

Impacto de las celosías dinámicas en el confort visual de aulas universitarias: un estudio basado en simulación en climas de alta radiación solar

Impact of Dynamic Louvers on Visual Comfort in University Classrooms: A Simulation-Based Study in High-Solar-Radiation Climates

Jasmin Alejandra Morales Moreno¹, Ronal Froilan Mamani Chupa², Valkiria Ibárcena Ibárcena^{3*}

¹ Universidad Tecnológica del Perú. Email: jasminamoralesm@gmail.com

² Universidad Tecnológica del Perú. Email: ronalfmamani@gmail.com

³ Universidad Tecnológica del Perú. Email: valkiria.ibarcena@gmail.com

*Correspondence: Email: valkiria.ibarcena@gmail.com

RITA_24
December 2025
ISSN: 2340-9711
e-ISSN: 2386-7027

Received: 13-09-2025
Revised: 19-10-2025
Accepted: 22-11-2025
Published: 30-12-2025

Resumen

En contextos semiáridos del sur del Perú, caracterizados por alta radiación solar, resulta complejo garantizar condiciones adecuadas de confort visual en espacios educativos. En este marco, se analizó la variación del confort visual en aulas universitarias mediante simulación digital, a partir de la incorporación de sistemas de celosías dinámicas en fachadas con alta exposición solar. Se empleó una metodología mixta que integró el análisis de iluminancia, luminancia y deslumbramiento por luz natural, utilizando el índice *Daylight Glare Probability* (DGP). Se desarrollaron escenarios comparativos con y sin celosías dinámicas mediante simulación en el software *Velux Daylight Visualizer* (VDV). Los resultados muestran una reducción promedio del 42 % del área útil expuesta a deslumbramiento molesto o inaceptable ($DGP \geq 0.40$) durante el año. Se concluye que la aplicación de sistemas pasivos ajustables manualmente mediante ángulos de rotación constituye una estrategia viable para contextos con insuficientes recursos económicos, lo cual es crucial para mejorar el confort visual y reducir la dependencia de iluminación artificial en contextos educativos de alta radiación solar.

Palabras clave: iluminación natural, confort visual, espacios educativos.

Abstract

In southern Peru's semi-arid regions, which are characterized by high solar radiation, it is difficult to ensure adequate visual comfort in educational spaces. In this context, we analyzed the variation in visual comfort in university classrooms using digital simulation based on incorporating dynamic louver systems into facades with high solar exposure. A mixed methodology integrating the analysis of illuminance, luminance, and glare from natural light was used, employing the Daylight Glare Probability (DGP) index. Comparative scenarios with and without dynamic louvers were developed using the Velux Daylight Visualizer (VDV) software. The results showed an average 42 % reduction in the usable area exposed to annoying or unacceptable glare ($DGP \geq 0.40$) throughout the year. It is concluded that manually adjustable passive systems that use rotation angles are a viable strategy for contexts with limited economic resources. This strategy is crucial for improving visual comfort and reducing dependence on artificial lighting in educational settings with high solar radiation.

Keywords: natural lighting, visual comfort, educational spaces.

INTRODUCCIÓN

La calidad del ambiente lumínico en espacios educativos constituye un factor determinante para el confort visual y el desempeño de los usuarios durante las actividades académicas. En aulas universitarias, donde estudiantes y docentes permanecen prolongados periodos realizando tareas visuales de alta exigencia, las condiciones de iluminación natural influyen directamente en la percepción visual, la capacidad de concentración y el bienestar general del usuario. En este sentido, el diseño arquitectónico de la envolvente del edificio desempeña un papel fundamental en la regulación de la luz natural y en la generación de ambientes visualmente confortables.

En regiones caracterizadas por elevados niveles de radiación solar, el aprovechamiento de la iluminación natural representa simultáneamente una oportunidad y un desafío para el diseño arquitectónico. Si bien la abundante disponibilidad de luz diurna permite reducir la dependencia de iluminación artificial, la entrada directa de radiación solar puede generar condiciones de sobreiluminación, contrastes excesivos de luminancia y fenómenos de deslumbramiento que afectan la calidad visual del espacio interior. Estas situaciones se presentan con mayor frecuencia en aulas con amplias superficies acristaladas o con orientaciones expuestas a una elevada incidencia solar durante determinadas horas del día.

En el caso de las ciudades ubicadas al sur del Perú, la combinación de elevada radiación solar, atmósfera relativamente limpia y altitud genera condiciones lumínicas particularmente intensas que influyen en el comportamiento de los espacios interiores. A pesar de estas características climáticas, muchas edificaciones educativas continúan utilizando configuraciones arquitectónicas convencionales que no incorporan estrategias adecuadas de control solar, lo que puede derivar en ambientes visualmente inestables a lo largo del día y del año.

Frente a esta problemática, el diseño de dispositivos de control solar en fachada se ha consolidado como una estrategia arquitectónica relevante para regular la entrada de luz natural y mejorar el desempeño lumínico interior. Sin embargo, en numerosos contextos educativos, especialmente en instituciones con recursos económicos limitados, la implementación de sistemas automatizados de control solar resulta poco viable debido a sus requerimientos tecnológicos y de mantenimiento.

En este contexto, los sistemas pasivos de sombreado ajustables manualmente surgen como una alternativa potencialmente viable para mejorar el confort visual sin incrementar significativamente la complejidad tecnológica del edificio. No obstante, la evidencia empírica sobre su desempeño en aulas universitarias ubicadas en climas semiáridos de alta radiación solar sigue siendo limitada.

A partir de este escenario, el presente estudio analiza el impacto de celosías dinámicas horizontales de operación simplificada en el confort visual de aulas universitarias localizadas en un clima semiárido de alta radiación solar. Mediante simulaciones lumínicas digitales se evalúa el comportamiento de diferentes configuraciones de sombreado en términos de niveles de iluminancia y probabilidad de deslumbramiento, con el objetivo de determinar su eficacia como estrategia pasiva de control solar en contextos educativos con recursos tecnológicos restringidos. Los resultados de esta investigación buscan aportar evidencia técnica que contribuya al diseño arquitectónico de espacios educativos más confortables y energéticamente eficientes en regiones de alta radiación solar.

REVISIÓN DE LITERATURA

Radiación solar y confort visual en espacios educativos

En climas semiáridos, la elevada radiación solar global —que en el contexto peruano puede superar los 5.0 kWh/m²·día¹— no garantiza por sí misma condiciones adecuadas de confort visual en los espacios interiores. Cuando esta radiación ingresa sin control a los recintos educativos, puede generar niveles excesivos de iluminancia y altas luminancias en el campo visual, produciendo contrastes marcados y fenómenos de deslumbramiento, especialmente en aulas con amplias superficies acristaladas y orientaciones desfavorables. Estas condiciones dificultan el cumplimiento de los criterios establecidos por la Norma Peruana EM.010², situación reportada en hasta un 26 % de espacios educativos con características similares³.

La presencia de ambientes visualmente inadecuados incide directamente en el desempeño visual y cognitivo de los usuarios, considerando que estudiantes y docentes permanecen más del 50 % de su tiempo en aulas educativas⁴. Diversos estudios evidencian que niveles insuficientes o excesivos de iluminación natural afectan la capacidad de atención, generan fatiga visual y provocan molestias oculares persistentes, impactando negativamente en la

percepción de confort visual y el bienestar general ^{5,6}. Investigaciones recientes en entornos educativos confirman que la distribución inadecuada de la luz natural y los altos contrastes de luminancia pueden afectar la eficiencia en tareas visuales y el procesamiento de información en estudiantes universitarios ^{7,8}. En este sentido, la suficiencia lumínica no debe entenderse únicamente como el cumplimiento de rangos de iluminancia, sino como la capacidad del espacio para ofrecer condiciones visuales estables, sin deslumbramiento y con una distribución homogénea de la luz natural.

Limitaciones del diseño convencional en la iluminación de aulas

A nivel internacional, una proporción significativa de edificaciones educativas continúa operando con configuraciones de diseño convencionales, caracterizadas por fachadas sin estrategias eficaces de control solar y por el uso de iluminación artificial fija ^{3,9}. Estas configuraciones suelen derivar tanto en niveles de iluminancia inferiores a los 300 lx recomendados como en sobreiluminación localizada, lo que evidencia una gestión ineficiente de la luz natural a lo largo del año. Como consecuencia, se recurre al uso complementario de iluminación artificial o a soluciones interiores de sombreado, incrementando el consumo energético del edificio ¹⁰, aun cuando determinadas actividades académicas requieren niveles de iluminancia operativa superiores a 1000 lx ¹¹.

Sistemas de sombreado dinámico para el control de la luz natural

En el ámbito del diseño arquitectónico, los sistemas de sombreado dinámico se definen como dispositivos de control solar capaces de modificar su configuración geométrica u operativa en función de variables ambientales, tales como la posición solar, la radiación incidente o los requerimientos funcionales del espacio. A diferencia de los sistemas estáticos, cuya eficacia depende de condiciones específicas de orientación y época del año, los sistemas dinámicos presentan un mayor potencial para regular la entrada de luz natural y mitigar el deslumbramiento, contribuyendo a la optimización del confort visual y al uso eficiente de la energía ¹². Investigaciones recientes han demostrado que sistemas de sombreado cinético y celosías adaptativas permiten mejorar significativamente el desempeño lumínico interior mediante estrategias de control paramétrico y simulación digital ¹³⁻¹⁵.

Tecnologías y herramientas de simulación para evaluar el desempeño lumínico

En este contexto, se han desarrollado tecnologías basadas en sensores, mecanismos de seguimiento solar y sistemas de control automatizado que permiten ajustar la proyección de sombras a lo largo del día, respondiendo a la variabilidad climática diaria y estacional ¹². Asimismo, se han implementado algoritmos de optimización que facilitan la evaluación simultánea del comportamiento lumínico y energético mediante simulaciones paramétricas, apoyando la toma de decisiones en etapas tempranas de diseño ^{16,17}. Estudios recientes han incorporado técnicas de optimización multiobjetivo y simulaciones avanzadas para definir configuraciones óptimas de sistemas de sombreado, logrando reducciones significativas del deslumbramiento y mejoras en la disponibilidad de luz natural en edificios educativos y de oficinas ^{18,19}.

Estas estrategias han sido evaluadas principalmente mediante simulaciones digitales, modelos predictivos e imágenes de luminancia, demostrando mejoras significativas en el confort visual y, de manera secundaria, en la eficiencia energética en viviendas y edificios de oficinas ^{3,20-22}. Para ello, se han empleado instrumentos como cartas solares, luxómetros, espectrofotómetros y sensores térmicos ^{9,12,23}, así como herramientas de simulación digital tales como Radiance, Daysim, DIALux, Climate Studio y EnergyPlus ^{17,24}.

Estrategias de control solar y su impacto en el confort visual

Entre las estrategias de control solar más estudiadas se encuentran las cortinas interiores tipo roller sunscreen, las cuales han demostrado reducir el deslumbramiento interior bajo determinadas condiciones de intensidad y temperatura de color de la luz ^{24,25}. No obstante, la evidencia coincide en que los sistemas de sombreado dinámico presentan un mayor potencial para mejorar la calidad lumínica interior, alcanzando incrementos de hasta un 37 % en indicadores de confort visual y reducciones energéticas entre 4.5 % y 18.8 % ¹⁷, especialmente cuando se integran a estrategias pasivas y activas complementarias ^{21,26}.

Brecha de investigación

A pesar de los avances en el desarrollo de sistemas de sombreado dinámico, la mayoría de las investigaciones se ha concentrado en climas desérticos o tropicales ²⁶, con escasa aplicación en climas semiáridos de alta altitud. Asimismo, predominan estudios realizados en edificaciones residenciales y de oficinas, mientras que los espacios educativos —particularmente las aulas universitarias, caracterizadas por altas exigencias visuales y prolongados periodos de ocupación— han recibido menor atención en la literatura. Adicionalmente, muchos de los enfoques analizados se basan en sistemas automatizados de elevada complejidad tecnológica, cuya implementación puede resultar poco viable en contextos con limitaciones económicas y operativas.

En este contexto, persiste una brecha de conocimiento respecto al desempeño de soluciones dinámicas de operación simplificada aplicadas a aulas universitarias ubicadas en climas semiáridos de alta radiación solar. Frente a esta necesidad, la presente investigación analiza, mediante simulación digital, el impacto de celosías dinámicas en el confort visual de aulas universitarias situadas en la sierra sur del Perú, aportando evidencia técnica contextualizada que contribuya al diseño de estrategias pasivas de control solar orientadas a mejorar la calidad lumínica interior y el desempeño ambiental de los espacios educativos.

METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en edificaciones educativas ubicadas en la sierra sur del Perú, Arequipa (16.4° S, 71.5° O), a una altitud media de 2 330 m s.n.m. Esta región presenta un clima semiárido de alta radiación solar, caracterizado por elevados valores de radiación global anual, marcada variabilidad térmica diaria y predominio de cielos despejados durante gran parte del año. De acuerdo con los datos climáticos contenidos en el archivo EPW del SENAMHI (2023), estas condiciones favorecen una incidencia significativa de radiación solar directa sobre las fachadas con orientación noroeste, incrementando el riesgo de contrastes lumínicos elevados y deslumbramiento en espacios interiores sin estrategias de control solar pasivo.

Si bien el ingreso excesivo de radiación solar constituye una problemática recurrente en distintas regiones del mundo, su intensidad y comportamiento dependen de factores específicos como la latitud, la altitud y el régimen de cielos. En este sentido, la investigación se plantea como un estudio de caso contextualizado, cuyos resultados son transferibles a edificaciones educativas emplazadas en regiones de altitud con climas semiáridos, alta radiación solar y configuraciones geométricas y de orientación similares a las analizadas.

Se seleccionaron tres aulas universitarias con orientación noroeste y distintos usos funcionales: aula teórica (TE), laboratorio (LA) y taller (TA). Dos de los espacios se localizan en el cuarto nivel y uno en el nivel inferior, lo que permitió evaluar el comportamiento lumínico en diferentes condiciones de exposición vertical dentro de la edificación. El aula TA presenta una mayor proporción de superficie acristalada y una exposición solar más intensa, mientras que TE y LA poseen dimensiones y configuraciones espaciales similares (Tabla 1), aunque con requerimientos visuales distintos. En todos los casos, los materiales de muros, pisos y techos son equivalentes, lo que permitió descartar la materialidad como variable de control en el análisis.

Tabla 1: Características arquitectónicas base

Tipología	Áreas de vanos (m²)	Áreas de muros (m²)	Área del espacio (m²)	Actividades al interior
TE	2.28	16.9	67.5	Clases teóricas
LA	2.4	13.22	58.7	Estudios medio ambientales
TA	11.5	15.52	116.26	Diseño y dibujo arquitectónico

Se adoptó un enfoque metodológico mixto, de alcance explicativo y diseño no experimental, orientado al análisis integrado de la incidencia solar, las variables fotométricas, las condiciones de confort visual y los indicadores de deslumbramiento (Figura 1). Las mediciones in situ se utilizaron para calibrar y validar los modelos de simulación lumínica desarrollados posteriormente.



Figura 1: Esquema metodológico

La iluminancia se midió siguiendo el método de la cuadrícula (Figura 2) establecido en la norma ISO 8995-1 / CIE S 008/E ²⁷, dividiendo cada aula en celdas regulares y registrando los valores en el punto central de cada una, a una altura de 0.80 m sobre el nivel del suelo. Las mediciones se realizaron bajo condiciones de cielo despejado a parcialmente despejado, durante los intervalos horarios de 11:00–12:00 y 14:00–15:00, seleccionados por corresponder a los periodos de mayor riesgo de deslumbramiento diurno en orientaciones noroeste. En cada punto se realizaron registros a intervalos de 10 minutos, con tres repeticiones por segundo, utilizando un luxómetro digital Exttech LT300 calibrado. Los resultados se contrastaron con los valores establecidos por la norma peruana EM.010 ².

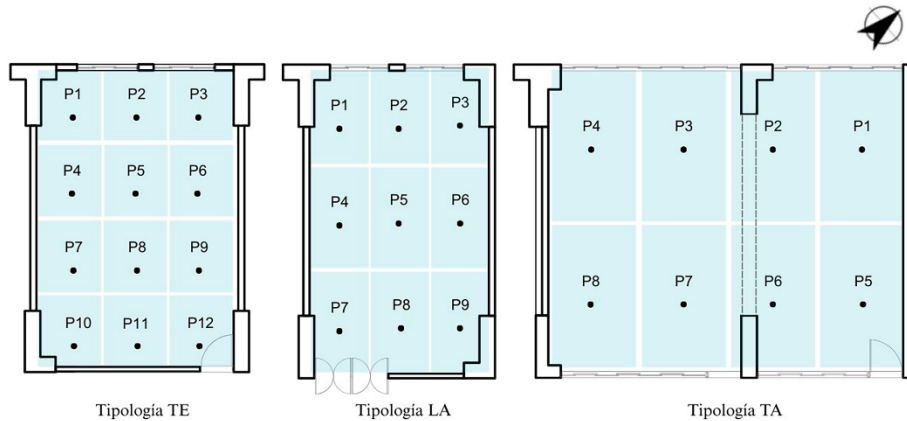


Figura 2: Puntos de monitoreo para medición de la iluminancia

La luminancia se evaluó conforme a la metodología propuesta por Alvarez-Valdivia, et al.²⁰, definiendo tres planos visuales a la altura del ojo humano desde el vano principal hacia el interior del recinto (Figura 3). Para la evaluación del deslumbramiento producido por luz natural se empleó DGP, de acuerdo con los criterios establecidos en la EN 17037:2018.

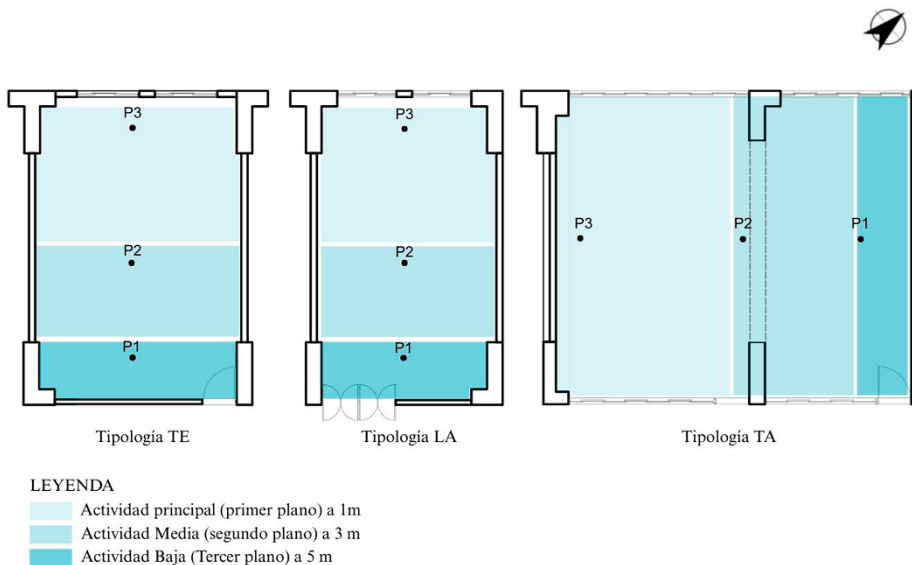


Figura 3: Puntos de monitoreo para medición de la luminancia

El software VDV se utilizó como herramienta de simulación para la generación de mapas de luminancia (cd/m^2) y escenas HDR del campo visual, considerando la geometría del recinto, la orientación, las propiedades reflectivas de las superficies interiores y los datos climáticos EPW del SENAMHI (2023). A partir de las luminancias simuladas, el DGP se calculó mediante la formulación propuesta por Wienold, and Christoffersen²⁸, clasificando los resultados en rangos de confort visual: imperceptible ($\text{DGP} < 0.35$), perceptible ($0.35\text{--}0.40$), molesto ($0.40\text{--}0.45$) e inaceptable ($\text{DGP} > 0.45$).

RESULTADOS

Incidencia solar en aulas universitarias con orientación noroeste

La orientación noroeste de 39° (Figura 4) determina una incidencia solar directa significativa durante los periodos analizados, con ángulos solares de 59° y 60° y azimuts de 42° y 50° a las 11:00 a.m. y 2:30 p.m., respectivamente. Esta condición produce manchas solares cuya extensión varía según la configuración de la envolvente, alcanzando 2.89 m^2 en las aulas TE y LA, y hasta 10.00 m^2 en el aula TA, lo que evidencia el impacto de la proporción acristalada y la ausencia de elementos de control solar en el desempeño lumínico interior.

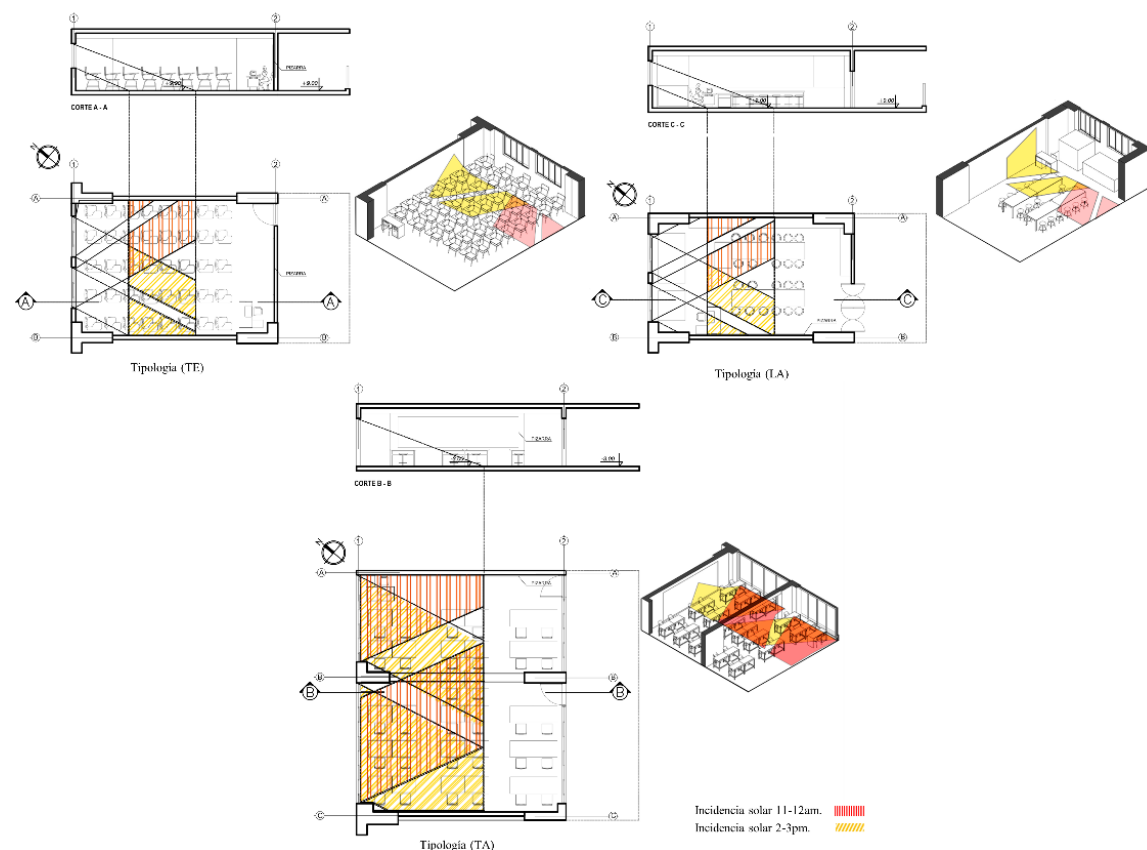


Figura 4: Incidencia solar

En el aula TA, el uso de mamparas de vidrio continuo sin alfeizar genera un ingreso de radiación solar directa no filtrada, ocasionando elevados contrastes de luminancia y condiciones de deslumbramiento durante la mañana. La incidencia directa sobre la pizarra compromete la visibilidad de contenidos proyectados y afecta el desarrollo de actividades que demandan alta precisión visual. Si bien las áreas alejadas de la mancha solar presentan menores niveles de iluminancia, la coexistencia de zonas altamente iluminadas y áreas relativamente más oscuras incrementa el gradiente lumínico, manteniendo condiciones de incomodidad visual en el campo de visión del usuario.

En las aulas TE y LA, aunque la extensión de la mancha solar es comparable, su impacto funcional difiere debido a la interacción entre uso del espacio y configuración arquitectónica. En LA, la radiación directa incide predominantemente sobre superficies de trabajo y pizarras, generando riesgos de deslumbramiento y fatiga visual, especialmente relevantes dada la mayor exigencia de precisión visual del ambiente. En contraste, TE presenta un comportamiento más favorable, con una distribución de la radiación que permite el uso de proyectores y actividades de lectura sin deslumbramiento significativo, evidenciando que la geometría del recinto y la presencia de elementos de transición entre interior y exterior modulan de forma decisiva la calidad visual, aun bajo condiciones de alta radiación solar.

Variable fotométrica - Iluminancia

Durante el periodo matutino (Figura 5), los tres ambientes analizados superan los valores máximos de iluminancia

establecidos por la Norma Peruana EM.010 y la normativa internacional UNE-EN 12464-1 en las zonas próximas a los vanos. El aula TE, pese a contar con alfeizar y compartir la misma orientación noroeste, registra uno de los valores más elevados de iluminancia (3333 lx), lo que se asocia a la escasa presencia de elementos arquitectónicos que atenúen el ingreso de radiación solar directa. Este resultado evidencia que la sola incorporación de alfeizares no garantiza un control lumínico efectivo frente a condiciones de alta radiación.

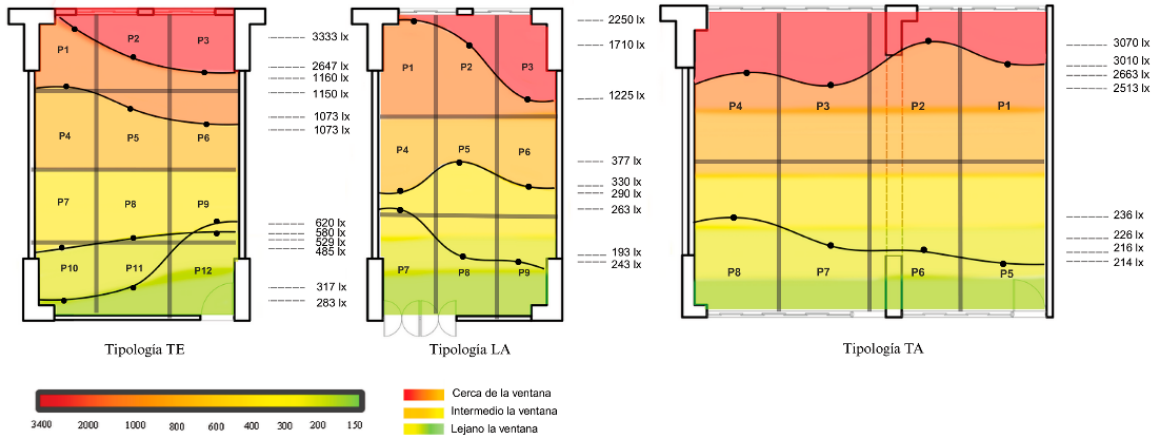


Figura 5: Curvas de iluminancia espacial en intervalo de 11 a 12 horas

En contraste, el aula TA, aun sin alfeizar, presenta valores de iluminancia relativamente menores debido a sus mayores dimensiones espaciales, las cuales favorecen una distribución más homogénea de la luz natural. Adicionalmente, la presencia de un muro perimetral de 3 m de altura frente al aula actúa como un elemento pasivo de sombreado, reduciendo la incidencia directa de radiación solar sobre el plano de trabajo.

Las áreas alejadas de los vanos muestran un comportamiento lumínico más estable. En el aula TE, aproximadamente el 25 % del espacio presenta niveles compatibles con el rango normativo, mientras que en LA y TA se requieren mayores niveles de iluminancia operativa (500–750 lx y 500–1000 lx, respectivamente), en función de la naturaleza de las actividades desarrolladas. No obstante, se identifican gradientes abruptos de iluminancia en todos los ambientes, como en TE, donde los valores descienden de 1225 lx a 377 lx en una distancia de 3.29 m, y en TA, con variaciones entre 236 lx y 2513 lx en 4.83 m, lo que evidencia una distribución espacial irregular de la luz.

Durante la tarde, la iluminancia disminuye levemente en las zonas próximas a los vanos, pero aumenta en los puntos más alejados debido al cambio en la trayectoria solar, generando incumplimientos normativos en hasta el 90 % de los puntos evaluados en TE y LA (Figura 6). A pesar de ello, el aula TA presenta un mayor equilibrio lumínico espacial, con una reducción de 586 lx cerca de la ventana y un incremento moderado de 213 lx en zonas intermedias, lo que sugiere un comportamiento más uniforme bajo condiciones solares vespertinas.

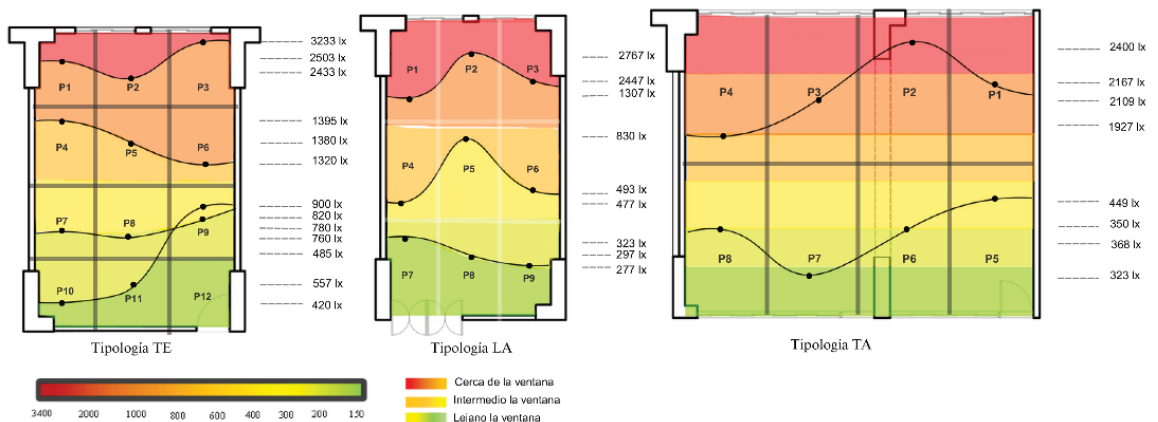


Figura 6: Curvas de iluminancia espacial en intervalo de 14 a 15 horas

Variable fotométrica - Luminancia

Durante el periodo matutino, el aula TE presenta el comportamiento más crítico en los puntos próximos al vano (Figura 7), donde los elevados niveles de luminancia generan molestia visual asociada a reflejos y rebotes de la luz natural. No obstante, a medida que aumenta la distancia respecto a la ventana, la luminancia disminuye progresivamente, permitiendo el cumplimiento normativo en los puntos P1 y P2. En contraste, el aula LA solo alcanza valores aceptables en el punto P3; sin embargo, su configuración lumínica resulta funcional para el uso de proyectores y equipos informáticos, al no evidenciarse reflejos significativos sobre las pantallas ubicadas en zonas alejadas del vano.

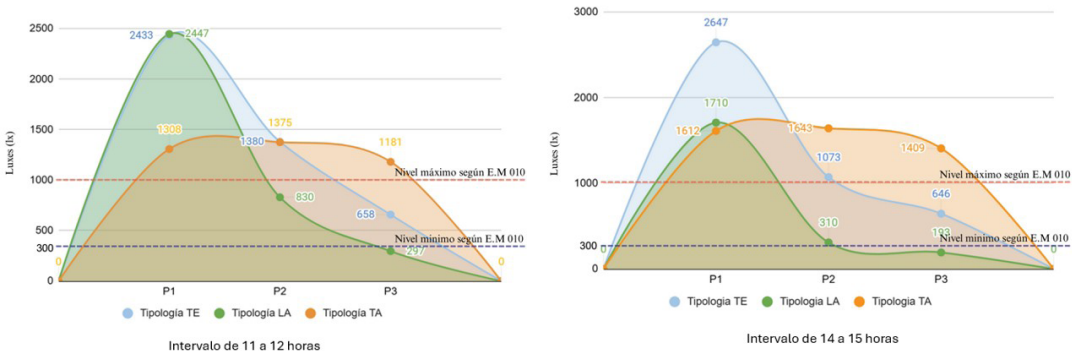


Figura 7: Comparativa lumínica a partir del cumplimiento normativo en intervalos horarios

El aula TA exhibe una distribución de luminancia relativamente homogénea, con valores entre 1409 lx y 1643 lx, aunque superiores a los límites normativos. Este comportamiento se explica por la presencia de grandes superficies vidriadas traslúcidas en ambos laterales, que incrementan la luminancia incluso en zonas intermedias.

Durante la tarde, LA supera levemente los valores registrados en TE, logrando cumplimiento normativo en P2 y P3, mientras que TE solo lo alcanza en el punto más alejado del vano. En TA, el cumplimiento se produce en el punto más próximo a la ventana, manteniéndose una variación promedio reducida de 266 lx, lo que confirma su estabilidad espacial.

Se evidencia que el aula TA presenta las condiciones más críticas de confort visual (Figura 8), registrando valores clasificados como molestos e inaceptables ($DGP > 0.40$) durante los periodos de mayor incidencia solar. Esta condición se asocia principalmente a su elevada proporción de superficie acristalada (73 %) y a la ausencia de sistemas de control solar, lo que genera una exposición directa a la radiación solar en el campo visual del usuario.

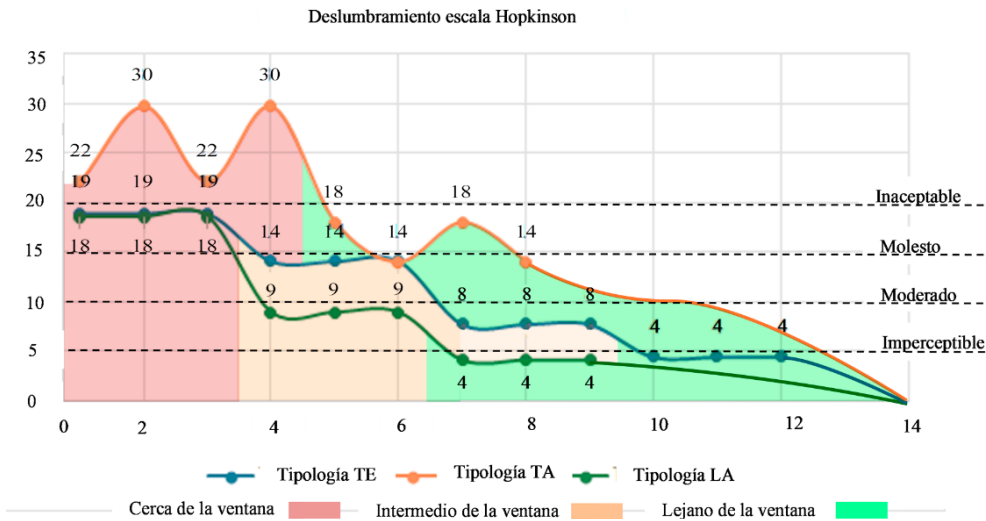


Figura 8: Deslumbramiento DGP

En contraste, las aulas TE y LA muestran una distribución más heterogénea del deslumbramiento, con valores perceptibles a molestos (DGP 0.35–0.40) en las zonas próximas a los vanos, y condiciones imperceptibles (DGP < 0.35) en áreas intermedias y alejadas de las ventanas. Estos resultados confirman que la proximidad al vano y la orientación visual hacia superficies altamente iluminadas constituyen factores determinantes en la aparición del deslumbramiento diurno.

Desde el enfoque normativo, únicamente algunos puntos del aula TE alcanzan condiciones aceptables de confort visual según los criterios de la EN 17037, aunque estas no se mantienen de forma consistente a lo largo del día, evidenciando la necesidad de estrategias de control solar adaptativas.

Diseño de celosías dinámicas

Se diseñaron tres prototipos de celosías (Figura 9), diferenciados por su configuración formal horizontal y vertical, con el fin de controlar variables geométricas y evitar sesgos en la evaluación. Las tipologías se analizaron en el aula TA, al presentar las condiciones más críticas de deslumbramiento. Las simulaciones evidenciaron que el Prototipo 1, de diseño horizontal con rotación entre 0° y 90° y traslación lateral de hasta 2 m, fue el más eficiente, logrando una mejora del 42 % en el confort visual. Esta solución redujo el deslumbramiento a rangos aceptables y mantuvo la iluminancia dentro del intervalo normativo (300 lx – 750 lx). En contraste, el Prototipo 2, con movimiento vertical limitado, y el Prototipo 3, de configuración fija, alcanzaron mejoras del 25 % y menores al 25 %, respectivamente, debido a su menor capacidad de adaptación solar. El sistema se compuso de estructura de aluminio anodizado, tela Sunbrella beige (reflectancia 0.5), guías de teflón y sellos de acero inoxidable y silicona neutra, seleccionados por su durabilidad y bajo mantenimiento.

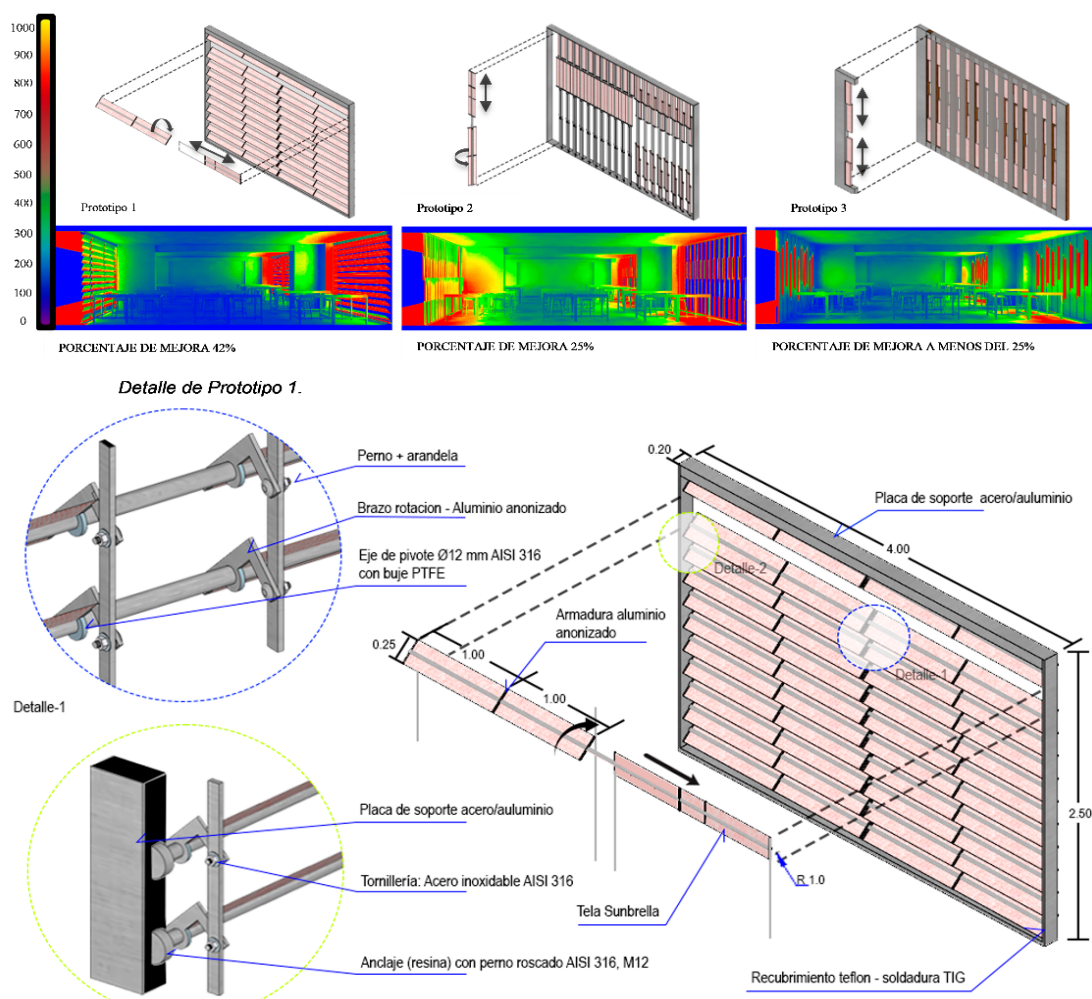


Figura 9: Prototipo de diseño de celosías dinámicas

Análisis variado estacional del modelo tridimensional

Durante el periodo primaveral (Figura 10), el aula TA evidencia una elevada incidencia de radiación solar directa en las zonas adyacentes a los vanos, alcanzando niveles de iluminancia superiores a 3000 lx. Esta condición genera deslumbramiento molesto e inaceptable en el campo visual del usuario ($DGP > 0.40$), comprometiendo el confort visual. En contraste, las tipologías TE y LA presentan una distribución espacial de la iluminancia más homogénea; sin embargo, se identifican áreas localizadas con deslumbramiento perceptible a molesto (DGP entre 0.35 y 0.40) en sectores próximos a las ventanas. Este comportamiento se explica principalmente por la ausencia de sistemas de control solar en TA, donde la elevada proporción de superficie acristalada (73 %) favorece el ingreso de radiación directa.

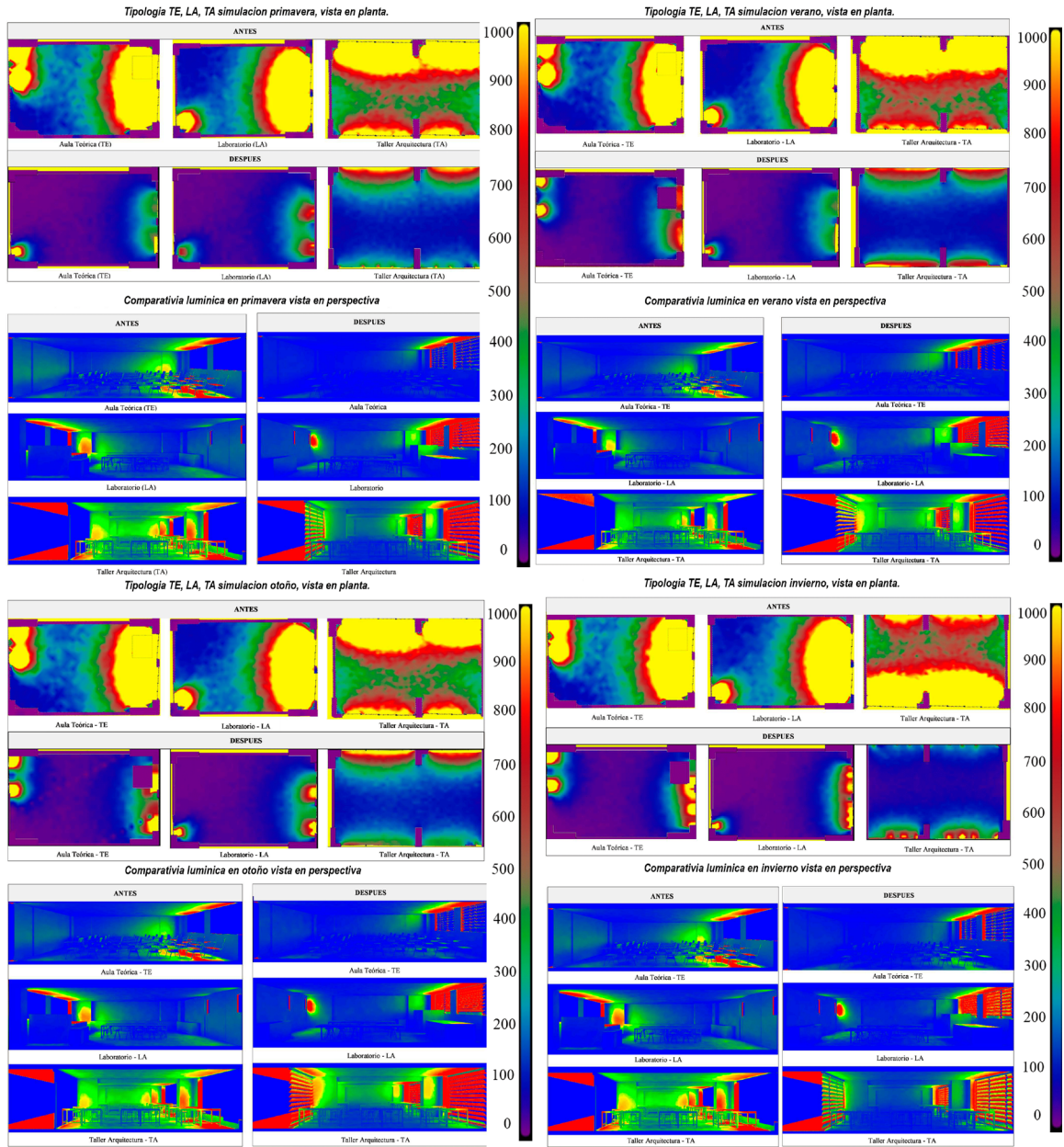


Figura 10: Simulación estacional pre y post intervención con celosías dinámicas

La incorporación del sistema de celosías dinámicas demostró una alta capacidad de adaptación frente a las variaciones lumínicas estacionales. En TE, una regulación del ángulo de giro entre 30° y 35° permitió reducir el deslumbramiento

a valores imperceptibles ($DGP < 0.35$), manteniendo niveles de iluminancia compatibles con actividades teóricas. En LA, una rotación de 40° optimizó la distribución de la luz natural en áreas de mayor exigencia visual. De manera similar, en TA, una rotación de 45° permitió mitigar los picos de iluminancia cercanos a 3070 lx en zonas próximas a las mamparas, reduciendo la probabilidad de deslumbramiento a rangos perceptibles, en concordancia con los criterios establecidos por la EN 17037. Estas configuraciones fueron validadas mediante simulaciones en VDV, considerando un ángulo solar promedio de 50° – 60° y una reflectancia interior de 0.5.

Durante el verano, las condiciones se intensifican, especialmente en el aula TA, debido a la elevada radiación solar incidente ($\approx 6.2 \text{ kWh/m}^2\text{-día}$), concentrada entre las 11:00 y 15:00 horas. Las simulaciones muestran áreas saturadas cercanas a los vanos, con iluminancias extremas superiores a 3070 lx y valores de DGP mayores a 0.45, clasificados como deslumbramiento inaceptable. En TE y LA, aunque el impacto es menor, persisten zonas con iluminancias superiores a 1000 lx, generando deslumbramiento perceptible e incumplimientos parciales de la norma EM.010. Para mitigar estos efectos, en TE se aplicó un ángulo de 60° , logrando un control efectivo de los picos de iluminancia. En LA, una rotación fija de 45° evitó la saturación lumínica en áreas de precisión visual, mientras que en TA un ángulo de 60° redujo el deslumbramiento a rangos molestos controlados ($DGP \approx 0.40$). En conjunto, estas estrategias permitieron mejorar el confort visual en aproximadamente un 37 %, aunque con un desempeño inferior al reportado por Karanouh, and Kerber²⁹, cuya propuesta automatizada alcanza reducciones superiores al 50 %, pero resulta inviable en contextos con limitaciones tecnológicas como el caso de estudio.

En otoño, el incremento del componente difuso de la luz natural mejora las condiciones generales; no obstante, en TA persisten contrastes de luminancia, con iluminancias entre 500 y 2000 lx en zonas próximas a los vanos. En TE, una rotación de 45° redujo el gradiente espacial de iluminancia, alcanzando valores de DGP imperceptibles, mientras que en LA, un giro de 30° mantuvo condiciones compatibles con actividades académicas. En TA, una rotación de 40° permitió atenuar los contrastes visuales sin recurrir a iluminación artificial.

Finalmente, en invierno, la disminución de la radiación solar genera áreas subiluminadas alejadas de los vanos, especialmente en TA, con valores inferiores a 300 lx. En este escenario, las estrategias se orientaron a maximizar la captación lumínica. En TE y LA, una abertura de 10 cm y un ángulo de 15° mantuvieron niveles adecuados, mientras que en TA una rotación de 45° redujo la diferencia de iluminancia entre zonas próximas y alejadas de los vanos, manteniendo el DGP dentro de rangos aceptables. Estos resultados, validados con datos climáticos EPW de SENAMHI (2023), confirman la versatilidad del sistema frente a la variabilidad estacional y a microclimas complejos.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que la orientación noroeste y la configuración de la envolvente arquitectónica influyen de manera decisiva en el desempeño lumínico y el confort visual de las aulas universitarias analizadas. La elevada incidencia de radiación solar directa durante las horas críticas genera excesos de iluminancia, altos contrastes de luminancia y condiciones de deslumbramiento molesto o inaceptable, particularmente en el aula TA. En este caso, la alta proporción de superficie acristalada y la ausencia de dispositivos de control solar explican su comportamiento más desfavorable, en concordancia con estudios recientes que indican que las fachadas con grandes superficies acristaladas sin estrategias de sombreado incrementan significativamente el riesgo de sobreiluminación y deslumbramiento en espacios educativos³⁰. De manera similar, investigaciones sobre desempeño lumínico en aulas han demostrado que iluminancias superiores a 2000 lx pueden generar incomodidad visual incluso cuando se alcanzan los niveles mínimos normativos de iluminación natural¹⁵.

Si bien las aulas TE y LA presentan un desempeño relativamente más favorable debido a la presencia de alfeizares y a configuraciones espaciales más contenidas, los resultados evidencian que las soluciones pasivas convencionales no garantizan de forma consistente el cumplimiento normativo de iluminancia ni condiciones adecuadas de deslumbramiento a lo largo del año. Este comportamiento coincide con lo señalado por Hosseini, *et al.*¹⁵ y Vilčeková, *et al.*⁴, quienes destacan las limitaciones de los sistemas estáticos frente a la variabilidad horaria y estacional de la radiación solar. Estudios más recientes también señalan que los sistemas de sombreado fijo presentan una capacidad limitada para adaptarse a cambios dinámicos de radiación solar, lo que puede provocar simultáneamente problemas de insuficiencia lumínica o sobreiluminación dependiendo de la época del año¹⁴. En este sentido, diversos autores

destacan la necesidad de evaluar el desempeño lumínico mediante indicadores dinámicos como la iluminancia útil de luz diurna, la autonomía de luz diurna o la probabilidad de DGP, los cuales permiten analizar simultáneamente la disponibilidad de luz natural y el riesgo de deslumbramiento ¹⁹.

La incorporación de celosías dinámicas horizontales permitió mejorar de manera significativa el confort visual, reduciendo los picos de iluminancia y el deslumbramiento, con mejoras de hasta un 42 % en el aula más crítica. Estos resultados son coherentes con investigaciones previas que destacan la eficacia de los sistemas de sombreado dinámicos para regular la entrada de luz natural y adaptarse a condiciones lumínicas variables ^{12,17}. Investigaciones recientes basadas en simulación paramétrica han demostrado que el ajuste del ángulo de las lamas en dispositivos de sombreado dinámico permite optimizar simultáneamente la distribución de la luz natural y el control del deslumbramiento en espacios educativos y de oficina ⁸. Asimismo, estudios experimentales han reportado reducciones significativas en indicadores de deslumbramiento, con disminuciones de hasta 27 % en valores de DGP cuando se implementan sistemas de sombreado adaptativo en fachadas expuestas a alta radiación solar ¹⁵.

No obstante, el desempeño de las celosías analizadas es inferior al de soluciones completamente automatizadas basadas en sensores y sistemas inteligentes de control solar. Investigaciones recientes indican que los sistemas dinámicos integrados con algoritmos de optimización y modelos predictivos pueden ajustar en tiempo real la configuración del sombreado para maximizar el aprovechamiento de la luz natural y reducir simultáneamente el consumo energético del edificio ^{16,19}. Sin embargo, estos sistemas suelen implicar mayores costos de instalación, operación y mantenimiento, lo que limita su aplicación en contextos educativos con restricciones económicas o tecnológicas. En este sentido, los sistemas pasivos ajustables manualmente representan una alternativa intermedia que permite mejorar el desempeño lumínico del espacio sin requerir infraestructuras tecnológicas complejas, manteniendo al mismo tiempo una adecuada adaptabilidad frente a la variabilidad de la radiación solar ¹⁴.

Entre las principales limitaciones del estudio se identifican el uso exclusivo de simulaciones digitales, la ausencia de evaluaciones perceptuales de los usuarios y la consideración de un número limitado de tipologías y orientaciones. Investigaciones recientes señalan que la evaluación integral del confort visual debería combinar métricas objetivas —como iluminancia, DGP o iluminancia útil de luz diurna— con estudios perceptuales o evaluaciones post-ocupacionales para comprender mejor la experiencia visual de los usuarios en entornos educativos ⁸. Asimismo, el análisis se centró únicamente en el confort visual, sin integrar variables térmicas ni energéticas que podrían influir en el desempeño global del edificio. Como líneas futuras de investigación se propone ampliar la muestra de estudio, incorporar evaluaciones post-ocupacionales, integrar análisis energéticos y explorar soluciones híbridas o semi-automatizadas que combinen estrategias pasivas y activas de control solar, especialmente en regiones de alta radiación solar y climas de altura como la sierra peruana ²⁶.

CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el impacto de celosías dinámicas horizontales en el confort visual de aulas universitarias ubicadas en un contexto de clima semiárido de alta radiación solar, mediante simulaciones de iluminación natural basadas en datos climáticos locales. Los resultados permiten extraer las siguientes conclusiones principales.

En primer lugar, se confirma que la orientación noroeste y la configuración de la envolvente arquitectónica influyen significativamente en el comportamiento lumínico de las aulas universitarias. Las aulas con mayor proporción de superficie acristalada y ausencia de dispositivos de control solar presentaron niveles excesivos de iluminancia, elevados contrastes de luminancia y mayores probabilidades de deslumbramiento, especialmente durante las horas de mayor incidencia solar.

En segundo lugar, se evidenció que las soluciones pasivas convencionales, como alfeizares o configuraciones espaciales más contenidas, pueden mejorar parcialmente las condiciones lumínicas interiores; sin embargo, no garantizan de forma consistente el cumplimiento de los rangos de iluminancia recomendados ni el control del deslumbramiento a lo largo de las diferentes estaciones del año en contextos de alta radiación solar.

En tercer lugar, la incorporación de celosías dinámicas horizontales ajustables demostró ser una estrategia eficaz para mejorar el confort visual en aulas universitarias. Las simulaciones mostraron reducciones significativas en los niveles

de deslumbramiento y en los picos de iluminancia, alcanzando mejoras de hasta 42 % en el área útil con condiciones de deslumbramiento aceptables en el aula más crítica. Estos resultados evidencian la capacidad de los sistemas de sombreado dinámico para adaptarse a la variabilidad de la radiación solar diaria y estacional.

Asimismo, el estudio demuestra que sistemas dinámicos de operación simplificada, basados en ajustes manuales de ángulo, pueden constituir una alternativa viable en contextos con limitaciones tecnológicas y económicas, ofreciendo beneficios significativos en términos de confort visual sin requerir sistemas automatizados complejos.

Finalmente, la investigación aporta evidencia técnica para el diseño arquitectónico en climas semiáridos de alta altitud, un contexto aún poco estudiado en la literatura internacional sobre control solar y confort visual en edificaciones educativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ (SENAMHI). *Reporte climático anual 2023*. 2023. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=publicaciones><https://www.senamhi.gob.pe/?p=publicaciones>
2. MINISTERIO DE VIVIENDA, Construcción y Saneamiento (MVCS). *Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE): Norma Técnica EM.010: Instalaciones Eléctricas Interiores*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/266383-083-2019-vivienda><https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/266383-083-2019-vivienda>
3. MUNIVE ÁLVAREZ, José Martín. "Calidad de la iluminación en las aulas de clase en una Institución de Educación Superior." *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 192-201. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3409>
4. VILČEKOVÁ, Silvia; KAPALO, Peter; MEČIAROVÁ, Ludmila; BURDOVÁ, Eva Křidlová and IMRECZEOVÁ, Veronika. "Investigation of Indoor Environment Quality in Classroom - Case Study." *Procedia Engineering*, 2017, vol. 190, pp. 496-503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.369>
5. ALAMINO NARANJO, Yesica and RÉ, María Guillermina. "Ambiente interior y satisfacción de usuarios en aulas de zona árida. Estudio de caso." *Revista de Arquitectura*, 2022, vol. 27, no. 42, pp. 126-139. DOI: <https://doi.org/10.5354/0719-5427.2022.66378>
6. LI, Chao and MANAGI, Shunsuke. "Inappropriate nighttime light reduces living comfort." *Environmental Pollution*, 2023, vol. 334, p. 122173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122173>
7. BIAN, Yu; CHEN, Yanan; SUN, Yanyi; MA, Yuan; YU, Daxing and LENG, Tianxiang. "Simulation of daylight availability, visual comfort and view clarity for a novel window system with switchable blinds in classrooms." *Building and Environment*, 2023, vol. 235, p. 110243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110243>
8. LI, Han; JIA, Jia; YU, Hongxia and WANG, Xingtian. "Research on the daylighting metrics of college classrooms based on visual comfort in China." *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 98, p. 111178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111178>
9. DE LA CRUZ CHAIDEZ, María Teresa; ARMENDÁRIZ LÓPEZ, José Francisco; MARTÍN DEL CAMPO SARAY, Francisco José; SAHAGÚN VALENZUELA, Miguel Isaac; CASTAÑÓN BAUTISTA, María Cristina and GARCÍA GÓMEZ, Carmen. "Thermal and luminic comfort assessment in university classrooms in Tijuana, Baja California. Case of study FCITEC, Valle de las Palmas." *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 2022, vol. 5, no. 4, p. e233. DOI: <https://doi.org/10.37636/recitv5n4e233>
10. INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). *documentos_10412_Memoria2005_2006_80f79d18*. 2005. <https://www.idae.es><https://www.idae.es>
11. FORCADA, N.; GANGOLELLS, M.; CASALS, M.; TEJEDOR, B.; MACARULLA, M. and GASPAR, K. "Field study on thermal comfort in nursing homes in heated environments." *Energy and Buildings*, 2021, vol. 244, p. 111032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111032>
12. AL-MASRANI, Salwa M. and AL-OBAIDI, Karam M. "Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies." *Automation in Construction*, 2019, vol. 102, pp. 195-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>
13. ALAKAVUK, Ebru and SARISAYIN, Nazli Hilal. "The Effect of Using Kinetic Facades in Increasing the Daylighting Performance of Buildings." *Light & Engineering*, 2024, no. 06-2024, pp. 17-28. DOI: <https://doi.org/10.33383/2024-021>
14. BAHDDAD, Ali Ahmed; TAIB, Nooriati; ALLAHAIM, Fahad Saud and AJLAN, Ali Mohammed. "Parametric Optimization Approach to Evaluate Dynamic Shading Within Double-Skin Insulated Glazed Units for Multi-Criteria Daylighting Performance in Tropics." *Journal of Daylighting*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 349-371. DOI: <https://doi.org/10.15627/jd.2024.24>
15. HOSSEINI, Seyed Morteza; HEIRANIPOUR, Milad; WANG, Julian; HINKLE, Laura Elizabeth; TRIANTAFYLIDIS, Georgios and ATTIA, Shady. "Enhancing Visual Comfort and Energy Efficiency in Office Lighting Using Parametric-Generative Design Approach for Interactive Kinetic Louvers." *Journal of Daylighting*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 69-96. DOI: <https://doi.org/10.15627/jd.2024.5>
16. IMAMGULUYEV, Rahib; IMANOVA, Tunzala; HASANOVA, Parvana; MAMMADOVA, Arzu and HAJIZADA, Sevdá. "Unlocking Energy Efficiency: Harnessing Fuzzy Logic Control for Lighting Systems." *Procedia Computer Science*, 2023, vol. 230, pp. 574-583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.113>
17. WANG, Yanjin; YANG, Weibin and WANG, Qian. "Multi-objective parametric optimization of the composite external shading for the classroom based on lighting, energy consumption, and visual comfort." *Energy and Buildings*, 2022, vol. 275, p. 112441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112441>
18. HUANG, Xi; QU, Dagang; SUN, Cheng and SUN, Shi. "Research on Office Building Facade Design Based on Visual Comfort of Daylit Office." *Computational Design and Robotic Fabrication*, Springer Nature Singapore, 2025, pp. 385-393. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-3433-0_34
19. ZHENG, Yiqian; WU, Jinxuan; ZHANG, Hao; LIN, Caifang; LI, Yu; CUI, Xue and SHEN, Pengyuan. "A novel sun-shading design for indoor visual comfort and energy saving in typical office space in Shenzhen." *Energy and Buildings*, 2025, vol. 328, p. 115083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115083>
20. ALVAREZ-VALDIVIA, Andra Nair; HUERTAS-CONTRERAS, Dajhana Alejandra and IBÁRCENA IBÁRCENA, Valkiria Raquel. "Use of natural light to achieve lighting comfort inside the house." *Proceedings of the 22nd*

LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024): "Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0.", Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18687/laccei2024.1.1.1322>.

Based on Field Measurements and Physical Simulations: A Case Study of Secondary School Classrooms in Guangzhou." *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 3, p. 637. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030637>

21. PAPINUTTO, Michael; BOGHETTI, Roberto; COLOMBO, Moreno; BASURTO, Chantal; REUTTER, Kornelius; LALANNE, Denis et al. NEMBRINI, Julien. "Saving energy by maximising daylight and minimising the impact on occupants: An automatic lighting system approach." *Energy and Buildings*, 2022, vol. 268, p. 112176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112176>
22. ZHU, Mengya; ZHANG, Xian; CHEN, Dengkai and GONG, Yong. "Impact of lighting environment on human performance and prediction modeling of personal visual comfort in enclosed cabins." *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 927, p. 171970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171970>
23. KONG, Zhe and JAKUBIEC, J. Alstan. "Instantaneous lighting quality within higher educational classrooms in Singapore." *Frontiers of Architectural Research*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 787-802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.05.001>
24. MAHMOUD, Naglaa Sami Abdelaziz; EL SAMANOUDY, Gamal and JUNG, Chuloh. "Simulating the natural lighting for a physical and mental Well-being in residential building in Dubai, UAE." *Ain Shams Engineering Journal*, 2023, vol. 14, no. 1, p. 101810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101810>
25. SALOMON, David and AVALOS-AMBROGGIO, Sofia. "Optimización del diseño de aulas: aprovechamiento de la luz natural para confort visual en Villa María, Argentina." *Revista Hábitat Sustentable*, 2022, pp. 74-89. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.05>
26. KRARTI, M. and KARRECH, A. "Evaluation of static and dynamic PV-Integrated shading systems for office spaces in Australia." *Solar Energy*, 2024, vol. 277, p. 112736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112736>
27. ISO/CIE. "Lighting of work places — Part 1: Indoor work places." *ISO/CIE 8995-1:2016*, 2016. <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso-cie:8995-1:ed-1:v1:en>
28. WIENOLD, Jan and CHRISTOFFERSEN, Jens. "Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras." *Energy and Buildings*, 2006, vol. 38, no. 7, pp. 743-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.017>
29. KARANOUGH, Abdulmajid and KERBER, Ethan. "Innovations in dynamic architecture." *Journal of Facade Design and Engineering*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 185-221. DOI: <https://doi.org/10.3233/fde-150040>
30. LUO, Jianhe; YAN, Gaoliang; ZHAO, Lihua; ZHONG, Xue and SU, Xinyu. "Evaluation of Design Parameters for Daylighting Performance in Secondary School Classrooms