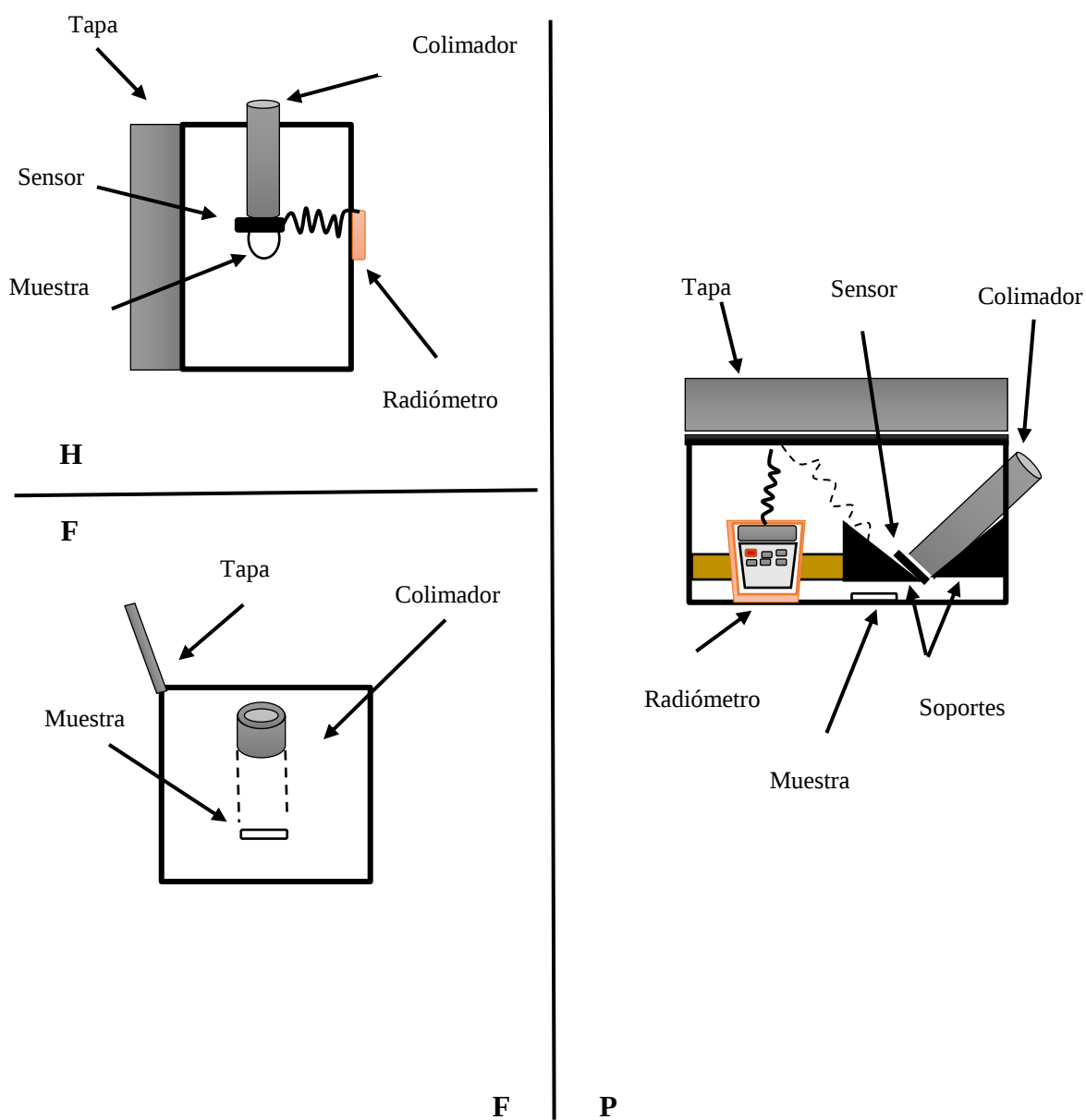
3.8.1.1. Esquema del Equipo

Esquema de vistas principales del equipo.

Proceso inicial de medida: I_i.

Figura 16

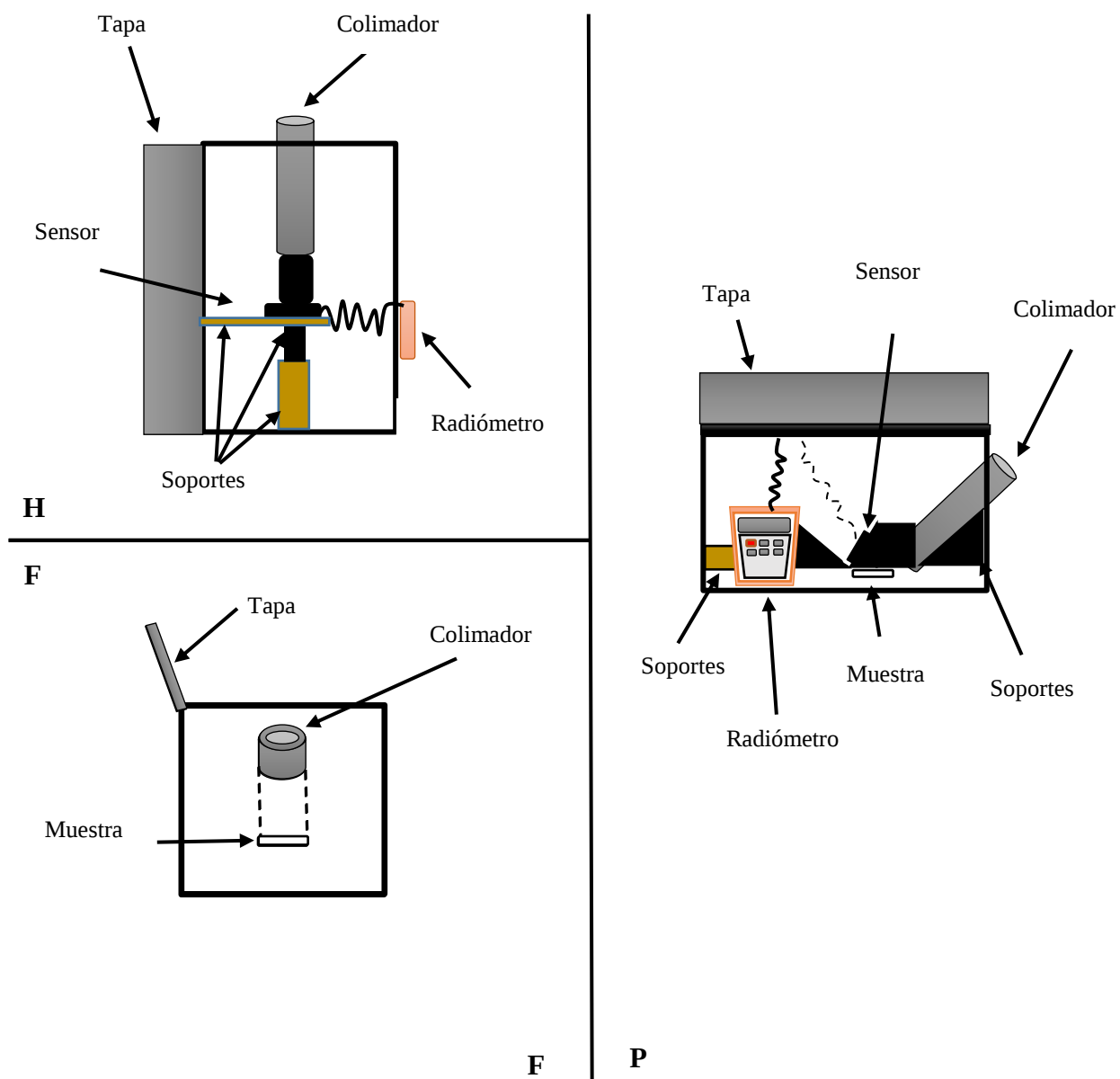
H Vista de horizontal, F vista de frente, P vista perpendicular.



Proceso final de medida: I_r .

Figura 17

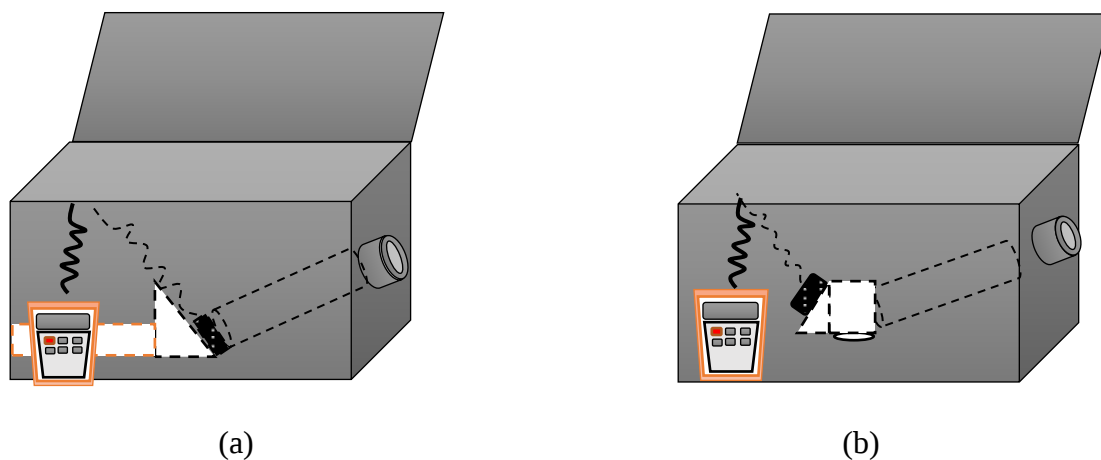
H Vista de horizontal, F vista de frente, P vista perpendicular.



Diseño isométrico (3D)

Figura 18

Prototipos del DEDA, esquema de posiciones para momento de medidas.



Nota: (a) Esquema para el momento de medir la luz incidente. (b) Esquema para el momento de medir la luz reflejada. Fuente: Elaboración propia.

Magnitudes de los Componentes

Colimador: el objetivo del colimador es obtener la radiación incidente directa en la muestra; las paredes cumplen el propósito de atenuar dicha radiación directa. Medidas: 20 cm x 5 cm x 2 cm.

Figura 19

Colimador elaborado.

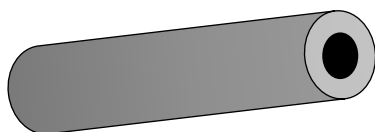
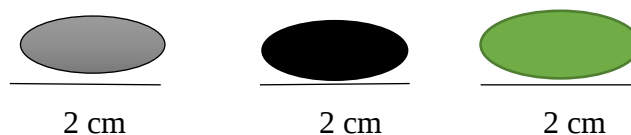


Figura 20

Representación de muestras de concreto, asfalto y grass.

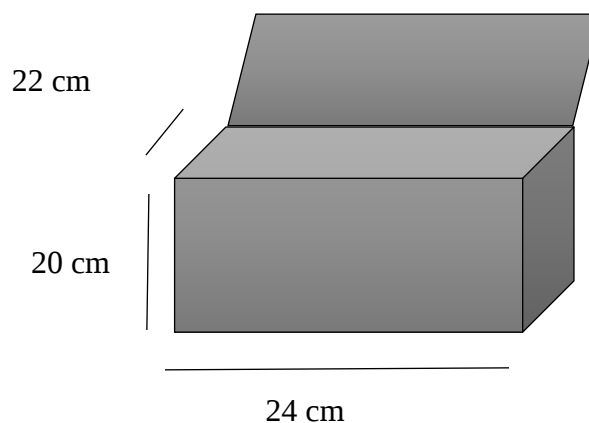


Nota: Las muestras tienen un diámetro de 2 cm. Fuente: Elaboración propia

DEDA: el objetivo del DEDA es aislar la radiación de luz externa para obtener una muestra más directa.

Figura 21

Medidas del DEDA.



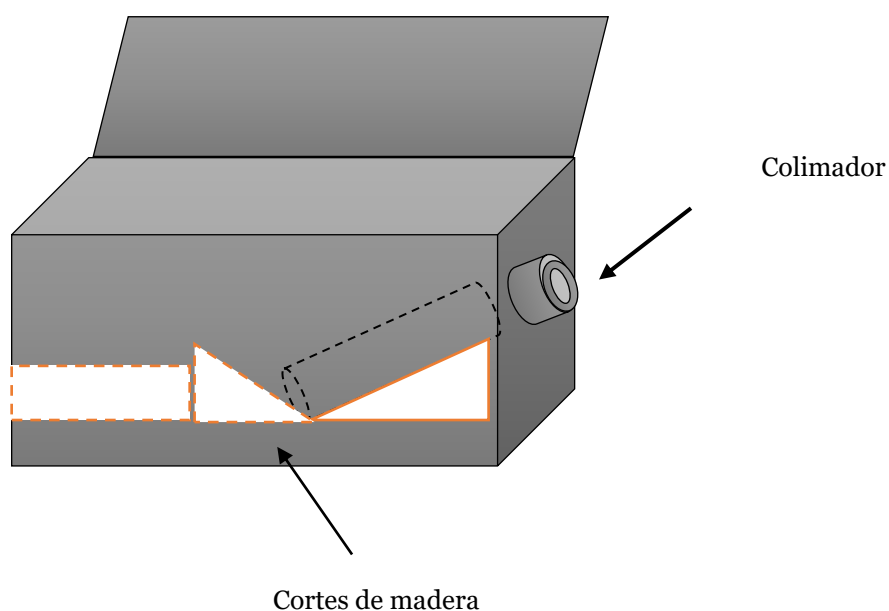
3.8.2. Construcción de Dispositivo Experimental para la Determinación de Albedo (DEDA)

El DEDA es una caja con tapa, pintada interna y externamente con color negro mate, con el fin de evitar la interferencia de la luz difusa no deseadas mejorando así la precisión de las mediciones.

El DEDA contiene un colimador cilíndrico en uno de los costados, también pintado de negro en su interior y exterior, el cual permite dirigir la luz solar más directa. Además, incorpora cortes de madera de forma triangular con ángulos de medición de 30° , 45° y 53° con respecto a la normal, que sirven como soporte para el colimador y sensor. Asimismo, incluye un bloque de madera que brinda estabilidad del sensor durante las mediciones.

Figura 22

DEDA construido.



3.8.2.1. Cortes en el DEDA

Los cortes que tiene el DEDA se realizan en dos áreas: uno en la base, con el fin de exponer la muestra, y otro en los lados laterales superior, destinado a colocar el colimador. Para el cierre, se considera una tapa que protege de la luz difusa. La realización de los cortes se efectuó utilizando cúter y tijera.

Figura 23

Corte de los orificios en la caja.



3.8.2.2. Ubicación del Colimador de Luz

Se utilizó como colimador de luz dos tubos cilíndricos de cartón concéntricos de color negro, por los cuales incidieron la luz solar, de tal forma que únicamente se transmite el haz de luz correspondiente al área de la sección transversal del colimador, el que es medido posteriormente por el radiómetro, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 24

Instalación del colimador de luz.



Nota: En cada DEDA se ubicó el colimador con un ángulo correspondiente.

3.8.2.3. Obtención del DEDA

El DEDA terminado es de color negro, con el propósito de evitar que la luz difusa interfiera en la medición, y contiene los siguientes elementos: caja protectora, colimador de luz inclinado al ángulo θ_i predeterminados para cada superficie de estudio, soportes y radiómetro.

El propósito de su diseño y construcción se fundamentó en los objetivos de la presente tesis de investigación, con el cual se realizaron las mediciones de la radiación incidente y reflejada, como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 25

DEDA para diferentes ángulos de incidencia.



Nota: Presentación del DEDA construido

En función de la luz solar incidente, se ubicó el DEDA sobre una superficie plana, considerando un día soleado y la hora para el ángulo θ_i . Para realizar las mediciones, se tuvo en cuenta el entorno, a fin de evitar sectores con construcciones cercanas que generan sombra alrededor del equipo.

Las pruebas experimentales se realizaron en el interior de la ciudad universitaria, en las superficies existentes entre el pabellón de Ciencias y Educación.

La figura 26 muestra el DEDA y las muestras en estudio:

Figura 26

Ubicación en diferentes superficies.



(a)



b)



(c)

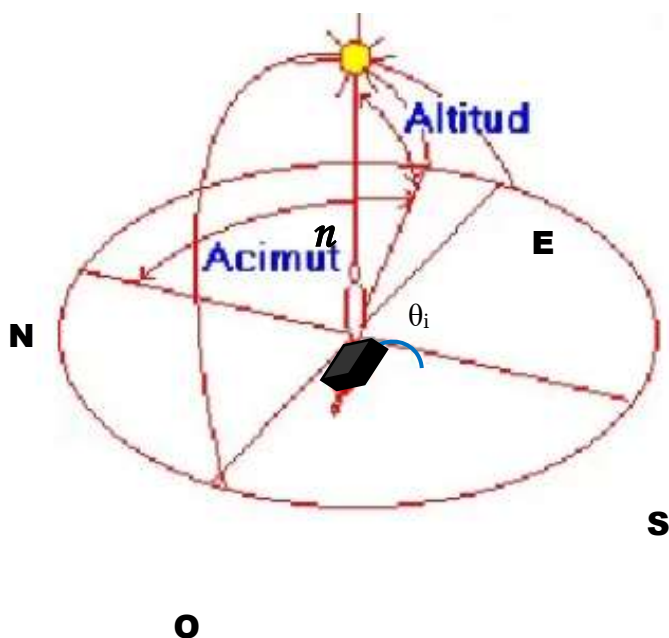
Nota: (a) DEDA en asfalto. (b) DEDA en concreto. (c) DEDA en grass.

3.8.2.4. Orientación del DEDA

La orientación del DEDA en la investigación fue determinada de acuerdo con el desplazamiento del sol. En la ciudad de Cusco, el sol sale por el este y se desplaza hacia el oeste, por lo que, para medir la luz solar incidente, el DEDA se orienta con la abertura del colimador dirigida hacia el sol, permitiendo así la adecuada captación de la radiación solar.

Figura 27

Muestra el desplazamiento del sol.



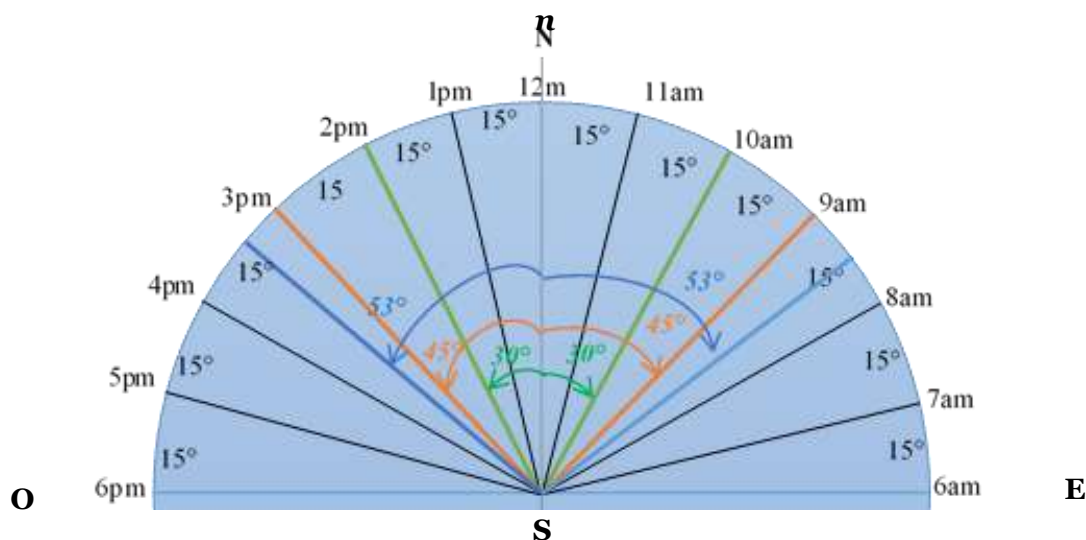
Nota: Adaptado Anchari (2008)

3.8.2.5. Ubicación del Ángulo en el DEDA

La ubicación de los ángulos en estudio se consideró según la primera ley de reflexión, con respecto a la normal, como se muestra en la figura.

Figura 28

Ángulos considerados con respecto a la normal en la presente investigación.



Nota: La figura muestra la medida del ángulo de avance del sol cada hora durante en un día y la medida de los ángulos considerados en la investigación.

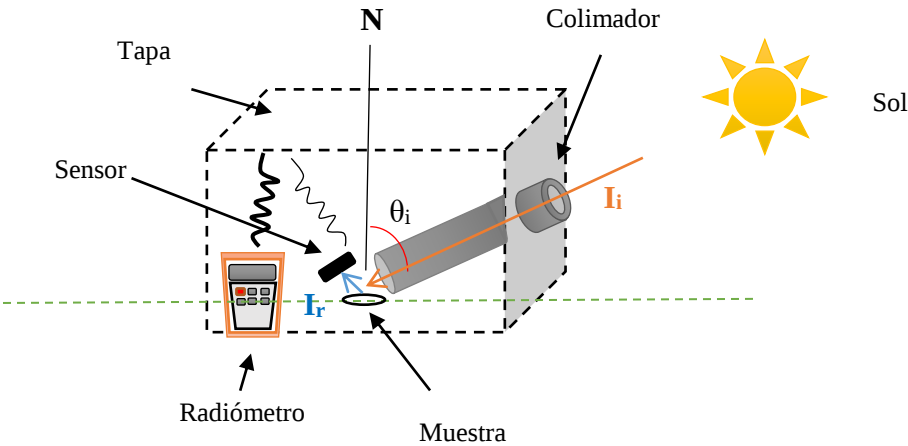
3.8.3. Procedimiento

3.8.3.1. Proceso de Medición de la Intensidad de Luz Incidente y Reflejada.

Se ubicó el DEDA sobre la muestra, y el momento de medición se determinó cuando la luz solar ingresó por el colimador al DEDA, considerando el ángulo correspondiente medido con respecto a la normal.

Seguidamente, se ubicó el sensor del radiómetro digital en la base del colimador para medir la luz incidente I_i ; una vez obtenido la medida, se reubica el sensor para medir la luz reflejada I_r .

Figura 29
Esquema del DEDA.



Este procedimiento se realizó para los ángulos de 53°, 45° y 30°, con respecto a la normal, y para las muestras de asfalto, concreto y grass consideradas en nuestra investigación.

La tabla 4 se diseñó para la recolección de medidas de la luz solar incidente, reflejada y la determinación del porcentaje de albedo.

Tabla 4
Registro de mediciones.

Muestra	i	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$I_i(W/m^2)$	$I_r(W/m^2)$	$\alpha(\%)$
	1					
	2					
	.					
	.					
	.					
	10					

Nota: La tabla registrará las medidas de la luz incidente y reflejada y la determinación del albedo.

3.8.3.1.1. Muestra Asfalto. Para iniciar las mediciones, se llevó el DEDA al lugar de medición, considerando la superficie de asfalto y la hora en que la luz solar ingresaba al DEDA mediante el colimador, instalando adecuadamente el radiómetro en el equipo correspondiente al ángulo establecido.

Antes de medir, se esperó que la luz solar ingrese completamente formulando un circuito definido sobre la muestra. Seguidamente, se ubicó el sensor del radiómetro en la base del colimador para registrar la medida de la luz solar incidente I_i . Luego, se ubica el sensor considerando el ángulo de inclinación con respecto a la normal, para medir la luz solar reflejada I_r , y ambas medidas se realizan con el DEDA cerrado para evitar ingreso de luz difusa.

Este proceso de mediciones se repitió para los ángulos de 53° , 45° y 30° .

Tabla 5

Recolección de medidas para el asfalto a 53° .

Muestra	i	$\theta_i (^\circ)$	$\theta_r (^\circ)$	$I_i (W/m^2)$	$I_r (W/m^2)$	$\alpha(\%)$
Asfalto	1	53°	53°			
	2	53°	53°			
	3	53°	53°			
	.					
	.					
	.					
	10	53°	53°			

Nota: La tabla registrará los valores de la luz incidente, luz reflejada y albedo.

Tabla 6*Recolección de medidas para asfalto a 45°.*

Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a (%)
Asfalto	1	45°	45°			
	2	45°	45°			
	3	45°	45°			
	.					
	.					
	.					
	10	45°	45°			

Nota: La tabla 6 registrará luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 45°.

Tabla 7*Recolección de medidas para asfalto a 30°.*

Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a (%)
Asfalto	1	30°	30°			
	2	30°	30°			
	3	30°	30°			
	.					
	.					
	.					
	10	30°	30°			

Nota: La tabla 7 r registrará luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 30°.

3.8.3.1.2. Muestra Concreto. Para iniciar las mediciones, se llevó el DEDA al lugar de medición, considerando la superficie del concreto y la hora en que la luz solar ingresaba al

DEDA a través del colimador. Asimismo, se procedió a instalar correctamente el radiómetro en el equipo, de acuerdo con el ángulo establecido para la medición.

Antes de medir se esperó a que la luz solar ingresará completamente en forma circular a la muestra. Seguidamente, se ubicó el sensor del radiómetro en la base del colimador para registrar la medida de la luz solar incidente I_i . Luego, se ubicó el sensor considerando el ángulo de inclinación con respecto a la normal, con el fin de medir la luz solar reflejada I_r , ambas medidas se realizan con el DEDA cerrado para evitar ingreso de luz difusa.

Este proceso de mediciones se repitió para los ángulos de 53° , 45° y 30° .

Tabla 8

Recolección de medidas para concreto a 53° .

Muestra	i	$\theta_i (^\circ)$	$\theta_r (^\circ)$	$I_i (W/m^2)$	$I_r (W/m^2)$	a(%)
Concreto	1	53°	53°			
	2	53°	53°			
	3	53°	53°			
	.					
	.					
	.					
	10	53°	53°			

Nota: La tabla 8 registrará luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 53° .

Tabla 9

Recolección de datos para el concreto a 45°.

Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m²)	I_r (W/m²)	a(%)
Concreto	1	45°	45°			
	2	45°	45°			
	3	45°	45°			
	.					
	.					
	.					
	10	45°	45°			

Nota: La tabla 9 registrará la luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 45°.

Tabla 10

Recolección de datos para muestra de concreto a 30°.

Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m²)	I_r (W/m²)	a(%)
Concreto	1	30°	30°			
	2	30°	30°			
	3	30°	30°			
	.					
	.					
	.					
	10	30°	30°			

Nota: La tabla 10 registrará la luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 30°.

3.8.3.1.3. Muestra de Grass

Para iniciar las mediciones, se trasladó el DEDA al lugar de medición, considerando como superficie de análisis al grass y tomando en cuenta la hora de ingreso de la luz solar al DEDA a través del colimador. El radiómetro fue instalado adecuadamente en el equipo correspondiente, alineado según el ángulo requerido para la medición.

Antes de medir, se esperó a que la luz solar ingresará completamente a la muestra, adoptando una forma circular. Seguidamente, se posicionó el sensor del radiómetro en la base del colimador para registrar la medida de la luz solar incidente I_i . Luego, se ubicó el sensor teniendo en cuenta el ángulo de inclinación respecto a la normal, con el objetivo de medir la luz solar reflejada I_r , ambas medidas se realizan con el DEDA cerrado para evitar ingreso de luz difusa.

Este proceso de mediciones se repitió para los ángulos de 53° , 45° y 30° .

Tabla 11

Recolección de medidas para el grass 53° .

Muestra	i	$\theta_i (^\circ)$	$\theta_r (^\circ)$	$I_i (W/m^2)$	$I_r (W/m^2)$	a(%)
Grass	1	53°	53°			
	2	53°	53°			
	3	53°	53°			
	.					
	.					
	.					
	10	53°	53°			

Nota: La tabla 11 registrará luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 53° .

Tabla 12

Recolección de medidas para el grass a 45°.

Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m²)	I_r (W/m²)	a(%)
Grass	1	45°	45°			
	2	45°	45°			
	3	45°	45°			
	.					
	.					
	.					
	10	45°	45°			

Nota: La tabla 12 registrará luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 45°.

Tabla 13

Recolección de medidas para el grass a 30°.

Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m²)	I_r (W/m²)	a(%)
Grass	1	30°	30°			
	2	30°	30°			
	3	30°	30°			
	.					
	.					
	.					
	10	30°	30°			

Nota: La tabla 13 registra luz incidente, luz reflejada y albedo para el ángulo de 30°.

Una vez recolectado los datos de la luz incidente y la luz reflejado se procede a calcular el albedo considerando la ecuación indicada en teoría y posteriormente obteniendo el albedo porcentual, también se realizará los gráficos utilizando la hoja de cálculo Microsoft Excel para cada muestra y para cada ángulo en estudio.

3.8.4. Proceso del Cálculo de la Variación de Temperatura

Para el análisis del calentamiento de la atmosfera se obtendrá promedio de los valores porcentuales de albedos, así como de la radiación de luz incidente y reflejada, según lo requiera el estudio.

El diseño experimental se basa en el área ortogonal ($A_{\perp}$) de la superficie(muestra) y en el ángulo de estudio, donde se tiene la siguiente ecuación:

$$A_{\perp} = A \cos \theta \quad (22)$$

Donde:

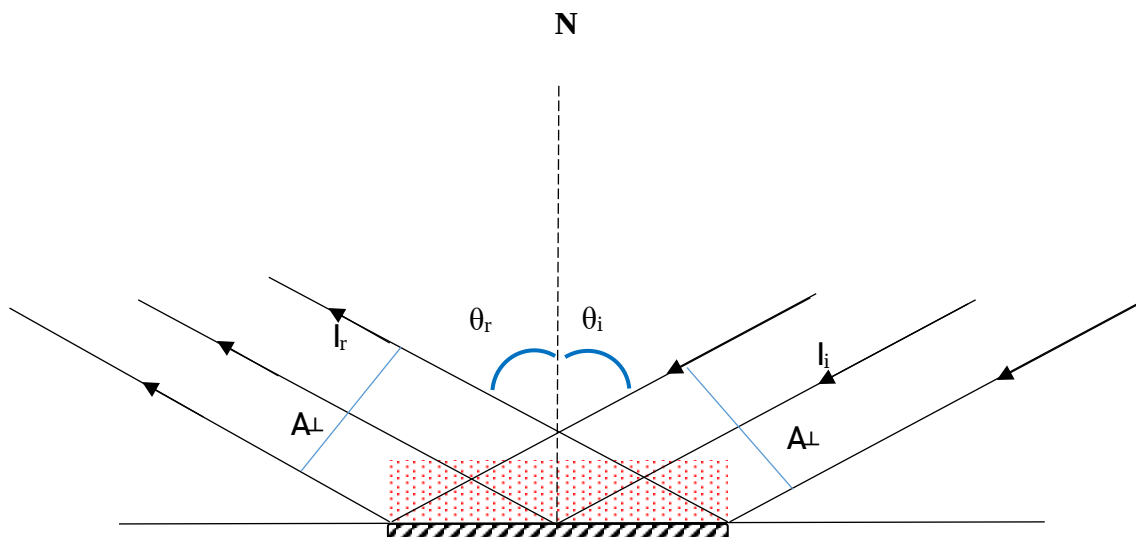
$A = \pi r^2$ área de la superficie

θ : el ángulo en estudio.

Por la primera ley de reflexión se obtuvo experimentalmente los valores de la luz incidente y luz reflejada, como se muestra la siguiente figura.

Figura 30

Luz incidente y reflejada en la muestra.



Nota: La luz solar incidente ingresa hacia la superficie muestra en estudio y la superficie refleja la luz solar con la misma elevación del ángulo respecto a la normal.

Los valores iniciales medidos por el radiómetro de la radiación incidente (I_i) y radiación reflejada (I_r) sobre el área y superficie muestra en estudio se resume en la siguiente tabla.

Tabla 14

Registro de medidas de luz incidente y reflejado.

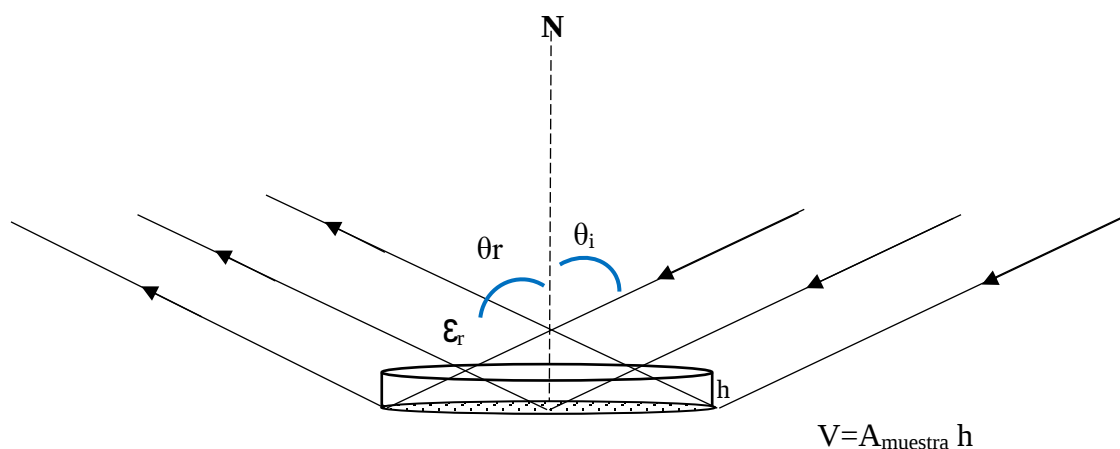
Muestra	θ (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)
Asfalto	53°		
	45°		
	30°		
Concreto	53°		
	45°		
	30°		

Muestra	θ (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)
Grass	53°		
	45°		
	30°		

Posteriormente con los datos medidos se realizó el cálculo del calor Q y con estos resultados se determinó la temperatura circundante para el análisis de la influencia en el calentamiento de la atmosfera considerando la siguiente figura.

Figura 31

Área donde se produce la variación de temperatura.



Nota: El gráfico muestra el volumen del área de la superficie muestra donde se evaluó la temperatura de la atmosfera.

La altura del cilindro que contiene aire del entorno a la muestra ha sido designada como h , debido a las características del experimento, se establece en aproximadamente 1 cm. Debido que el Sol se desplaza a lo largo el día (movimiento “relativo” respecto a la Tierra), entonces se puede

asumir tiempos aproximados durante el día. Como bien se conoce, la luz solar no incide de manera directa durante las horas de sol en un día. Su incidencia varía según la estación del año: en épocas de lluvia, predomina la luz difusa y la luz directa es porcentualmente mínima; en cambio, durante la estación seca predomina la radiación directa, mientras que radiación difusa se reduce significativamente.

Para medir $Q = \epsilon_r$ en un día, se ha elaborado la siguiente tabla, en el cual se han considerado los tiempos promedios correspondientes a una jornada de 12 horas de luz solar, el promedio de la radiación de luz reflejada, así como el área de las muestras y sus respectivos ángulos de estudio.

Tabla 15

Registro para determinar el calor $Q = \epsilon_r$.

Muestra	θ (°)	I_r (W/m ²)	$A_{\perp}$ (m ²)	t (s)	$Q = \epsilon_r$ (J)
Asfalto	53°				
	45°				
	30°				
Concreto	53°				
	45°				
	30°				
Grass	53°				
	45°				
	30°				

La radiación solar incide sobre la tierra, y en este proceso de interacción se producen fenómenos de reflexión y transmisión de la luz solar. El porcentaje de radiación que se refleja,

conocido como albedo, retorna a la atmosfera y contribuye al calentamiento atmosférico. Sin embargo, una parte importante de la radiación se transmite a la superficie, generando un calentamiento local que, a su vez se transmite a la atmósfera.

La transferencia de calor desde la superficie en estudio hacia el aire circundante se produce por conexión.

El calor Q transferido al aire puede calcularse mediante la siguiente relación:

$$Q = m_{aire} * c_{aire} * \Delta T = \epsilon_r \quad (23)$$

Donde:

m_{aire} = masa del aire(kg)

c_{aire} = calor específico del aire (J/kg°C)

ΔT = Diferencia de temperatura entre la superficie y el medio circundante, °C

ϵ_r = La energía referente a la luz reflejada

Por otro lado, Por otro lado, la energía asociada a la luz reflejada se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon_r = I_r A_{\perp} t \quad (24)$$

Conociendo ϵ_r , m_{aire} y C_{aire} , se obtiene ΔT :

$$\Delta T = \frac{\epsilon_r}{m_{aire} * c_{aire}} \quad (25)$$

La temperatura del aire circundante dependerá de la energía de luz reflejada y el tiempo promedio de exposición durante el día, así como del promedio de la luz reflejada de luz solar sobre la superficie. En la siguiente tabla se presenta la temperatura aproximada del aire en el entorno del área de la muestra en estudio:

Tabla 16

Registro para determinar la variación de la temperatura del aire.

Muestra	$\theta (^{\circ})$	m(kg)	c(J/kg $^{\circ}$ C)	ϵ_r (w/m 2)	$\Delta T(^{\circ}$ C)
Asfalto	53 $^{\circ}$				
	45 $^{\circ}$				
	30 $^{\circ}$				
Concreto	53 $^{\circ}$				
	45 $^{\circ}$				
	30 $^{\circ}$				
Grass	53 $^{\circ}$				
	45 $^{\circ}$				
	30 $^{\circ}$				

Las mediciones experimentales se realizaron en diferentes momentos del día, lo que permitió analizar cómo las variables involucradas influyen en el proceso de calentamiento atmosférico. Los resultados obtenidos permitieron verificar que el albedo influye en el calentamiento de la atmósfera de manera diferenciada, dependiendo de las condiciones de la superficie y la incidencia solar.

RESULTADOS

4.1. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información

En la tesis se utilizaron análisis e interpretación de la información obtenida de Excel para extraer conclusiones significativas de los datos recopilados. Esto incluyó análisis estadísticos descriptivos, análisis de correlación y modelos de regresión para comprender la relación entre el albedo y el calentamiento atmosférico. Los resultados se compararon con la literatura científica y se interpretaron considerando los patrones observados y las influencias específicas en el contexto de la ciudad del Cusco durante el año 2023.

En base a los valores obtenidos tomados en cada experimento y fundamentos de la óptica física, se realizó el análisis en cada caso y cada experimento:

Asfalto

Concreto

Grass

4.2. Técnicas para Demostrar la Verdad o Falsedad de las Hipótesis Planteadas

En la tesis se utilizaron técnicas para demostrar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas sobre la relación entre el albedo y el calentamiento atmosférico. Estas técnicas incluyeron la comparación de resultados con las hipótesis, análisis estadísticos para evaluar la significancia de las relaciones, modelos de predicción y validación, comparación con la literatura científica y la consideración de variables externas. Mediante estas técnicas se buscó fortalecer la validez de las hipótesis y validar las conclusiones obtenidas en el contexto específico de la ciudad del Cusco durante el año 2023.

4.3. Recolección de Datos y Muestra Gráfica

Mediante el instrumento radiómetro digital se recolectaron las medidas de la luz solar incidente I_i y de la luz solar reflejada I_r en las muestras de asfalto, concreto y grass, y para los ángulos de 53° , 45° y 30° considerados en la investigación. Luego, se determinaron los valores del albedo para cada muestra y ángulo.

Con las medidas obtenidas se puede verificar la variabilidad de la intensidad de la luz solar incidente y reflejada, y se determinó la variabilidad del albedo en las diferentes superficies y ángulos.

4.3.1. Muestra de Asfalto

La tabla y figuras a continuación evidencian la variabilidad de la luz solar incidente I_i , la luz solar reflejada I_r y la determinación del albedo en los ángulos de 53° , 45° y 30° considerados en la investigación para la superficie de asfalto.

Para el ángulo de 53°

Tabla 17

Registro de medidas para el ángulo de 53° en la muestra de asfalto.

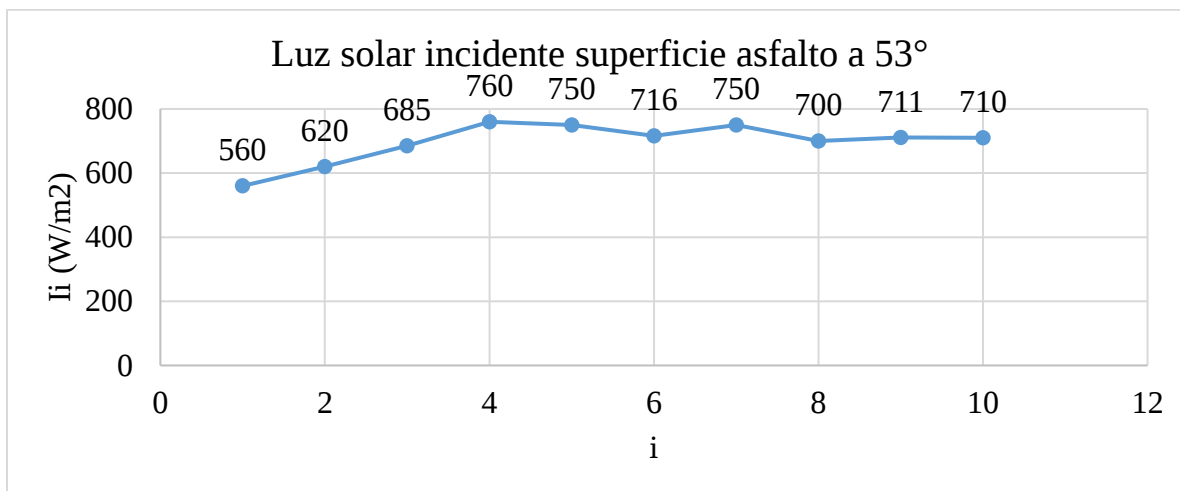
Muestra	i	$\theta_i (^\circ)$	$\theta_r (^\circ)$	$I_i (W/m^2)$	$I_r (W/m^2)$	$a(\%)$
Asfalto	1	53°	53°	560	14	2,50
	2	53°	53°	620	13	2,10
	3	53°	53°	685	10	1,46
	4	53°	53°	760	9	1,18
	5	53°	53°	750	8	1,07
	6	53°	53°	716	6	0,84
	7	53°	53°	750	9	1,20
	8	53°	53°	700	7	1,00
	9	53°	53°	711	8	1,13
	10	53°	53°	710	10	1,41

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo.

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 17.

Figura 32

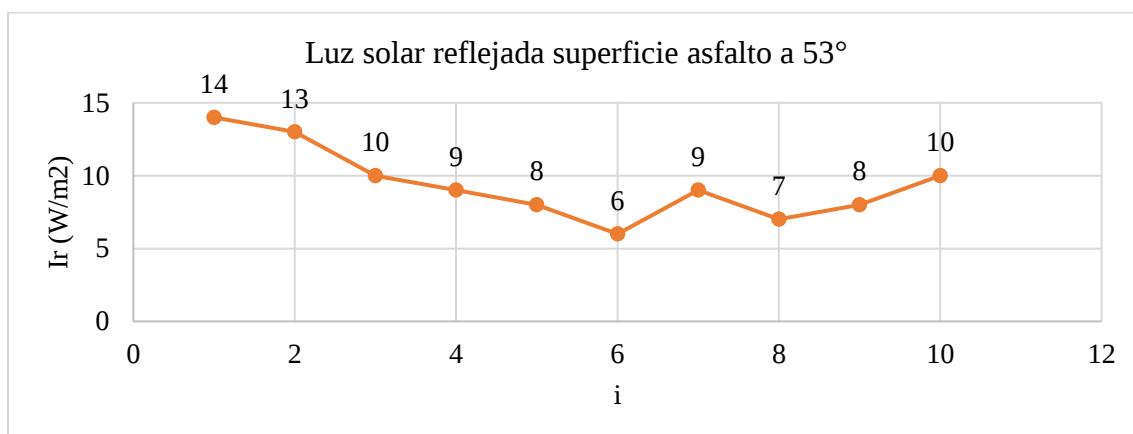
Gráfico de la luz incidente en la muestra de asfalto para un ángulo de 53°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i con muestra de asfalto, la variación de medidas entre 560 a 760 watt por metro cuadrado, con un valor promedio de 696,2 watt por metro cuadrado.

Figura 33

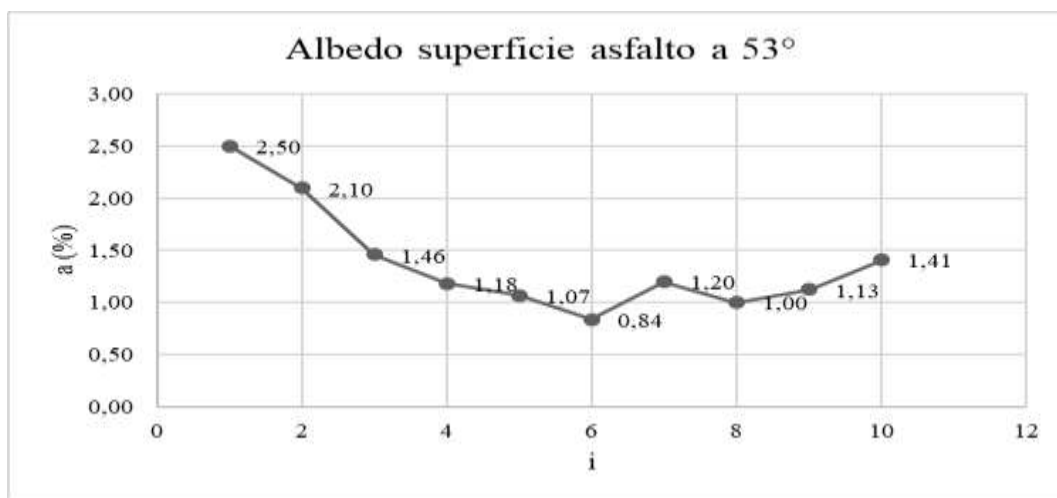
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de asfalto para un ángulo de 53°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r con muestra de asfalto. El gráfico muestra una variación entre 6 y 14 watt por metro cuadrado, con un valor promedio de 9,4 watt por metro cuadrado.

Figura 34

Gráfico de valores de albedo en la muestra de asfalto para un ángulo de 53°.



Nota: La figura muestra la variación del albedo a , para muestra de asfalto y se obtuvo un valor promedio de 1,39%.

Para el ángulo de 45°

Tabla 18

Registro de medidas para el ángulo de 45° en la muestra de asfalto.

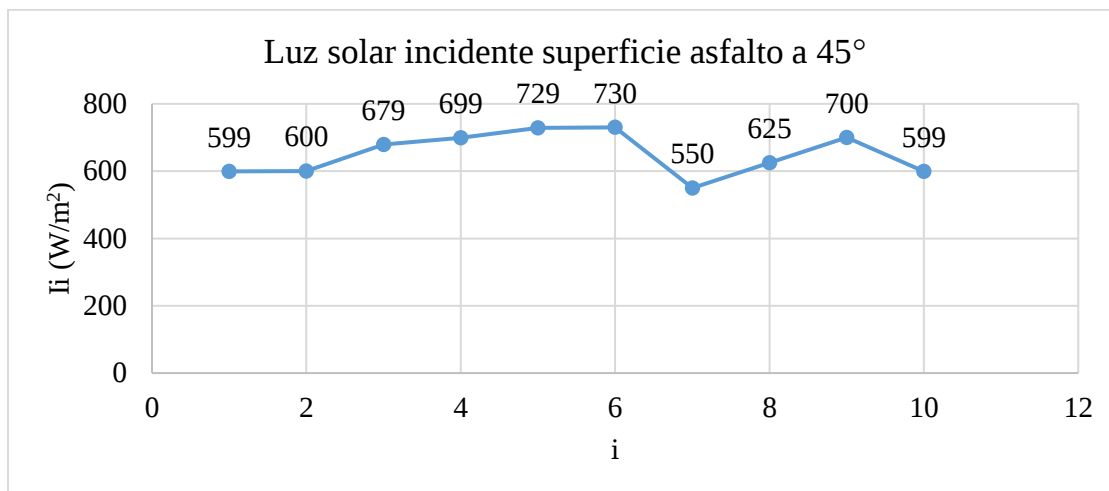
Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a(%)
Asfalto	1	45°	45°	599	9	1,50
	2	45°	45°	600	8	1,33
	3	45°	45°	679	6	0,88
	4	45°	45°	699	6	0,86
	5	45°	45°	729	7	0,96
	6	45°	45°	730	5	0,68
	7	45°	45°	550	11	2,00
	8	45°	45°	625	12	1,92
	9	45°	45°	700	7	1,00
	10	45°	45°	599	9	1,50

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo.

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 18.

Figura 35

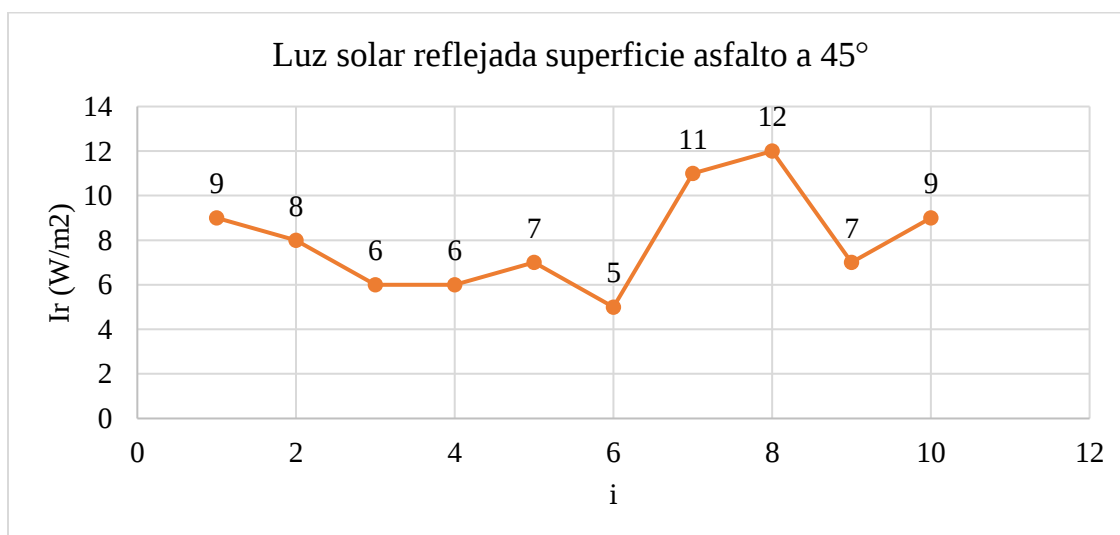
Gráfico de la luz incidente en la muestra de asfalto para un ángulo de 45°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para muestra de asfalto, que varía entre 550 y 730 watt por metro cuadrado, con un valor promedio de 651 watt por metro cuadrado.

Figura 36

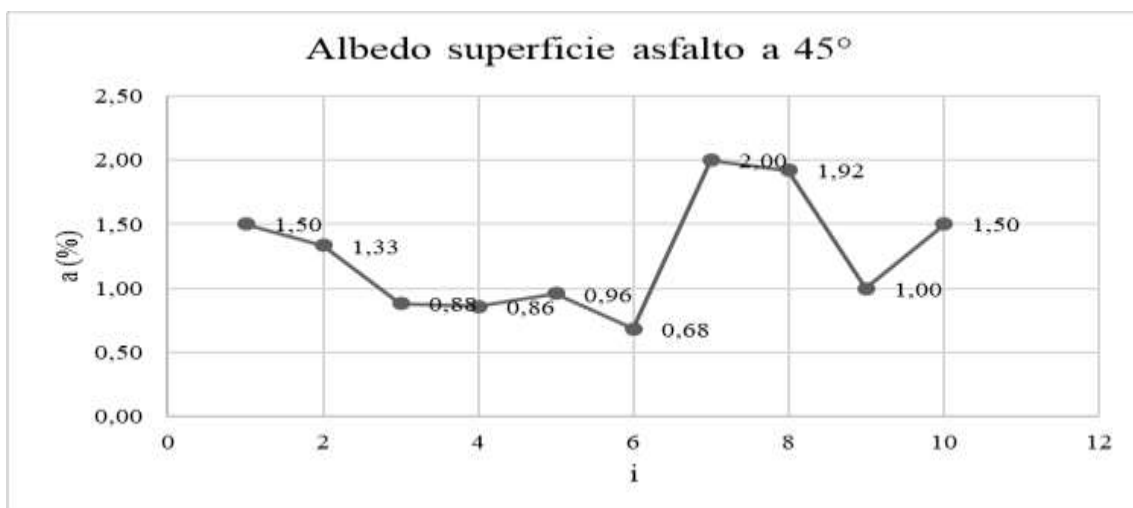
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de asfalto para un ángulo de 45°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r para muestra de asfalto, siendo los valores de 5 a 12 watt por metro cuadrado, con un promedio de 8 watt por metro cuadrado.

Figura 37

Gráfico de valores de albedo en la muestra de asfalto para un ángulo de 45°.



Nota: La figura muestra la variación del albedo a, para muestra de asfalto, donde se obtuvo un promedio de 1,27% para un ángulo de 45°.

Para el ángulo de 30°

Tabla 19

Registro de medidas para un ángulo de 30° en la muestra de asfalto.

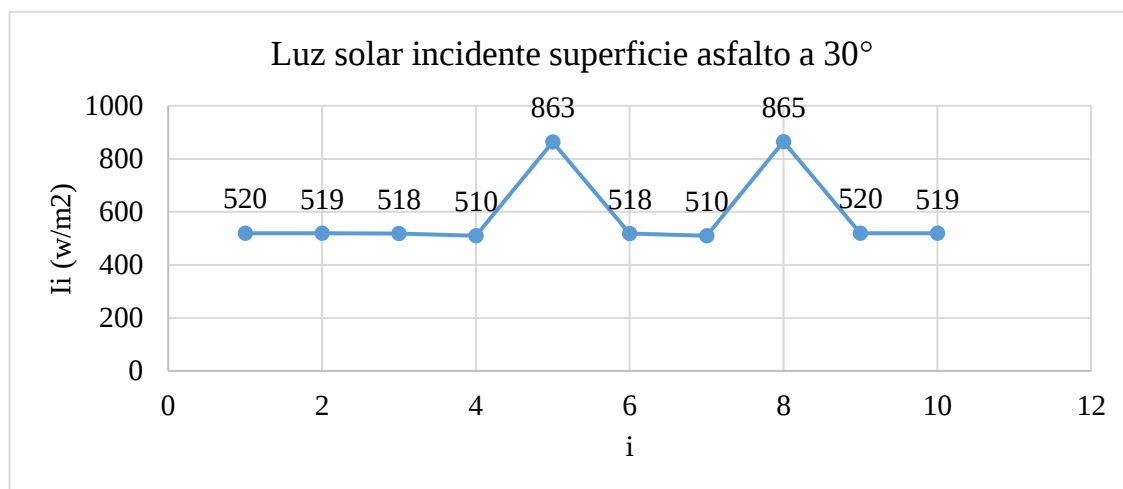
Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a(%)
Grass	1	30°	30°	520	8	1,54
	2	30°	30°	519	7	1,35
	3	30°	30°	518	6	1,16
	4	30°	30°	510	9	1,76
	5	30°	30°	863	16	1,85
	6	30°	30°	518	6	1,16
	7	30°	30°	510	9	1,76
	8	30°	30°	865	17	1,97
	9	30°	30°	520	8	1,54
	10	30°	30°	519	7	1,35

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo.

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 19.

Figura 38

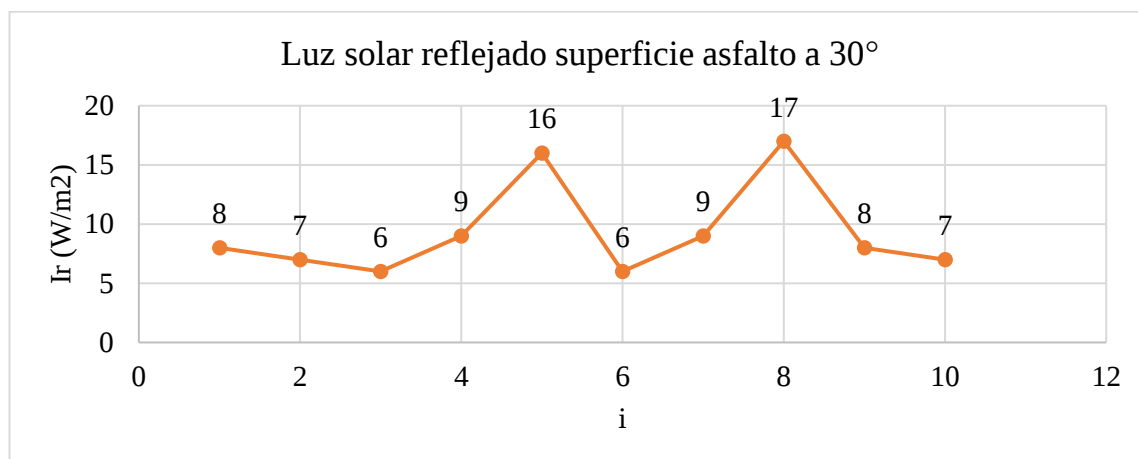
Gráfico de la luz incidente en la muestra de asfalto para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para muestra de asfalto, teniendo una variación de entre 510 y 865 watt por metro cuadrado y un promedio de 586,2 watt por metro cuadrado.

Figura 39

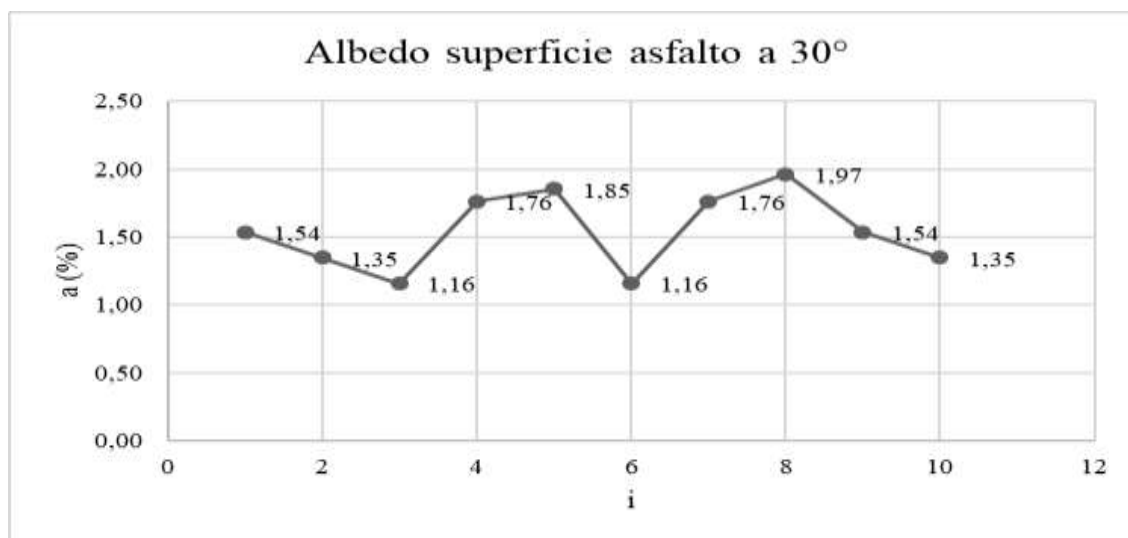
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de grass para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r , para muestra de asfalto, obteniendo una variación entre 6 y 17 watt por metro cuadrado, con un promedio de 9,3 watt por metro cuadrado.

Figura 40

Gráfico de los valores del albedo en la muestra de asfalto para un ángulo de 30° .



Nota: La figura muestra la variación del albedo a , para muestra de asfalto, donde se obtuvo un promedio de 1,54% de albedo para un ángulo de 30° .

4.3.2. Muestra de Concreto

La tabla y las figuras siguientes evidencian la variabilidad de la luz solar incidente I_i , la luz solar reflejada I_r y la determinación del albedo en los diferentes ángulos considerados en la investigación en la superficie de concreto.

Para el Ángulo de 53°

En la tabla 20 se registraron las medidas de la luz solar para el ángulo de 53° .

Tabla 20

Registro de medidas para un ángulo de 53° en la muestra de concreto.

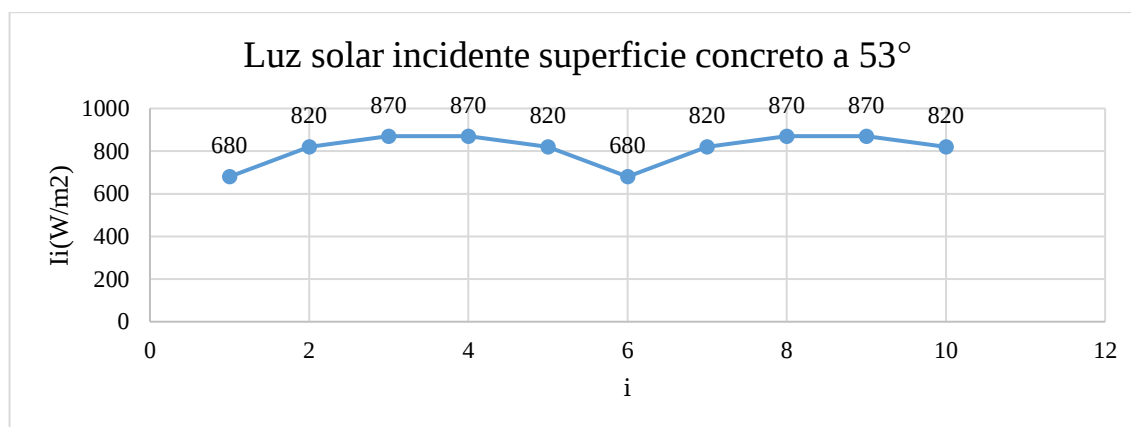
Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a(%)
Concreto	1	53°	53°	680	14	2,06
	2	53°	53°	820	13	1,59
	3	53°	53°	870	7	0,80
	4	53°	53°	870	8	0,92
	5	53°	53°	820	12	1,46
	6	53°	53°	680	14	2,06
	7	53°	53°	820	13	1,59
	8	53°	53°	870	7	0,80
	9	53°	53°	870	8	0,92
	10	53°	53°	820	12	1,46

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo en la muestra de concreto para un ángulo de 53°.

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 20.

Figura 41

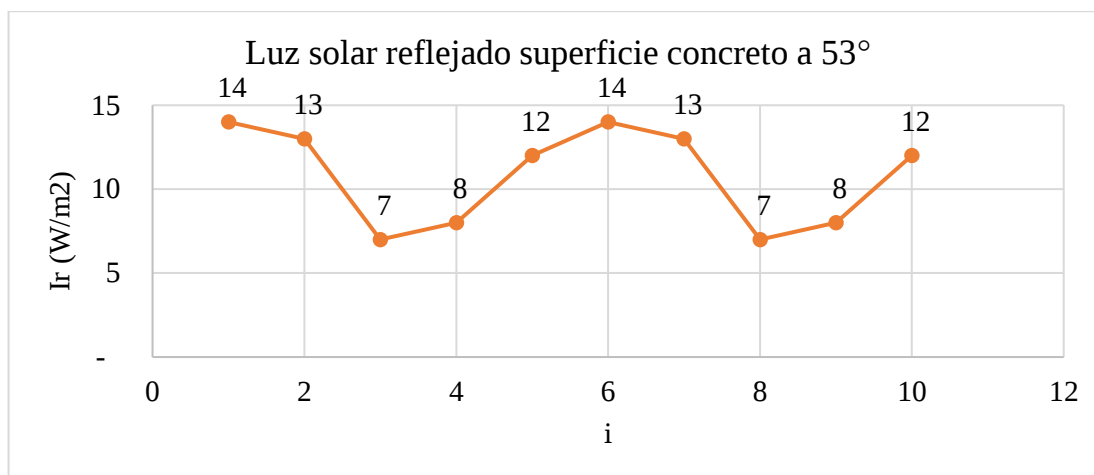
Gráfico de luz incidente en la muestra de concreto para un ángulo de 53°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para muestra de concreto, presenta una variación de entre 680 y 870 watt por metro cuadrado, y un promedio de 812 watt por metro cuadrado.

Figura 42

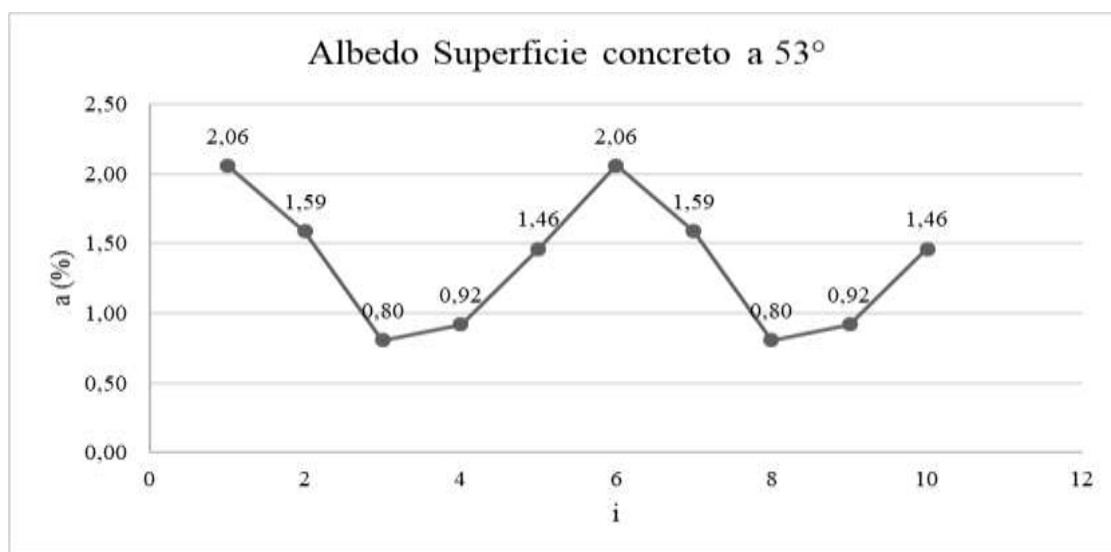
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de concreto para un ángulo de 53° .



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r para muestra de concreto, donde se puede observar que los datos varían desde 7 hasta 14 watt por metro cuadrado, con un promedio de 10,8 watt por metro cuadrado.

Figura 43

Gráfico de los valores del albedo en la muestra de concreto para un ángulo de 53° .



Nota: La figura muestra la variación del albedo (a) para la muestra de concreto, obteniéndose un promedio de 1.37% de albedo en la superficie de concreto.

Para el ángulo de 45°

Tabla 21

Registro de medidas para un ángulo de 45° en la muestra de concreto.

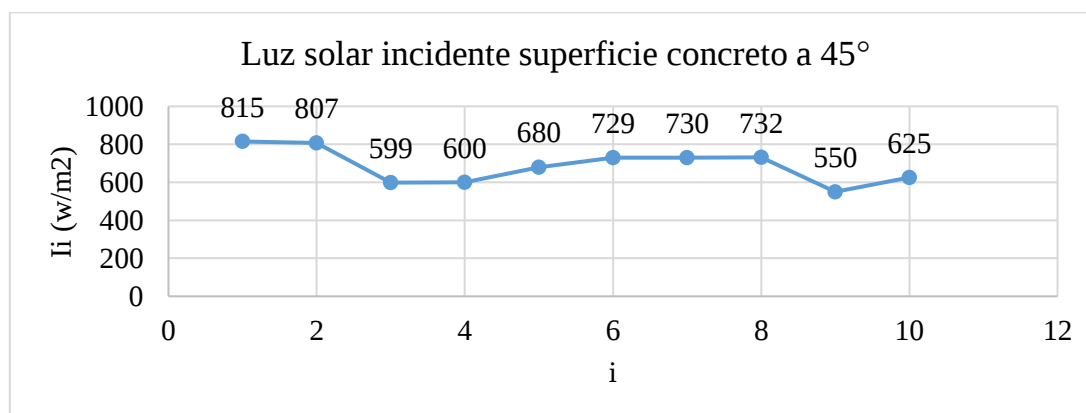
Muestra	I	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a(%)
Concreto	1	45°	45°	815	12	1,47
	2	45°	45°	807	13	1,61
	3	45°	45°	599	14	2,34
	4	45°	45°	600	9	1,50
	5	45°	45°	680	13	1,91
	6	45°	45°	729	12	1,65
	7	45°	45°	730	7	0,96
	8	45°	45°	732	13	1,78
	9	45°	45°	550	12	2,18
	10	45°	45°	625	12	1,92

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo.

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 21.

Figura 44

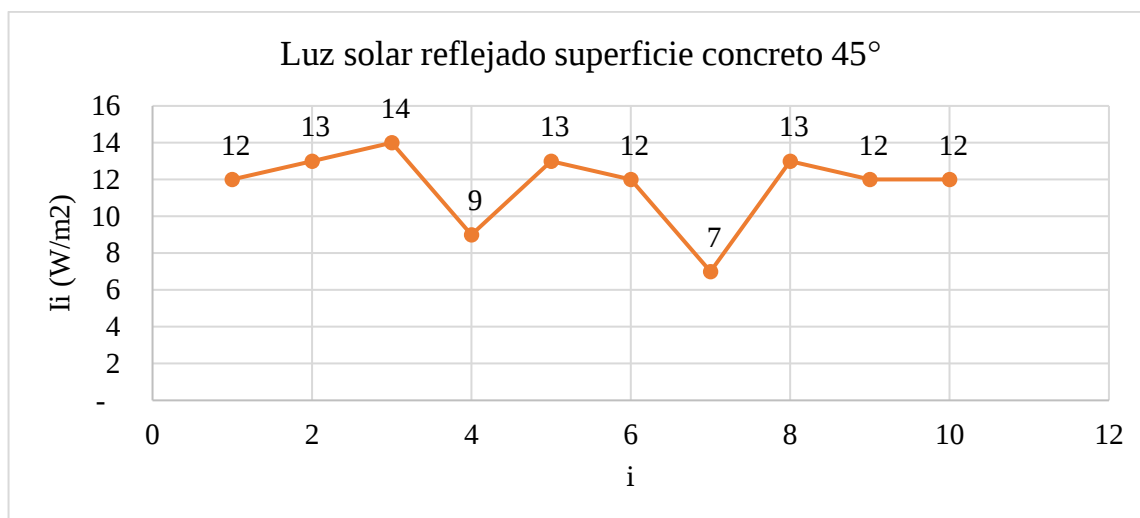
Gráfico de la luz incidente en la muestra de concreto para un ángulo de 45°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para muestra de concreto, las medidas varían de entre 599 y 815 watt por metro cuadrado de luz incidente, con un promedio de 686,7 watt por metro cuadrado.

Figura 45

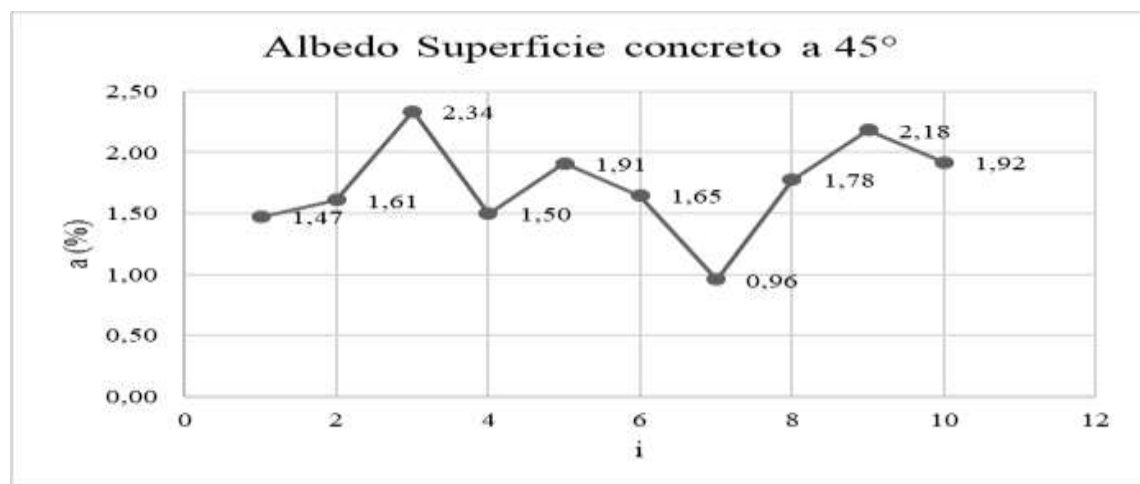
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de concreto para un ángulo de 45°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r para muestra de concreto, los rangos de variabilidad de entre 7 y 14 watt por metro cuadrado, con un promedio de 11.7 watt por metro cuadrado. Fuente: Elaboración propia

Figura 46

Gráfico de valores albedo en la muestra de concreto para un ángulo de 45°.



Nota: La figura muestra la variación del albedo (a) para muestra de concreto, obteniendo un promedio de 1,73% de albedo en la superficie de concreto para un ángulo de 45.

Para el ángulo de 30°

Tabla 22

Registro de medidas para un ángulo de 30° en la muestra de concreto.

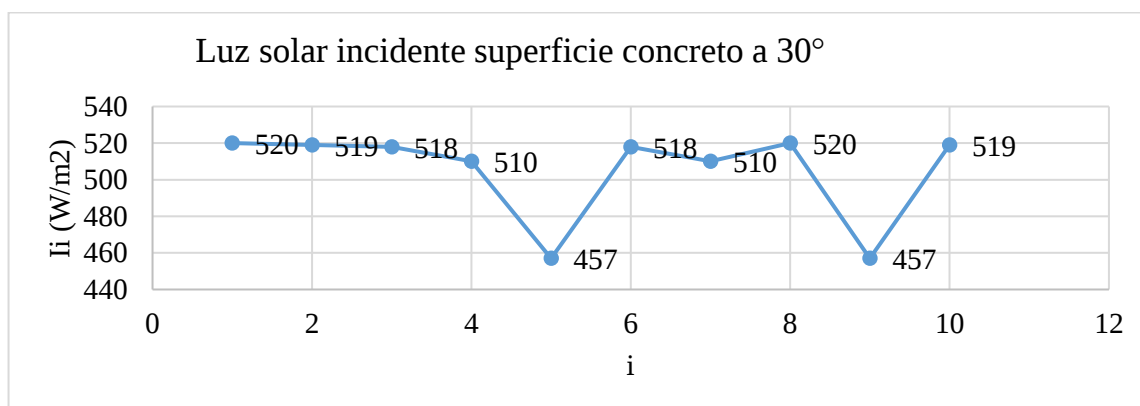
Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a(%)
Concreto	1	30°	30°	520	8	1,54
	2	30°	30°	519	8	1,54
	3	30°	30°	518	7	1,35
	4	30°	30°	510	6	1,18
	5	30°	30°	457	7	1,53
	6	30°	30°	518	7	1,35
	7	30°	30°	510	6	1,18
	8	30°	30°	520	8	1,54
	9	30°	30°	457	7	1,53
	10	30°	30°	519	8	1,54

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo.

En los siguientes gráficos corresponden al registro de la tabla 22.

Figura 47

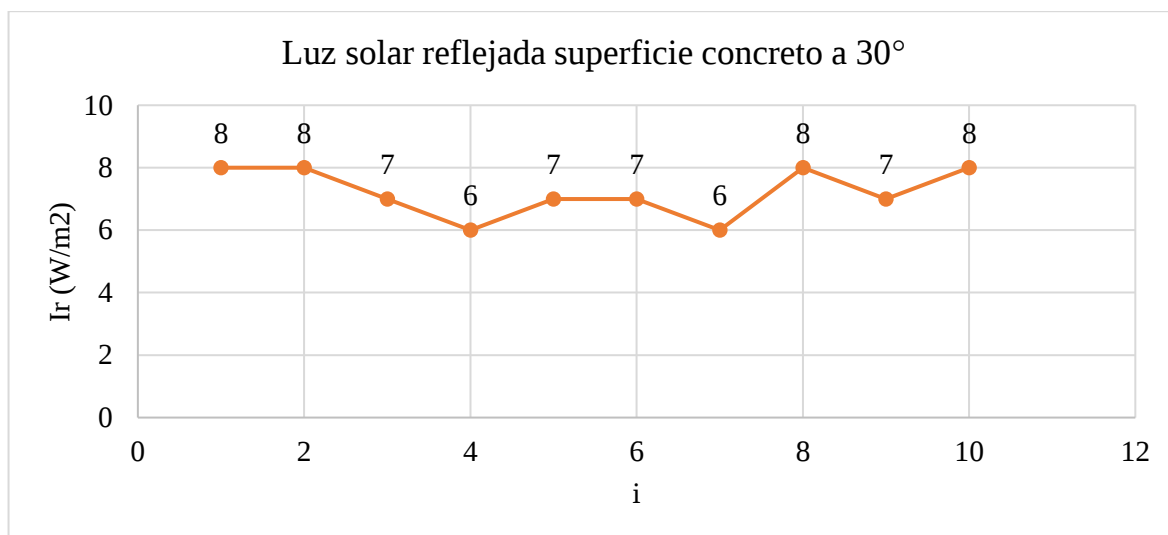
Gráfico de la luz incidente en la muestra de concreto para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para muestra de concreto, que varía entre 457 y 520, el promedio de la luz incidente es de 504,8 watt por metro cuadrado.

Figura 48

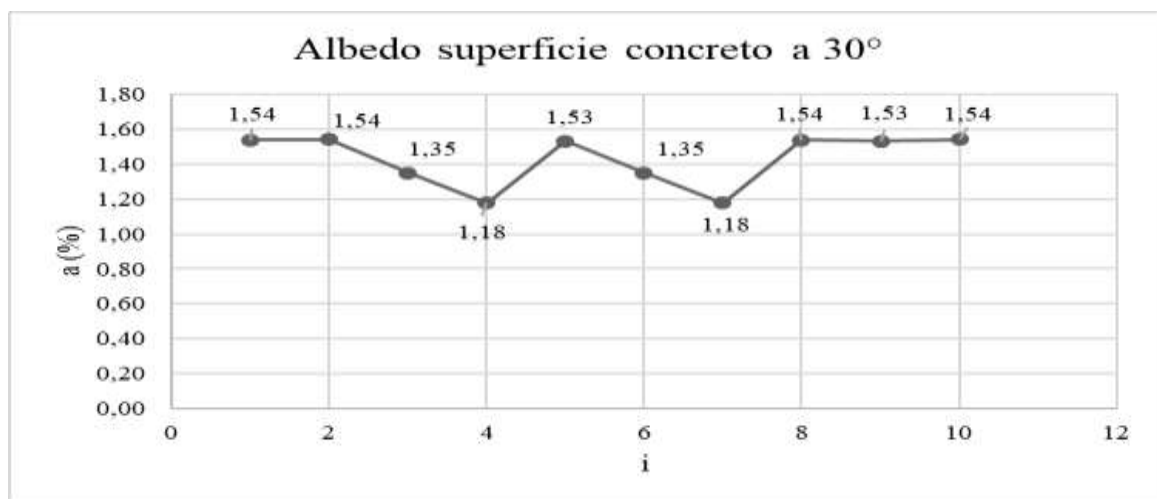
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de concreto para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r para la muestra de concreto, obteniendo las medidas entre 6 y 8 watt por metro cuadrado, con un promedio de 7,2 watt por metro cuadrado.

Figura 49

Gráfico de valores albedo en la muestra de concreto para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación del albedo (a) para la muestra de concreto, donde se obtiene un promedio de 1,43% de albedo correspondiente a un ángulo de 30°.

4.3.3. Muestra de Grass

La tabla y figuras a continuación evidencian la variabilidad de la luz solar incidente I_i , la luz solar reflejada I_r y el albedo para los ángulos de 53° , 45° y 30° considerados en la investigación y en la superficie de grass.

Ángulo de 53°

Tabla 23

Registro de medidas para un ángulo de 53° en la muestra de grass.

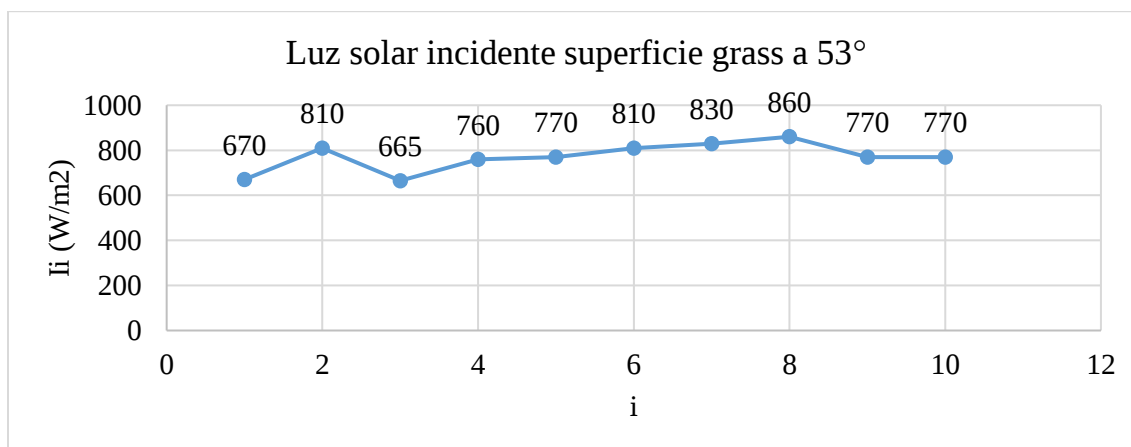
Muestra	I	$\theta_i (^\circ)$	$\theta_r (^\circ)$	$I_i (W/m^2)$	$I_r (W/m^2)$	a(%)
Grass	1	53°	53°	670	10	1,49
	2	53°	53°	810	11	1,36
	3	53°	53°	665	9	1,35
	4	53°	53°	760	7	0,92
	5	53°	53°	770	8	1,04
	6	53°	53°	810	6	0,74
	7	53°	53°	830	10	1,20
	8	53°	53°	860	7	0,81
	9	53°	53°	770	7	0,91
	10	53°	53°	770	10	1,30

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo en muestra de grass.

Se presentan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 23.

Figura 50

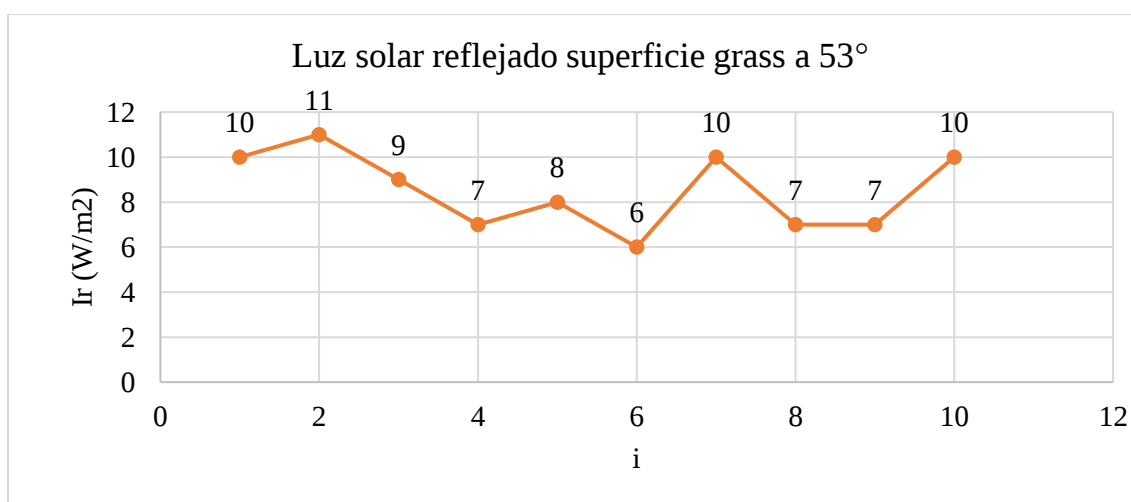
Gráfico de la luz incidente en la muestra de Grass para un ángulo de 53° .



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para la muestra de grass, con valores que oscilan entre 670 a 860 watt por metro cuadrado, y un valor promedio de 771,5 watt por metro cuadrado.

Figura 51

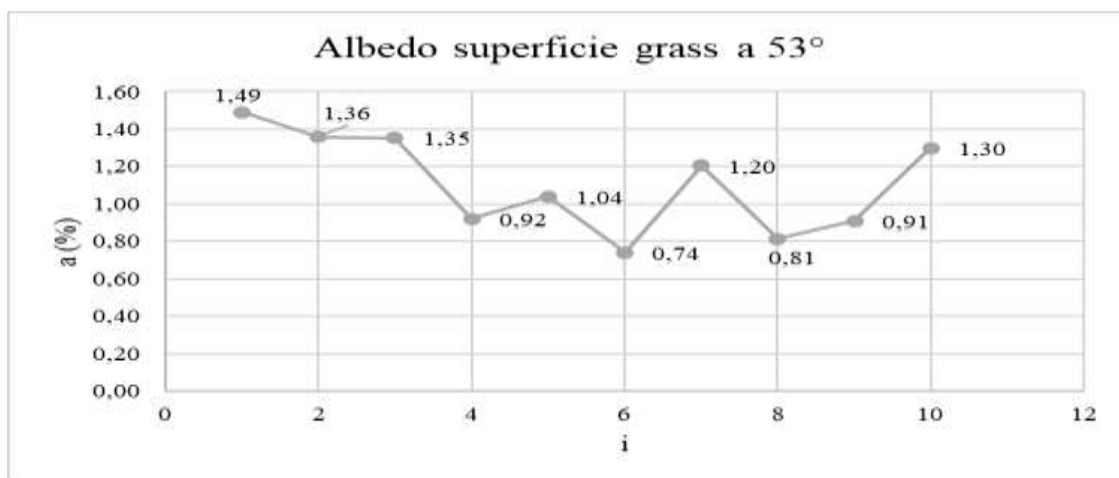
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de Grass para un ángulo de 53° .



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r para muestra de grass, con valores que oscilan entre 6 a 11 watt por metro cuadrado, y un valor promedio de 8,5 watt por metro cuadrado.

Figura 52

Gráfico de valores de albedo para la muestra de Grass en el ángulo de 53°.



Nota: La figura muestra la variación del albedo (a) para la muestra de Grass, obteniéndose un promedio de 1,11% de albedo.

Ángulo de 45°

Tabla 24

Registro de medidas para un ángulo de 45° en la muestra de grass.

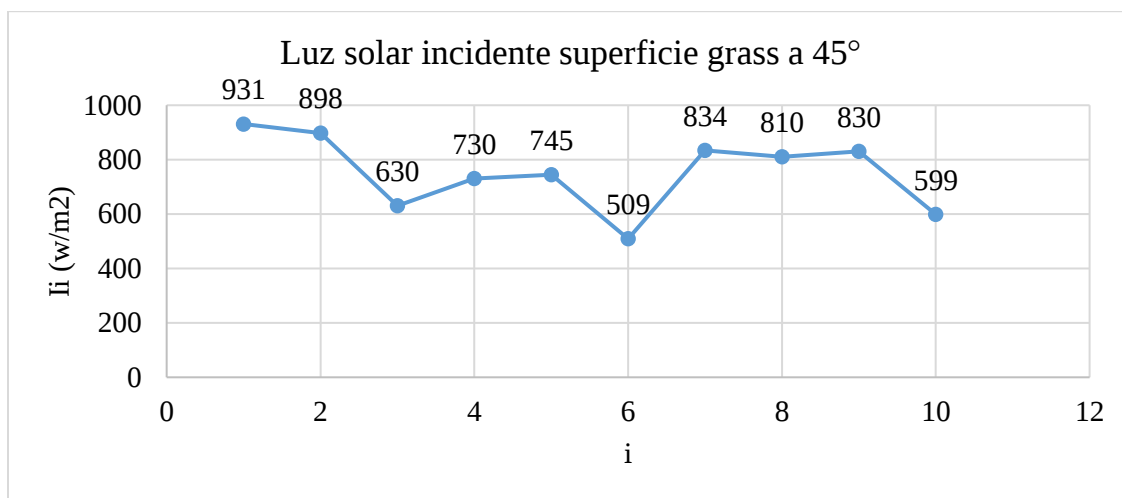
Muestra	I	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a(%)
Grass	1	45°	45°	931	24	2,58
	2	45°	45°	898	14	1,56
	3	45°	45°	630	23	3,65
	4	45°	45°	730	26	3,56
	5	45°	45°	745	27	3,62
	6	45°	45°	509	18	3,54
	7	45°	45°	834	17	2,04
	8	45°	45°	810	17	2,10
	9	45°	45°	830	16	1,93
	10	45°	45°	599	14	2,34

Nota: La tabla 24 registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo en la muestra de grass para un ángulo de 45°.

Se representan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 24.

Figura 53

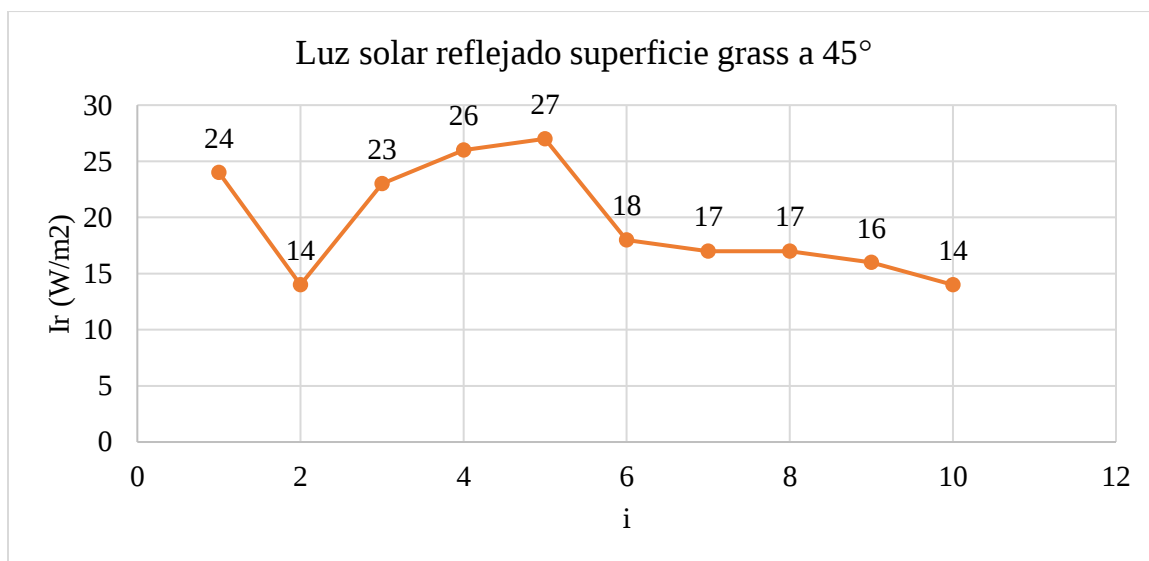
Gráfico de la luz incidente en la muestra de Grass para un ángulo de 45° .



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para la muestra de grass, con valores entre 509 a 931 watt por metro cuadrado, y un promedio de 751,60 watt por metro cuadrado.

Figura 54

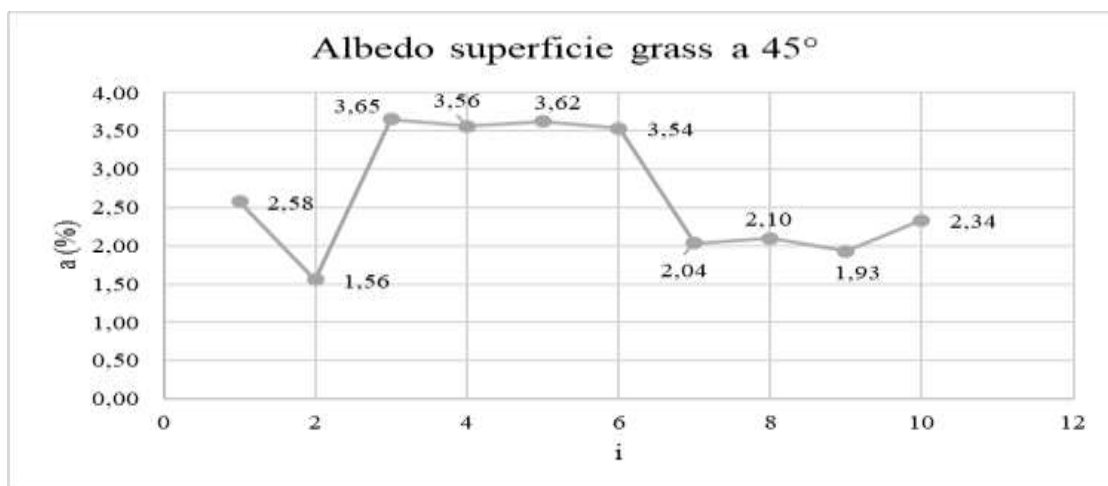
Gráfico de la luz reflejada en la muestra de Grass para un ángulo de 45° .



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r para muestra de grass, con valores que van entre 14 y 27 watt por metro cuadrado, y un promedio de 19,6 watt por metro cuadrado.

Figura 55

Gráfico de los valores del albedo en la muestra de grass para un ángulo de 45°.



Nota: La figura muestra la variación del albedo a determinado, para la muestra de grass, con valores que van entre 1,56 y 3,65, y un promedio de 2,69% de albedo.

Ángulo de 30°

Tabla 25

Registro de medidas para un ángulo de 30° de la muestra grass.

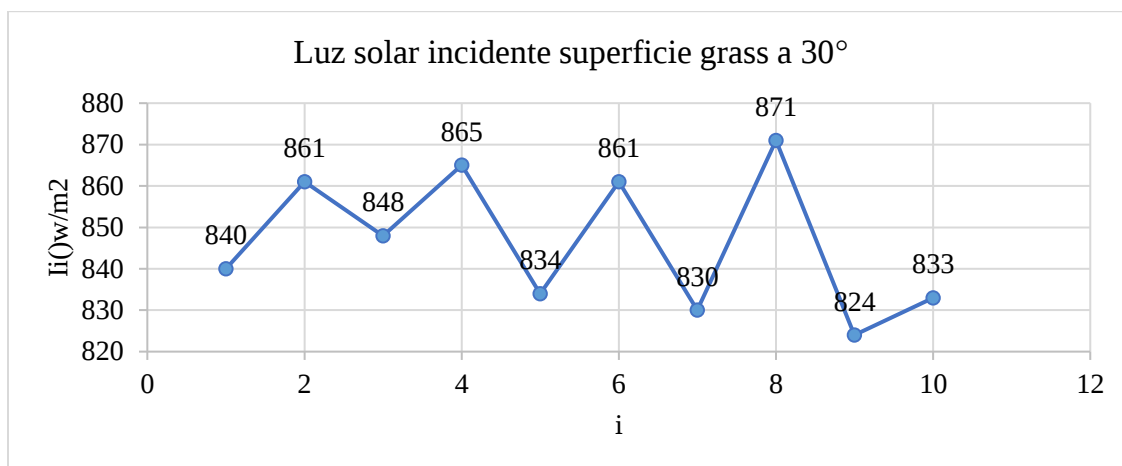
Muestra	i	θ_i (°)	θ_r (°)	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a %
Grass	1	30°	30°	840	8	0,95
	2	30°	30°	861	9	1,05
	3	30°	30°	848	8	0,94
	4	30°	30°	865	8	0,92
	5	30°	30°	834	9	1,08
	6	30°	30°	861	9	1,05
	7	30°	30°	830	9	1,08
	8	30°	30°	871	8	0,92
	9	30°	30°	824	9	1,09
	10	30°	30°	833	8	0,96

Nota: La tabla registra luz incidente, luz reflejada y la determinación del albedo.

Se presentan los gráficos correspondientes al registro de la tabla 25

Figura 56

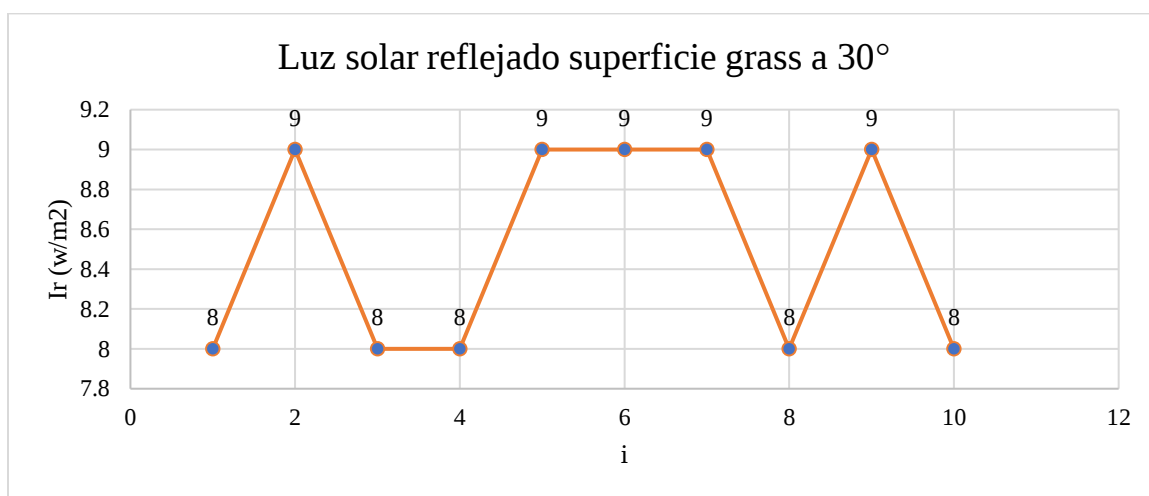
Gráfico de la luz incidente en muestra de grass para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar incidente I_i para muestra de grass, los valores obtenidos están entre 824 a 871 watt por metro cuadrado, siendo el promedio de 846,70 watt por metro cuadrado.

Figura 57

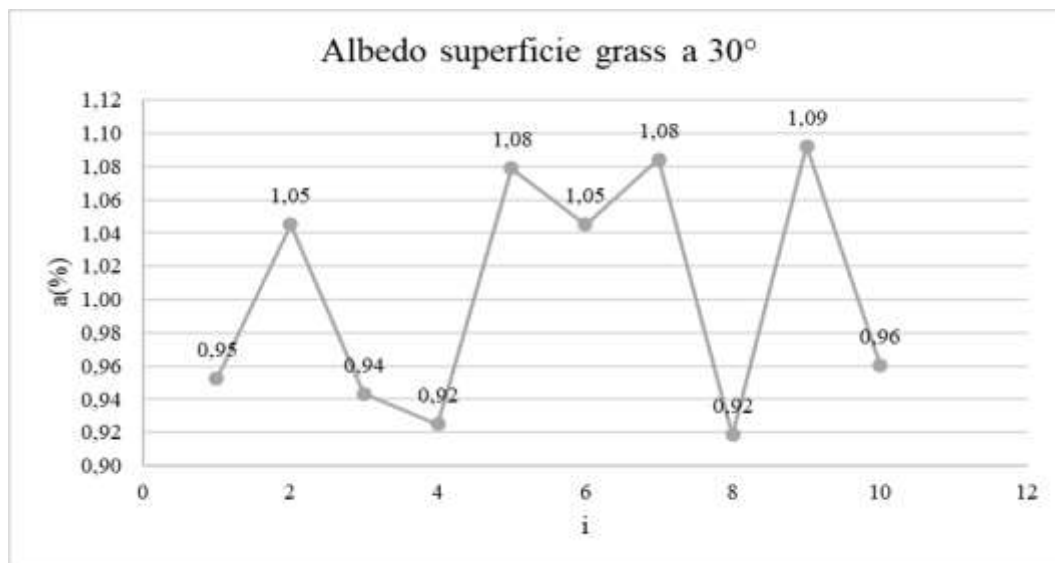
Gráfico de la luz reflejada en muestra de Grass para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación de la luz solar reflejada I_r para muestra de grass, los valores obtenidos oscilan entre 8 y 9 watt por metro cuadrado, y el valor promedio de la luz reflejada es de 8,5 watt por metro cuadrado.

Figura 58

Gráfico de los valores del albedo en la muestra de grass para un ángulo de 30°.



Nota: La figura muestra la variación del albedo (a) determinado para muestra de grass, los valores obtenidos oscilan entre 0,92 y 1,09, obteniéndose un promedio de 1,00% de albedo.

4.4. Análisis de la Variabilidad del Albedo

Con las medidas de la luz solar incidente y la luz solar reflejada obtenidas dentro del DEDA, se determinó experimentalmente el valor del albedo. La tabla 26 presenta el promedio de la luz solar incidente, la luz solar reflejada y el albedo, medidos en las diferentes superficies muestra y ángulos considerados en la investigación. Los promedios del albedo encontrados para cada superficie se encuentran dentro del rango de valores reportados en otras investigaciones publicadas.

Tabla 26

Análisis de la Variabilidad del Albedo.

Muestra	Ángulo θ	I_i (W/m ²)	I_r (W/m ²)	a %	Promedio
Asfalto	53°	696,2	9,4	1,39	1,40
	45°	651	8	1,26	
	30°	586,2	9,3	1,54	
Concreto	53°	812	10,8	1,37	1,51
	45°	686,7	11,7	1,73	
	30°	504,8	7,2	1,43	
Grass	53°	771,5	8,5	1,11	1,60
	45°	751,6	19,6	2,69	
	30°	846,7	8,5	1,00	

Nota: La tabla muestra los promedios de las medidas obtenidas con el DEDA para las superficies de asfalto, concreto y grass, correspondientes a los ángulos de 53°, 45° y 30°. Estos promedios de albedo se encuentran dentro de los rangos previamente reportados en la literatura científica.

Figura 59

Análisis de la variabilidad del albedo según el ángulo de incidencia y cada muestra.



Nota: El gráfico muestra la variabilidad del albedo en cada superficie y para cada ángulo.

4.4.1. Cálculo de la Desviación Estándar Muestral:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (26)$$

Donde:

S : desviación estándar de la muestra

n : numero de datos

x_i : cada uno de los valores individuales

$\bar{x}$: media aritmética de los datos

$\sum$: símbolo de suma (suma todos los valores)

Para Asfalto

Cálculo de la media:

$$\bar{X} = \frac{1,39 + 1,26 + 1,54}{3} = 1,40$$

Restando la media a cada dato:

$$1,39 - 1,40 = -0,01$$

$$1,26 - 1,40 = -0,14$$

$$1,54 - 1,40 = 0,14$$

Elevando al cuadrado cada diferencia:

$$(-0,01)^2 = 0,0001$$

$$(-0,14)^2 = 0,0196$$

$$(0,14)^2 = 0,0196$$

Sumatoria de los cuadrados de las diferencias:

$$0,0001 + 0,0196 + 0,0196 = 0,0393$$

Para $(n-1) \Rightarrow (3-1) = 2$

$$\frac{0,0393}{2} = 0,01965$$

División estándar:

$$S = \sqrt{0,01965} = 0,14$$

Análisis Estadístico

Valores: 1,39 %, 1,26 %, 1,54 %

Media: aprox. 1,40 %

Desviación estándar: $\approx 0,14$

Es la superficie que presenta mayor uniformidad en valores de albedo, independientemente del ángulo de incidencia. Esta característica la convierte en un material con baja variabilidad, pero con un albedo generalmente reducido.

Para Concreto

Cálculo de la media:

$$\bar{X} = \frac{1,37 + 1,73 + 1,43}{3} = 1,51$$

Restando la media de cada dato:

$$1,37 - 1,51 = -0,14$$

$$1,73 - 1,51 = 0,22$$

$$1,43 - 1,51 = -0,08$$

Elevando al cuadrado cada diferencia:

$$(-0,14)^2 = 0,0196$$

$$(0,22)^2 = 0,0484$$

$$(-0,08)^2 = 0,0064$$

Suma los cuadrados de las diferencias:

$$0,0196 + 0,0484 + 0,0064 = 0,0744$$

Para $(n-1) \Rightarrow (3-1) = 2$

$$\frac{0,0744}{2} = 0,0372$$

Cálculo de la desviación estándar:

$$S = \sqrt{0,0744} = 0,19$$

Análisis Estadístico

Valores: 1,37 %, 1,73 %, 1,43 %

Media: aprox. 1,51 %

Desviación estándar: $\approx 0,19$

El concreto presenta una variabilidad baja en los valores de albedo, lo que indica un comportamiento más estable y predecible frente a los cambios en el ángulo de incidencia solar.

Para el Grass

Cálculo de la media:

$$\bar{X} = \frac{1,11 + 2,69 + 1,00}{3} = 1,60$$

Restando la media de cada dato:

$$1,11 - 1,60 = -0,49$$

$$2,69 - 1,60 = 1,09$$

$$1,00 - 1,60 = -0,60$$

Elevando al cuadrado cada diferencia:

$$(-0,49)^2 = 0,2401$$

$$(1,09)^2 = 1,1881$$

$$(-0,60)^2 = 0,3600$$

Suma de los cuadrados de las diferencias:

$$0,2401 + 1,1881 + 0,3600 = 1,7882$$

Para $(n-1) \Rightarrow (3-1) = 2$

$$\frac{1,7882}{2} = 0,8941$$

Cálculo de la desviación estándar:

$$S = \sqrt{0,8941} = 0,95$$

Análisis Estadístico

- Valores: 1,11 %, 2,69 %, 1,00 %
- Media: aprox. 1,60 %
- Desviación estándar: $\approx 0,95$

Presenta la mayor variabilidad entre sus valores de albedo. A 45° muestra un pico notable (2.69 %), lo que indica una fuerte sensibilidad del pasto al ángulo de incidencia solar.

Análisis Final

El grass presenta una alta sensibilidad al ángulo de incidencia solar, lo que implica variaciones significativas en su balance. Esta característica tiene implicancias importantes en el balance energético de las áreas verdes, dependiendo de la hora del día o la estación del año.

El concreto y asfalto muestran baja variabilidad en sus valores de albedo. Entre ambos, el concreto refleja ligeramente más radiación solar que el asfalto, lo que sugiere un comportamiento más estable y predecible frente a los cambios en el ángulo solar.

4.5. Determinación del Calor Promedio

La determinación del calor Q equivalente a la energía $\mathcal{E}_r$, se realizó a partir de los promedios de las medidas obtenidas para las superficies de asfalto, concreto y grass, considerando los ángulos de 53° , 45° y 30° .

La transferencia de calor desde las superficies en estudio hacia el aire circundante ocurre por el mecanismo de convección. El calor Q transferido al aire se puede calcular mediante la siguiente relación:

$$Q = m_{aire} * c_{aire} * \Delta T = \mathcal{E}_r \quad (27)$$

$$\mathcal{E}_r = I_r A_{\perp} t \quad (28)$$

$$\mathcal{E}_r = I_r A \cos \theta t \quad (29)$$

La tabla 27 recopila los valores correspondientes a un área equivalente a la ciudad de Cusco y permite determinar de manera indirecta, el calor o energía reflejada en la atmósfera de Cusco.

Tabla 27

Registro de la determinación del calor $Q \approx \mathcal{E}_r$.

Muestra	Ángulo θ	t (s)	I_r (W/m ²)	$A_{\perp}/A$ (°m ² /m ²)	Q (J)
Asfalto	53°	18000	9,4	0,6	101520
	45°	18000	8	0,71	102240
	30°	18000	9,3	0,87	145638
Concreto	53°	18000	10,8	0,6	116640
	45°	18000	11,7	0,71	149526
	30°	18000	7,2	0,87	112752
Grass	53°	18000	8,5	0,6	91800
	45°	18000	19,6	0,71	250488
	30°	18000	8,5	0,87	133110

Nota: La tabla muestra la determinación del calor Q de las diferentes muestras y ángulos, considerando un tiempo promedio de horas luz, la luz solar reflejada y el área ortogonal de la muestra.

4.6.Determinación de la Temperatura Promedio del Aire Circundante

La determinación del calor transferido al aire circundante, en relación con la energía de reflexión obtenido para las diferentes superficies en estudios y los distintos ángulos, se realizó mediante la ecuación (4.2) obteniéndose la siguiente expresión.

$$\Delta T = \frac{\epsilon_r}{m_{aire} * C_{aire}} \quad (30)$$

Donde:

ΔT : Variación de temperatura

ϵ_r : Energía de reflexión

m_{aire} : Masa del aire

C_{aire} : Calor específico del aire

La temperatura del aire circundante dependerá de la energía de luz reflejada, la masa del aire y el calor específico del aire.

La obtención de la masa del aire en el entorno se determinó mediante la expresión:

$$m = \rho * V \quad (31)$$

Donde:

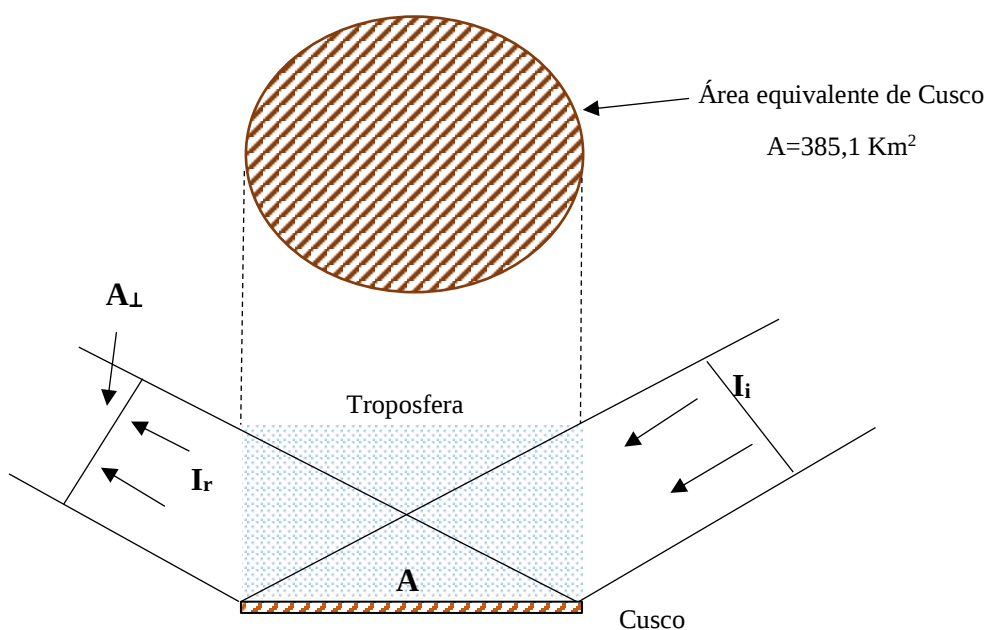
- Masa del aire (m)
- ρ : Densidad del aire en Cusco es 0.81(kg/m³)
- V : Volumen de aire considerado (m³)

4.6.1. Análisis del Incremento de la Temperatura en la Atmósfera de la Ciudad de Cusco

Después de determinar la variación de temperatura dentro del área de investigación, se consideró la ciudad del Cusco con un área aproximado de 385,1 km². Considerando que dicha área tiene forma circular, es posible estimar la influencia del albedo en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.

Figura 60

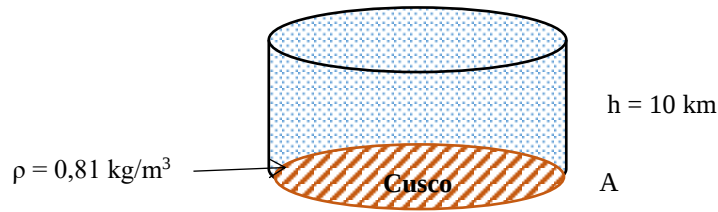
Área de la atmosfera de la ciudad de Cusco.



Nota: La altura media de la troposfera es de aproximadamente de 10km, según Chang (2002). Asimismo, se considera que la masa de la troposfera representa el 80% de la atmósfera terrestre.

Figura 61

Área y volumen equivalente a la ciudad del Cusco.



Nota: La ciudad del Cusco fue considerada como una muestra equivalente para estimar la variación de temperatura en su atmósfera.

Para hallar la masa se debe considerar el volumen del área en estudio en las diferentes muestras cuyas dimensiones son:

$$A_{Cusco} = \pi r^2 = 385,1 (10^3)^2 = 385,1 \times 10^6 \text{ m}^2$$

altura $h = 10 \text{ km}$

Aplicando las ecuaciones: (28) en (30)

$$\mathcal{E}_r = I_r A_{\perp} t$$

$$\Delta T = \frac{\mathcal{E}_r}{\rho A h c_{aire}}$$

$$\Delta T = \frac{I_r A_{\perp} t}{\rho A h c_{aire}} = \frac{I_r A \cos \theta_r t}{\rho A h c_{aire}} \quad (32)$$

Una vez determinado el calor Q , se calcula la variación de temperatura en la atmósfera correspondiente al área representativa de la ciudad del Cusco.

Tabla 28

Obtención de la temperatura en la atmosfera de la ciudad de Cusco.

Muestra	Ángulo θ	$Q = \xi_r$ (J)	m/A (kg/m ²)	c (J/kg°C)	$\Delta T(^{\circ}C)$
Asfalto	53°	101520	8100	1000	0,01
	45°	102240	8100	1000	0,01
	30°	145638	8100	1000	0,02
Concreto	53°	116640	8100	1000	0,01
	45°	149526	8100	1000	0,02
	30°	112752	8100	1000	0,01
Grass	53°	91800	8100	1000	0,01
	45°	250488	8100	1000	0,03
	30°	133110	8100	1000	0,02

Nota: La tabla muestra la determinación del incremento de temperatura en la atmósfera de Cusco.

4.6.2. Cálculo del Coeficiente de Correlación de Pearson

Para determinar la fuerza de relación entre el albedo y variación de temperatura se calcula el coeficiente de correlación mediante la siguiente expresión (33) y tabla 29.

Considerando que: $a = x_i$ y $\Delta T = y_i$

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (33)$$

Tabla 29

Resumen de albedo y variación de temperatura

Muestra	Ángulo θ	a %	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
Asfalto	53°	1,39	0,01
	45°	1,26	0,01
	30°	1,54	0,02
Concreto	53°	1,37	0,01
	45°	1,73	0,02
	30°	1,43	0,01
Grass	53°	1,11	0,01
	45°	2,69	0,03
	30°	1	0,02

Nota: La tabla muestra los ángulos considerados para cada superficie, el albedo determinado y la variación de la temperatura.

Para Asfalto

Se determina las desviaciones entre el albedo y la variación de la temperatura.

Tabla 30

Determina las desviaciones para el asfalto

x_i	y_i	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1,39	0,01	1,3967	0,0133	-0,0067	-0,0033	0,000045	0,000011
1,26	0,01	1,3967	0,0133	-0,1367	-0,0033	0,018687	0,000011
1,54	0,02	1,3967	0,0133	0,1433	0,0067	0,020535	0,000045
Σ 4,1900	0,0400					0,039267	0,000067

Se determina el coeficiente de correlación en (33)

$$r = \frac{0,000026}{\sqrt{(0,0393)(0,000067)}} = \frac{0,0014}{\sqrt{0,000002618}} = \frac{0,0014}{0,001618} \approx 0,89$$

Interpretación: Correlación fuerte positiva.

Para concreto

Se determina las desviaciones entre el albedo y la variación de la temperatura.

Tabla 31

Determina las desviaciones para el concreto

x_i	y_i	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1,37	0,01	1,5100	0,0133	-0,1400	-0,0033	0,0196	0,000011
1,73	0,02	1,5100	0,0133	0,2200	0,0067	0,0484	0,000044
1,43	0,01	1,5100	0,0133	-0,0800	-0,0033	0,0064	0,000011
Σ 4,53	0,04					0,0744	0,000067

Se determina el coeficiente de correlación en (33)

$$r = \frac{0,0022}{\sqrt{(0,0744)(0,000067)}} = \frac{0,0022}{\sqrt{0,000002618}} = \frac{0,0022}{0,002271} \approx 0,99$$

Interpretación: Correlación muy fuerte positiva.

Para Grass

Se determina las desviaciones entre el albedo y la variación de la temperatura.

Tabla 32

Determina las desviaciones para el grass

x_i	y_i	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1,11	0,01	1,6000	0,0200	-0,4900	-0,0100	0,240100	0,000100
2,69	0,03	1,6000	0,0200	1,0900	0,0100	1,188100	0,000100
1,00	0,02	1,6000	0,0200	-0,6000	0,0000	0,360000	0,000000
Σ 4,800000	0,060000					1,788200	0,000200

Se determina el coeficiente de correlación en (33)

$$r = \frac{0.0158}{\sqrt{(1,7882)(0,0002)}} = \frac{0,0158}{\sqrt{0,00036}} = \frac{0,0158}{0,01891} \approx 0,84$$

Interpretación: Correlación fuerte positiva.

Tabla 33

Tabla Resumen de desviaciones

Muestra	r	Interpretación
Asfalto	0,89	Fuerte positiva
Concreto	0,99	Muy fuerte positiva
Grass	0,84	Fuerte positiva

CONCLUSIONES

Respecto al objetivo general se ha observado que la variabilidad del albedo tiene una influencia significativa en el calentamiento de la atmosfera de la ciudad del Cusco, también se halló el valor promedio de correlación de Pearson siendo de 0,91 indicando que hay una correlación fuerte positiva, y al incremento de albedo la variación de temperatura aumenta.

En relación con el primer objetivo específico, correspondiente a la muestra de asfalto, se determinó la variación del albedo en momentos considerados mediante los ángulos de 53°, 45°, y 30°. El albedo promedio obtenido fue de 1,40%; haciendo un análisis indirecto se obtuvo la variación de temperatura de: 0,01°C para el ángulo 53°, 0,01°C para el ángulo de 45°, y 0,02°C para el ángulo de 30°; además con estos valores obtenidos en la investigación, se determinó el valor promedio de correlación de Pearson siendo de 0,89, este resultado es una correlación fuerte positiva que indica la influencia del albedo en superficie de asfalto influye en el calentamiento de la atmósfera.

Referente al segundo objetivo específico, correspondiente a la muestra de concreto, se realizó un estudio similar de la variación del albedo en diferentes momentos del día bajo los ángulos de 53°, 45°y 30°, obtenido un valor promedio fue de 1,51%. Posteriormente, mediante un análisis indirecto, se determinó una variación de temperatura de 0,01°C para un ángulo 53°, de 0,02°C para un ángulo de 45°, y de 0,01°C para un ángulo de 30°; similarmente el valor promedio de correlación de Pearson fue de 0,99 considerada correlación muy fuerte positiva. Estos datos permiten inferir que los diferentes ángulos de incidencia solar también ejercen una influencia significativa en el incremento térmico, reafirmando su papel en el calentamiento atmosférico

En cuanto al tercer objetivo específico, respecto a la muestra de Grass, se evaluó igualmente la variación del albedo en diferentes momentos del día, empleando los mismos ángulos de 53°, 45° y 30°, obteniéndose un valor promedio de 1,60%. A partir de un análisis indirecto, se determinaron variaciones de temperatura de 0,01°C para un ángulo de 53°, de 0,03°C para un ángulo de 45°, y de 0,02°C para un ángulo de 30°; y el valor promedio de correlación de Pearson fue de 0,8 correlación fuerte positiva. Con base en estos resultados experimentales y con los valores obtenidos en la investigación, se estableció que la variación de temperatura observada en función de los diferentes ángulos de incidencia confirma su influencia directa en el calentamiento de la atmósfera.

RECOMENDACIONES

En el caso del grass natural, la energía solar incidente es reflejada en mayor proporción. A partir de esta evidencia, se plantea la necesidad de implementar programas orientados a la difusión y promoción de estrategias que permitan ampliar las áreas cubiertas con *grass*, así como fomentar la arborización en la ciudad.

Por otra parte, se recomienda continuar desarrollando estudios sobre el albedo en relación con las diferentes superficies presentes en la ciudad del Cusco, con el propósito de profundizar en la comprensión de su influencia en la regulación térmica y en la mitigación del calentamiento atmosférico, contribuyendo así a la generación de información científica que respalde la toma de decisiones en materia de planificación urbana y ambiental.

REFERENCIAS

- Abanto, F. (s.f.). *Tecnología del Concreto: Teoría y Problemas*. San Marcos.
- American Concrete Pavement Association. (2010). *Albedo: A measure of pavement surface reflectance. R&T Update Concrete Pavement Research & Technology*
- Andrés, P. (2021). *Aplicación de imágenes satelitales en energías renovables: cálculo de albedo* [Tesis de maestría, Universidad de Salamanca]. Repositorio Gredos. <http://hdl.handle.net/10366/143962>
- Basurto y Chirinos (2022). *Propuesta de concreto con adición de diatomita que aumenta la reflectancia en pavimentos para mitigar el efecto isla de calor en zonas urbanas de Lima* [Tesis de Título, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima]. Repositorio Académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/667346>
- Bonan B. G. (2008). *Forest and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the climate Benefits of Forests*.
https://www.researchgate.net/publication/5299287_Forests_and_Climate_Change_Forcings_Feedbacks_and_the_Climate_Benefits_of_Forests
- Bunge, Mario (2004). *La Investigación Científica, Su estrategia y su filosofía*. Siglo XXI Editores Argentina.
- Chavez, K., & Humpire, Y. (2020). *Islas de calor y su relación con la contaminación acústica en la ciudad de Cusco, 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV.

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/64929/Ba%C3%B1os_CKB%20-Humipire_HY-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Censolar. (2013). *Manual de energía solar*. Centro de Estudios de la Energía Solar.

Conejo, D., & Vargas, S. (2018). *Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas de concreto asfáltico tipo 2 (MDC-19) con adición de polímeros* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/86cd3e25-a298-4413-8526-f9a1cc4394f3/content>

Cuadros Adriazola, J.E. (2019). *Efecto de las partículas absorbentes de luz (Pal) en la nieve sobre el Balance radiativo del Nevado Coropuna, Arequipa*. Universidad Nacional de San Martín. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/574>

Díaz-Giménez, E., & Zandivarez, A. (2014). *Astronomía: Una guía para curiosos y estudiosos del cielo*. EUDEBA.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Cengel, Y. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4.^a ed.). John Wiley & Sons.

Faires, V. M. (1983). *Termodinámica* (6.^a ed.). McGraw-Hill.

Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1964). *The Feynman lectures on physics, Vol. I: Mainly mechanics, radiation, and heat*. Addison-Wesley.

Flanner M.G., Shell K.M., Barlage M., Perovich D.K. & Tschudi M.A. (2011). Radiative forcing
an albedo feebak from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008.

Nature Geoscience. <https://www.nature.com/articles/ngeo1062>

Hansen, J. E. (2009). *Storms of my grandchildren: The truth about the coming climate
catastrophe and our last chance to save humanity.* Bloomsbury Press.

Hansen, J. E., & Sato, M. (2012). Paleoclimate implications for human-made climate change.
Climate Science, Awareness and Solutions.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del C. (2014). *Metodología de la investigación.*
McGraw-Hill/Interamericana Editores.

Hecht, E. (2000). *Optics* (4th ed.). Addison-Wesley.

Hernández, A. (1991). *Radiación solar: Fundamentos y aplicaciones.* Editorial Científica.
<https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/459>

Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation.* Academic Press.

Karlessi, T., Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., & Apostolakis, K. (2009).
Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures.
Solar Energy, 83(4), 538–551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.005>

Krauss, L. M. (1998). *The physics of Star.* Basic Books.

Kraus, J. D. (1984). *Electromagnetismo.*

- Lodosa, V. (2018). *Ordenación del entorno de los edificios de cara a la adaptación y mitigación del cambio climático* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Valladolid]. Repositorio UvaDoc. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/32101/TFG-A-098.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Laborde, M.A. & Williams J.J. Roberto (2016), *Energía Solar*. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Física y Naturales – ANCEFN. Buenos Aires, Argentina.
<https://www.ancefn.org.ar>
- Li H., Harvey r.J., Holland T.J. and Kayhanian M. (2013). *The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management*. IOPScience. <http://iopscience.iop.org/1748-9326/8/1/015023>
- Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2016). *University physics Volume 3* (Sección 1.2: The law of reflection). OpenStax.
- Mann, M. E. (2012). *The hockey stick and the climate wars: Dispatches from the front lines*. Columbia University Press.
- NASA Earth Observatory, (2010). *Calentamiento Global*.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming>
- Parracia, A. N. (2012). *Césped: principales especies, manejo y métodos de propagación usados en parques y jardines*. Universidad Católica de Argentina.
<https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/459>
- Pazos, A. (2021). *Impacto del material particulado PM 2,5 en la fusión del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco 2021*

- [Tesis de título, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
<https://hdl.handle.net/20.500.12394/10538>
- Pelkowski, J. (2007). El albedo terrestre. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 31(121), 499–520.
- Ramírez, R. (2016). *Simulación de los efectos del diseño urbano en el campo de temperatura usando modelación CFD en la microescala*.
https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Ramirez-N/publication/332766838_Simulacion_de_los_Efectos_del_Disenio_Urbano_en_el_Campo_de_Temperatura_Usando_Modelacion_CFD_en_la_Microescala/links/5cee9fe12
- Sampieri Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. (Sexta Edición). MCGRAW-HILL/ INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., México D.F.
- Sánchez Mio, S. (2003). *Energías renovables: Conceptos y aplicaciones*. Fundación Natura.
- Sarmiento G., Chacon M.E., Rada F. (1995). *Intercambio gaseoso, nitrógeno foliar y optimación en el manejo de Panicum maximun (tipo común) sometido a diferentes frecuencias de corte*. IICA, Costa Rica.
- Serrano, J. (2007). *Fundamentos de física atmosférica*. Editorial Reverté.
- Sears, F., Zemansky, M., Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria, con física moderna* (Vol. 2). Pearson Educación.
- Vera Mella, N. (2005). *Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes de satélite NOAA: Aplicación a la Península Ibérica* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://hdl.handle.net/2076728>

Raymond Chang, Willam College. (2002) “*Quimica*”, McGraw-Hill.

Zorogastúa, C. P., Quiroz, G. R., Garatuza, P. J. (2011). *Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imagines de satélite en Piura – Peru*. Ecología Aplicada.

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162011000100002&script=sci_arttext&tlng=pt

ANEXOS

Anexo 1

Acrónimos

DEDA : Dispositivo experimental para determinación de albedo

PM : Material Particulado

LAHM: Light Absorption Heating Method

SNICAR: Snow, Ice, and Aerosol Radiative

Anexo 2

Fotografías del Proceso de Edición

Figura 62

Ubicación de DEDAs en espera de ingreso de luz incidente



Nota: Fotografía de los DEDAs que están ubicados en superficie de concreto a la espera del ingreso de la luz solar incidente de acuerdo al grado de ángulo que le corresponde a cada dispositivo.

Figura 63

Inicio de ingreso de luz solar incidente



Nota: La fotografía muestra un DEDA con el ingreso del primer rayo de luz solar incidente de acuerdo al grado de ángulo que le corresponde a cada dispositivo.

Figura 64

Luz solar incidente completo listo para medir



Nota: La fotografía muestra al DEDA con el ingreso del rayo de luz solar incidente completo en la superficie para proceder a la medición.

Figura 65

Ubicación del sensor para medir el rayo de sol incidente.



Nota: La fotografía muestra al DEDA con la ubicación del sensor para el proceso de medición del rayo de luz solar incidente, el dispositivo se cierra para el momento de la medición.

Figura 66

Medición de luz solar incidente y la luz solar reflejada en asfalto.



Nota: La fotografía muestra la ubicación del DEDA en superficie de asfalto durante el proceso de medición del rayo de luz solar incidente y de la misma forma del rayo de luz reflejado.

Figura 67

Medición de luz incidente y reflejada en concreto



Nota: La fotografía muestra la ubicación del DEDA en superficie de concreto durante el proceso de medición del rayo de luz solar incidente y de la misma forma del rayo de luz reflejado.

Figura 68

Medición de luz incidente y reflejada en grass



Nota: La fotografía muestra la ubicación del DEDA en superficie de grass durante el proceso de medición del rayo de luz solar incidente y de la misma forma del rayo de luz reflejado.

Anexo 3

Matriz de Consistencia

VARIABILIDAD DEL ALBERDO EN ASFALTO, CONCRETO, GRASS Y SU INFLUENCIA EN EL CALENTAMIENTO DE LA ATMOSFERA EN LA CIUDAD DEL CUSCO - 2023

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGÍA
¿Cómo influye la variabilidad del albedo en asfalto, concreto y grass en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco, 2023?	Determinar la variabilidad del albedo, en las superficies de asfalto, concreto y grass, y su efecto en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco - 2023.	La variabilidad del albedo en superficies de asfalto, concreto y grass son influyentes en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco - 2023.	Variable 1: Variabilidad del albedo asfalto concreto y grass Variable 2: Temperatura atmosférica Influencia en el calentamiento de la atmósfera.	Intensidad reflejada, incidente, Se encuentra en porcentaje Composición del Material Reflectancia Densidad y Estructura Capacidad de retención de Calor: Variabilidad Temporal: Evalúa cómo varía el albedo considerando ángulos.	Tipo: Cuantitativo Nivel: Experimental Diseño: es experimental transversal porque las mediciones se realizaron en diferentes momentos del día Tipo: Aplicativa. Nivel: descriptivo Métodos:
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPOTESIS ESPECÍFICAS			

¿Cómo influye la variabilidad del albedo en asfalto en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco?	Determinar la variabilidad del albedo en asfalto y su influencia en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.	La variabilidad del albedo en asfalto influye significativamente en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.		Albedo Diurno Albedo Estacional Medioambiente aire aire Variabilidad Espacial: Evalúa cómo varía la temperatura en la ciudad del Cusco en relación con las distintas superficies asfalto, concreto y grass y su albedo.	De nivel teórico: Descriptivo, correlacional Diseño: Experimental Descriptivo Población y Muestra: Puntos de la ciudad del cusco Técnicas: Uso de instrumentos para medir el albedo Estadístico: Coeficiente de Pearson
¿Cómo influye la variabilidad del albedo en concreto en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco?	Determinar la variabilidad del albedo en concreto y su influencia en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco	La variabilidad del albedo en concreto influye significativamente en el calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.		● Diferencia de Temperaturas ● Perfil de Temperatura	
¿Cómo influye la variabilidad del albedo en grass en el calentamiento de la atmósfera en	Determinar la variabilidad del albedo en grass y su influencia en el calentamiento de la	La variabilidad del albedo en grass influye significativamente en el			

la ciudad del Cusco?	atmósfera en la ciudad del Cusco.	calentamiento de la atmósfera en la ciudad del Cusco.		●Correlación Albedo-Temperatura	
----------------------	-----------------------------------	---	--	---------------------------------	--