

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE AULAS: APROVECHAMIENTO DE LA LUZ NATURAL PARA CONFORT VISUAL EN VILLA MARÍA, ARGENTINA¹

Recibido 28/02/2022
Aceptado 25/05/2022

OPTIMIZATION OF CLASSROOM DESIGN: USE OF NATURAL LIGHT FOR VISUAL COMFORT IN VILLA MARÍA, ARGENTINA

David Salomón

Arquitecto, Proyectista, Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento, Universidad de Villa María (UNVM), Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-4029-7737>
arqdavidsalomon@gmail.com

Sofía Avalos Ambroggio

Arquitecta, Docente de Cátedra, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño (FAUD-UNC), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1520-5389>
sofia.avalos@unc.edu.ar

¹ Este trabajo se llevó a cabo en el marco del Trabajo final Integrador de la Especialidad en Tecnología Arquitectónica (ETArq) de la Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (FAUD-UNC).



RESUMEN

El presente trabajo aborda la problemática de la iluminación natural en edificios educativos, enfocándose en el estudio de estrategias de iluminación natural que contribuyan a alcanzar niveles recomendados de confort lumínico dentro de las aulas, correcta distribución de luz y reducción de deslumbramiento. Se analizó, en ese marco, un edificio del campus de la Universidad Nacional de Villa María, Córdoba, Argentina, en el que se evaluó el comportamiento de iluminación natural usando modelos de simulación y mediciones *in situ*. La labor se complementó evaluando el índice Daylight Glare Probability (DGP): verificando ocurrencia de deslumbramiento. El diagnóstico mostró exceso de iluminación en puntos cercanos a aberturas, iluminación insuficiente en puntos lejanos a las mismas, niveles bajos de uniformidad en la distribución de iluminación natural y umbrales intolerables de deslumbramiento. Consiguientemente, se propuso un nuevo ordenamiento del aula, incorporando elementos para la redirección de la luz solar y se verificó su desempeño. Los resultados de la propuesta evidenciaron importantes diferencias. Se consiguió una importante reducción de niveles de iluminación, alcanzando niveles de confort visual para aulas (300-500 lux promedio), mejoras en la uniformidad de luz natural, con su consecuente verificación según los estándares y una reducción significativa de niveles de deslumbramiento por penetración solar directa.

Palabras clave

iluminación natural, confort visual, deslumbramiento, edificios educativos.

ABSTRACT

The present work addresses the problem of natural lighting in educational buildings, focusing on the study of natural lighting strategies that contribute to reaching recommended levels of lighting comfort in classrooms, correct light distribution and glare reduction. In this framework, a building on the campus of the National University of Villa María, Córdoba, Argentina, was analyzed in which the behavior of natural lighting was evaluated using simulation models and *in situ* measurements. The work was complemented by evaluating the Daylight Glare Probability (DGP) index: verifying the occurrence of glare. The diagnosis showed excess lighting at points close to openings, insufficient lighting at points far from them, low levels of uniformity in the distribution of natural lighting and intolerable glare thresholds. Consequently, a new arrangement of the classroom was proposed, incorporating elements for the redirection of sunlight and its performance was verified. The results of the proposal showed important differences. A significant reduction in lighting levels was achieved, reaching levels of visual comfort for classrooms (300-500 average lux), improvements in the uniformity of natural light, with its consequent verification according to standards, and a significant reduction in glare levels due to penetration direct sun.

Keywords

use and management, occupancy, occupant behavior, thermal comfort, bioclimatic strategies

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de acceso de luz natural dentro de edificios educacionales es considerada una de las características físicas más determinantes de un aula (Phillips, 1997). Numerosos autores coinciden en que la iluminación natural de calidad dentro de espacios educativos no solo favorece el confort de sus ocupantes, sino que además tiene un impacto directo en el desarrollo de actividades de enseñanza y aprendizaje, así como también en el rendimiento académico de los estudiantes (Gonzalo, Ledesma, Nota y Márquez, 2001; Heschong, Wright y Okura, 2013; Robles Machuca, 2014, entre otros). Por el contrario, la ausencia de una iluminación natural de calidad puede causar fatiga y estrés psicofísico, afectando el estado de ánimo de las personas (Muñoz Núñez, 2010). Se deduce entonces que el acondicionamiento lumínico que incluya iluminación natural de calidad en espacios destinados a la educación es un requisito de fundamental importancia.

En Argentina, las Normas IRAM-AADL constituyen el marco normativo de recomendaciones para eficiencia energética y confort lumínico en edificios institucionales. La Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo N° 19.587 reglamentada por el Decreto N° 351/79 (Capítulo 12 "Iluminación y Color", Artículos 71 al 84 y Anexo IV), incluye exigencias de valores mínimos de iluminación tabulados en la norma IRAM AADL J20-06 (2017) y establece los procedimientos de cálculo de iluminancia media y uniformidad de iluminación, junto con valores admisibles. Asimismo, la Superintendencia de Riesgos de Trabajo (SRT), del Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social elabora procedimientos de medición de iluminación en espacios construidos (Resolución SRT 84/2012).

Ahora bien, las regulaciones y protocolos en torno a este tema son limitados. Las Normas IRAM-AADL son de aplicación orientativa y voluntaria, y no existe un organismo oficial que verifique las exigencias de la Ley 19.587. De esta forma, el objetivo de incluir premisas y estrategias de diseño para confort lumínico recae en la voluntad de equipos profesionales de diseño. La bibliografía en torno al tema señala que, durante la etapa de desarrollo de un proyecto, los diseñadores deben determinar parámetros de disponibilidad y selección de datos apropiados de luz natural que se usarán como base en la propuesta de diseño (Gonzalo et al., 2001; Pattini, 2000). Sin embargo, son pocos los equipos de planificación a cargo del desarrollo de proyectos de edificios educacionales que cuentan con herramientas adecuadas, con un procedimiento establecido para simular el comportamiento de indicadores asociados a la iluminación natural, o con asesorías especializadas en el tema, por lo que resulta muy difícil prever el desempeño futuro del edificio proyectado.

Como consecuencia, muchos edificios construidos tienen problemas de escasa o nula penetración de luz natural durante las horas de trabajo o, por el contrario, excesiva penetración de luz solar y problemas de deslumbramiento. Esto obliga a buscar maneras de contrarrestar los efectos negativos, muchas veces, a través del uso de cortinas interiores que bloqueen el ingreso de luz natural, o bien, complementando la falta de luz con iluminación artificial durante las horas diurnas, con lo cual se desaprovechan los beneficios de la iluminación natural e incrementa el consumo energético del edificio.

El presente estudio se llevó a cabo en conjunto con la Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento de la Universidad de Villa María, Córdoba Argentina. El objetivo radica en analizar el desempeño de un edificio educativo construido y proponer alternativas de mejora para alcanzar niveles recomendados de confort lumínico dentro de las aulas, incorporando estrategias de energía solar pasiva.

ILUMINACIÓN NATURAL EN EDIFICIOS EDUCATIVOS

Tanto el desarrollo de estándares de confort lumínico como la propuesta de recomendaciones de diseño para la incorporación de luz natural en edificios educacionales, han sido objeto de estudio de diferentes institutos y organismos de investigación. En Chile, la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) desarrolló la Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educacionales GEEEduc (CITEC-UBB, 2012), que incluye estrategias de diseño para la incorporación de iluminación natural en espacios educativos y recomendaciones para lograr confort visual dentro de las aulas. Piderit y Bodart (2012), asimismo, proponen criterios de diseño para la organización de aulas, estableciendo áreas con distintos requerimientos lumínicos. En la misma línea, otros estudios presentan estrategias de diseño para optimizar la luz natural en oficinas (Piderit y Bodart, 2012; Palarino y Piderit, 2020) y en aulas (Callejas, Pereira, Torres y Piderit, 2020).

En Argentina, la Dirección de Infraestructura del Ministerio de Educación de la Nación (DIMEN) establece condiciones y requerimientos de habitabilidad en edificios escolares en el documento "Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar" (DIMEN, 1998). Uno de los objetivos básicos del diseño de edificios se enfoca en "asegurar condiciones de iluminación y ventilación natural como solución principal" (DIMEN, 1998, p. 57). Este documento propone estrategias de diseño en cuanto a orientaciones recomendadas y dimensionamiento de aberturas. A esto se añaden numerosos estudios sobre el uso de iluminación natural en edificios, entre los cuales destacan algunos abocados a la refuncionalización de espacios de trabajo construidos,

Indicador	Rangos					
Iluminancia media (lux)	Insuficiente	Deficiente	Recomendado	Exceso de luz	Disconfort	[1]
	< 200	200 - 300	500-750	2000 - 5000	> 5000	
Uniformidad de iluminación	Insuficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Exigido	[2]
	< 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.04 - 0.05	> 0.5	
Deslumbramiento (DGP) (%)	Imperceptible	Perceptible	Molesto	Intolerable		[3]
	DGP < 34%	34% < DGP < 38%	38% < DGP < 45%	45% < DGP		

Tabla 1. Indicadores de iluminación natural tenidos en cuenta en el presente trabajo. Fuente: Elaboración de los autores en base a [1] Callejas et al., (2020); Decreto N° 351/79, DIMEN (1998); [2] Callejas et al. (2020); Decreto N° 351/79; [3] Wienold y Christofferen (2006).

ya sean aulas u oficinas, mediante iluminación natural (Ferrón, Pattini y Lara, 2010); a estrategias de diseño de aulas (Pattini, 2009; Cisterna et al, 2015), sobre control de niveles de iluminación y distribución de la luz natural en aulas (Hoses, San Juan, Melchiori y Viegas, 2001; Pattini y Kirschbaum, 2006); a dispositivos de protección de aberturas para evitar radiación solar directa (Ledesma et al., 2004; 2005, Monteoliva, Villalba y Pattini, 2014); al uso de bandejas de luz (Gonzalo et al., 2001; Casabianca y Evans, 2003), y al control de deslumbramiento (Pattini et al., 2009).

INDICADORES DE ILUMINACIÓN NATURAL

La iluminación natural de los espacios interiores de trabajo o lectura debe ser de tipo difusa, uniforme y presentar bajos índices de contraste (Pattini et al., 2009). El nivel de iluminancia (E) está referido a la cantidad de flujo luminoso que emiten las fuentes de luz y que se acerca de forma vertical u horizontal hacia las superficies (Robles Machuca, 2014). El indicador propuesto por el Protocolo de la Resolución SRT 84/2012 para medir Iluminancia es Iluminancia media (Em). Dicho protocolo propone también el cálculo de la Uniformidad de la iluminación (U). Este indicador complementa el análisis de iluminancia, ya que posibilita detectar situaciones donde el promedio correspondiente al valor de Iluminancia media enmascara iluminancias horizontales por debajo del valor aceptable (Pattini et al., 2009). Los espacios educativos requieren un nivel adecuado de iluminancia para garantizar una uniformidad de iluminación (U) relativamente alta sobre el área de trabajo.

El deslumbramiento es uno de los indicadores más influyentes en el confort visual (Monteoliva, Garretón y Pattini, 2021). El modelo de predicción Daylight Glare Probability (DGP), desarrollado por Wienold y Christofferen (2006) es considerado uno de los modelos más precisos para estudiar el deslumbramiento dentro de espacios construidos. Es definido como la probabilidad de disconfort visual percibido por un ocupante, debido a diferencias entre áreas muy oscuras y áreas muy brillantes, causadas por penetración solar directa de una

fuente luminosa o exceso de niveles de iluminación en un ambiente interior (Palarino y Piderit, 2020). Los rangos admisibles de iluminancia media, uniformidad de luz natural y DGP se resumen en la Tabla 1.

METODOLOGÍA

En la actualidad la Universidad Nacional de Villa María (UNVM) está inmersa en un proceso de transformación de su campus universitario, siguiendo lineamientos del Programa "Hacia una Ciudad Universitaria Sustentable" (UNVM, 2019), que incluye un máster plan de desarrollo estratégico, el "Plan Maestro de Infraestructura de la UNVM 2020-2021", impulsado por la Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento (SPTSyM). Uno de los objetivos del Programa es "conocer y analizar las condiciones físicas y niveles de confort que presentan los edificios construidos en el campus, con el fin de proponer intervenciones que ayuden a mejorar las condiciones de trabajo en los espacios áulicos." (SPTSyM, 2020, p. 17). En este contexto, este trabajo se propone evaluar las aulas de uno de los edificios para verificar los indicadores de iluminación natural y plantear alternativas de mejora. La metodología empleada en este estudio (Figura 1) se presenta a continuación.

1. SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Se eligió un aula que cumpliera con los siguientes criterios: 1. un aula cuya valoración fuese requerida dentro del Plan Maestro de Infraestructura de SPTSyM; 2. un aula que fuera considerada "tipo", en el sentido de que los resultados de la evaluación pudiesen ser extrapolados a otras aulas.

De igual modo, se escogió un determinado edificio, "Institutos II- Rector Carlos Domínguez", el que originalmente fue proyectado como edificio de oficinas administrativas. La falta de espacio físico destinado al dictado de asignaturas hizo que los boxes de oficinas de planta baja fueran usados como aulas de clases. En las Figuras 2 y 3 se muestra el espacio analizado.

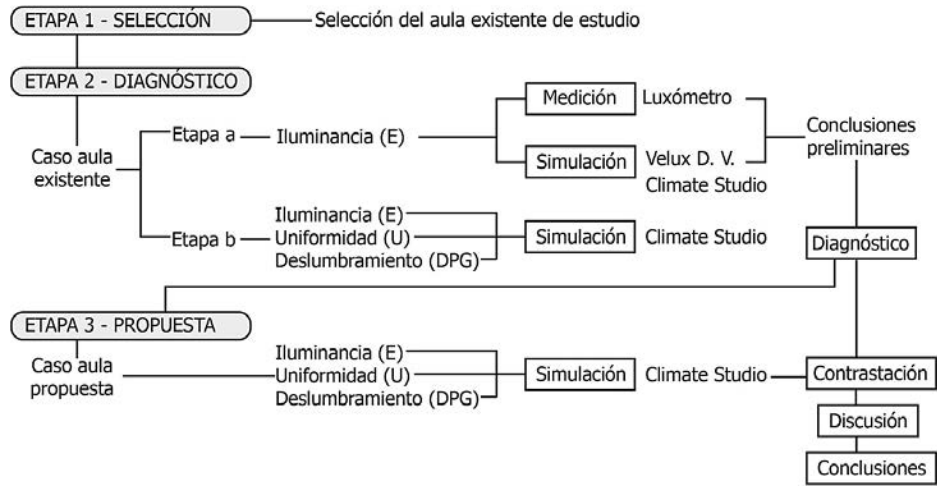


Figura 1. Metodología empleada en este estudio Fuente: Elaboración de los autores.

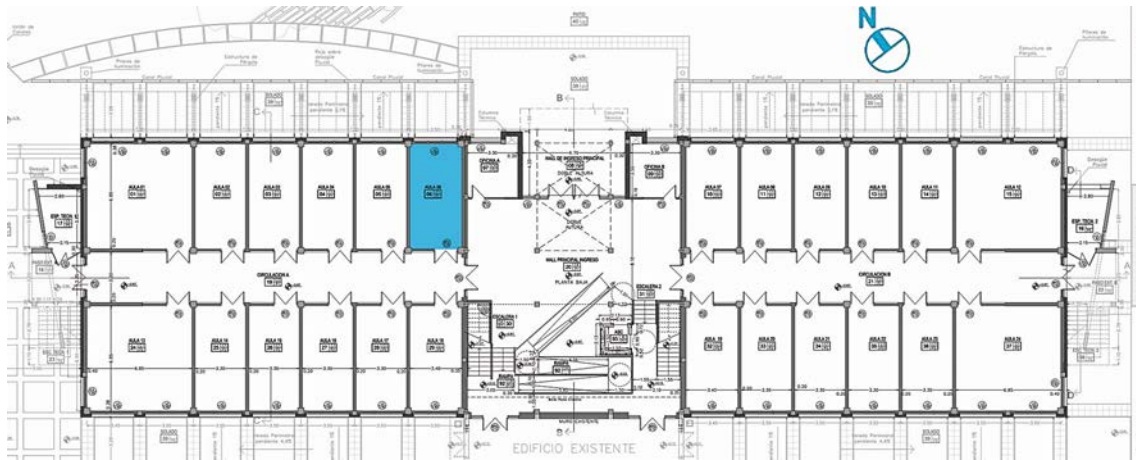


Figura 2. Aula seleccionada. Planta baja del edificio "Institutos II", UNVM. Fuente: Elaboración de los autores.

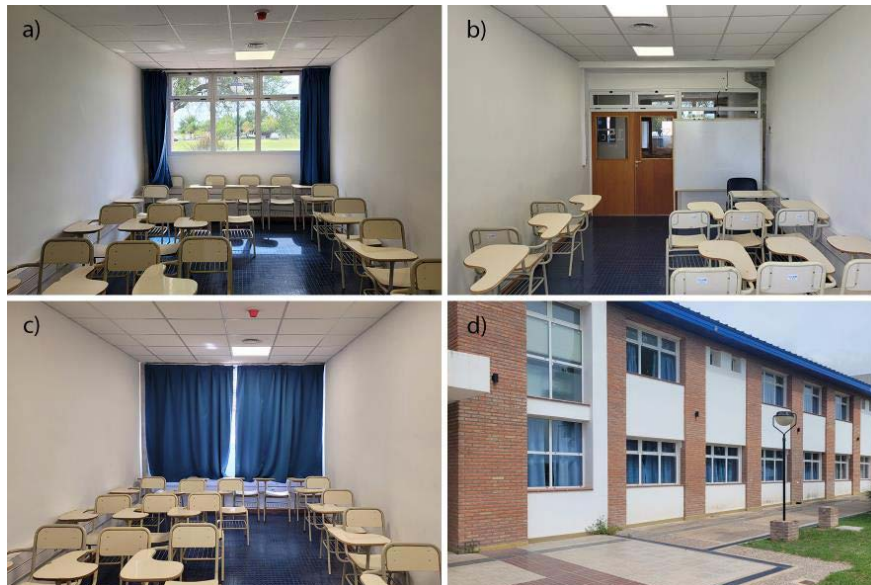


Figura 3. Aula seleccionada. a) Vista interior al fondo del aula. b) Vista interior al frente del aula. c) Vista interior con cortinas cerradas. d) Vista exterior del aula - fachada norte. Fuente: Elaboración de los autores.

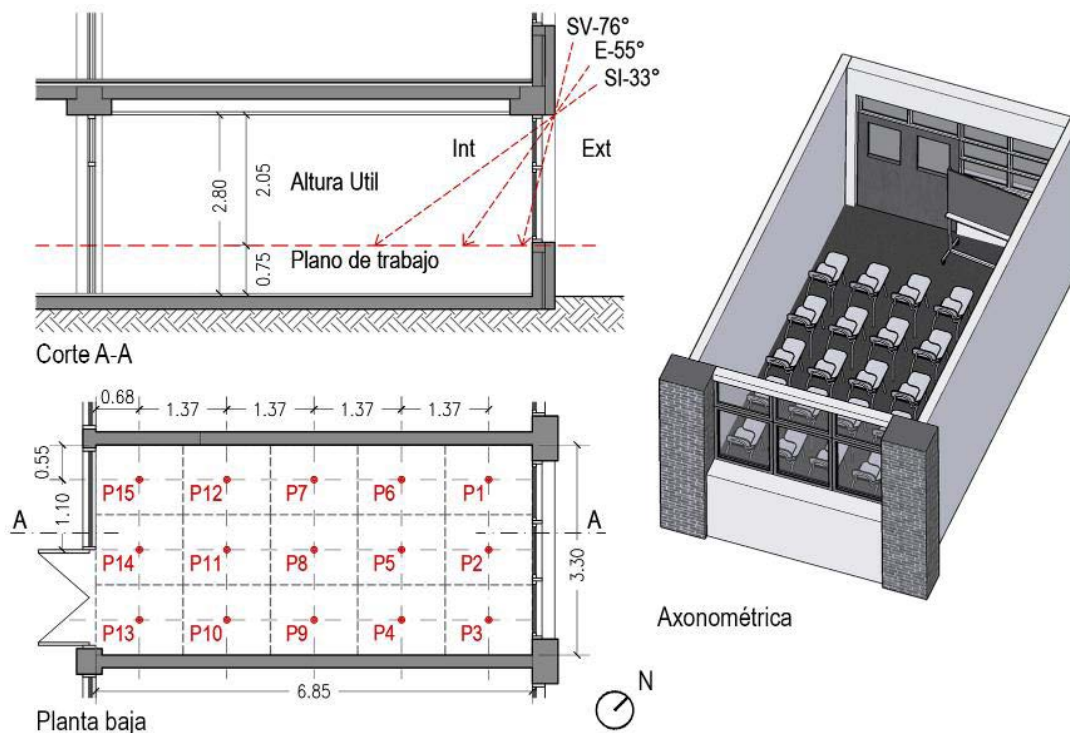


Figura 4. Planta, corte y axonométrica del aula existente con puntos de medición y simulación. Fuente: Elaboración propia.

El aula elegida posee una forma rectangular, de 6.85m x 3.30m. Uno de los lados cortos es un muro exterior, el cual tiene una abertura dividida en 3 paños, orientada al norte y sin protecciones exteriores. El área del pizarrón se ubica al lado de la puerta, por lo tanto, la abertura queda dispuesta en la parte posterior del aula, de espaldas a los pupitres. La abertura cuenta con cortinas interiores opacas, las cuales se cierran cuando el aula está en uso (Figura 3).

2- ETAPA DE DIAGNÓSTICO.

Etapa a

En una primera etapa, se realizó un estudio preliminar de tipo exploratorio, que persiguió dos objetivos. El primero consistió en determinar niveles de iluminación del aula existente, comparando datos obtenidos a través de dos métodos, mediciones *in situ* y simulaciones, y utilizando dos softwares de simulación lumínica: Velux Daylighting Visualizer, desarrollado por la empresa de aberturas Velux, y Climate Studio, desarrollado por Solemma como un *plugin* para Rhinoceros 3D, que utiliza el motor de cálculo Radiance.

Luego, se compararon los datos obtenidos para apreciar si arrojaban resultados consistentes. Se decidió efectuar este estudio el día 28 de agosto de 2019 entre las 9:00 h y las 13:00 h. Tanto las mediciones *in situ* como el uso de softwares de simulación fueron llevados a cabo por arquitectos que trabajan en el área de Planeamiento de la UNVM, es decir, el proceso implicó una etapa de

capacitación previa. Una vez determinada la consistencia de los datos obtenidos, se procedió con el segundo objetivo: evaluar qué estrategia (medición o simulación) y qué software (Velux o Climate Studio) se ajustaba mejor al proceso de trabajo diario seguido por los arquitectos de Planeamiento, para poder sugerir así un método a utilizar en futuros procesos de proyecto.

Las mediciones fueron realizadas de acuerdo al procedimiento descrito en el "Protocolo para la Medición de la Iluminación en el Ambiente Laboral" (Resolución SRT 84/2012). El aula de análisis fue dividida en una cuadrícula de 5 x 3 áreas, de lo que resultaron 15 puntos de medición, un punto por cada pupitre, ubicados a una altura de 0.75m desde el nivel de piso terminado (Figura 4). Las mediciones fueron ejecutadas utilizando un luxómetro calibrado previamente. Se recolectaron datos una vez por hora, a las 10:00 h (con cielo nublado), a las 11:00 h (con cielo intermedio) y a las 12:00 h y 13:00 h (con cielo claro). Las simulaciones fueron configuradas usando la misma grilla y altura de puntos, para contrastar los resultados con los datos medidos.

Etapa b

Una vez ensayados ambos softwares, se determinó que Climate Studio presentaba resultados más ajustados a las mediciones, y su utilización fue accesible y manejable para los arquitectos de Planeamiento. La etapa 2 se enfocó, entonces, en valorar las condiciones de iluminación del aula elegida en base a variables e

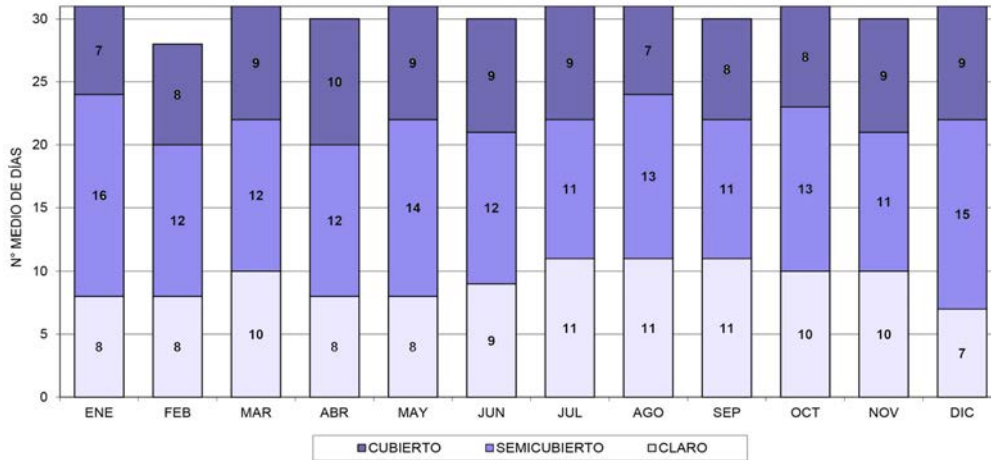


Figura 5. Porcentaje de tipos de cielo (cubierto, semicubierto y claro) a lo largo del año. Fuente: Datos de Estación Meteorológica Aeropuerto incluidos en Gonzalo (2015).

Tipo de Superficie	% Reflex.	Color			Espec.	Rugosidad
	R	R	G	B		
Muros (White Painted Room)	81.19%	0.830	0.808	0.719	0.36	0.200
Piso (Blue Carpet)	6.44%	0.037	0.07	0.300	0.01	0.300
Cielorraso (White Painted Room)	82.20%	0.844	0.817	0.722	0.44	0.200
Equipamiento (Wood Laminate Table)	50.92%	0.603	0.471	0.304	1.41	0.100
Estructura Equipamiento	47.21%	0.456	0.452	0.428	2.07	0.100
Pizarrón (Green Door Panel)	24.10%	0.211	0.254	0.202	0.17	0.200
Carpintería (Aluminio Blanco)	78.24%	0.745	0.773	0.767	1.72	0.200
Bandeja de luz (Whiteboard Paint)	94.42%	0.895	0.897	0.867	4.99	0.010

Tabla 2. Niveles y uniformidad de iluminación en aula existente. Cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

indicadores presentados en la Tabla 1: iluminancia, uniformidad de iluminación y deslumbramiento (DGP) empleando únicamente el software de simulación Climate Studio.

Los valores simulados corresponden a un tipo de cielo intermedio, predominante en Villa María. La Figura 5 expone los porcentajes mensuales de cada tipo de cielo durante los meses del año (cubierto, semicubierto y claro). El cielo predominante es el semicubierto o intermedio.

La Tabla 2 ilustra los tipos de superficies utilizados en las simulaciones, con sus respectivos coeficientes (Reflexión [R], índices de Color RGB, Especificidad y Rugosidad). Los materiales presentados fueron utilizados tanto en el aula existente como el en aula propuesta.

Se mantuvo la cuadrícula de puntos elaborada anteriormente y se optó por armar una grilla que contuviera datos simulados en 3 meses del año y 3

horarios del día. Se eligieron los meses de marzo, julio y noviembre, ya que estos marcan el inicio y finalización del período de clases. Se simularon datos a las 9:00 h, 13:00 h y 17:00 h, en correspondencia con el horario de dictado de clases. Los resultados fueron comparados con rangos admisibles de iluminancia media y uniformidad de luz natural presentes en el Anexo VI Decreto 351/79 (Ley N° 19.587).

El método seleccionado para simular deslumbramiento fue el Daylight Glare Probability (DGP). Para definir el punto de evaluación se consideró la ubicación más desfavorable que pudiera tener un observador dentro del aula. En el caso del aula existente se trató de la posición del docente sentado frente al pizarrón (1.15 m del nivel de piso), ya que para dirigirse a los alumnos debe mirar en dirección a la ventana.

El rango de parámetros de confort lumínico tenidos en cuenta para el análisis de resultados fueron: Iluminancia entre 500 y 750 lux (niveles mínimo y recomendado

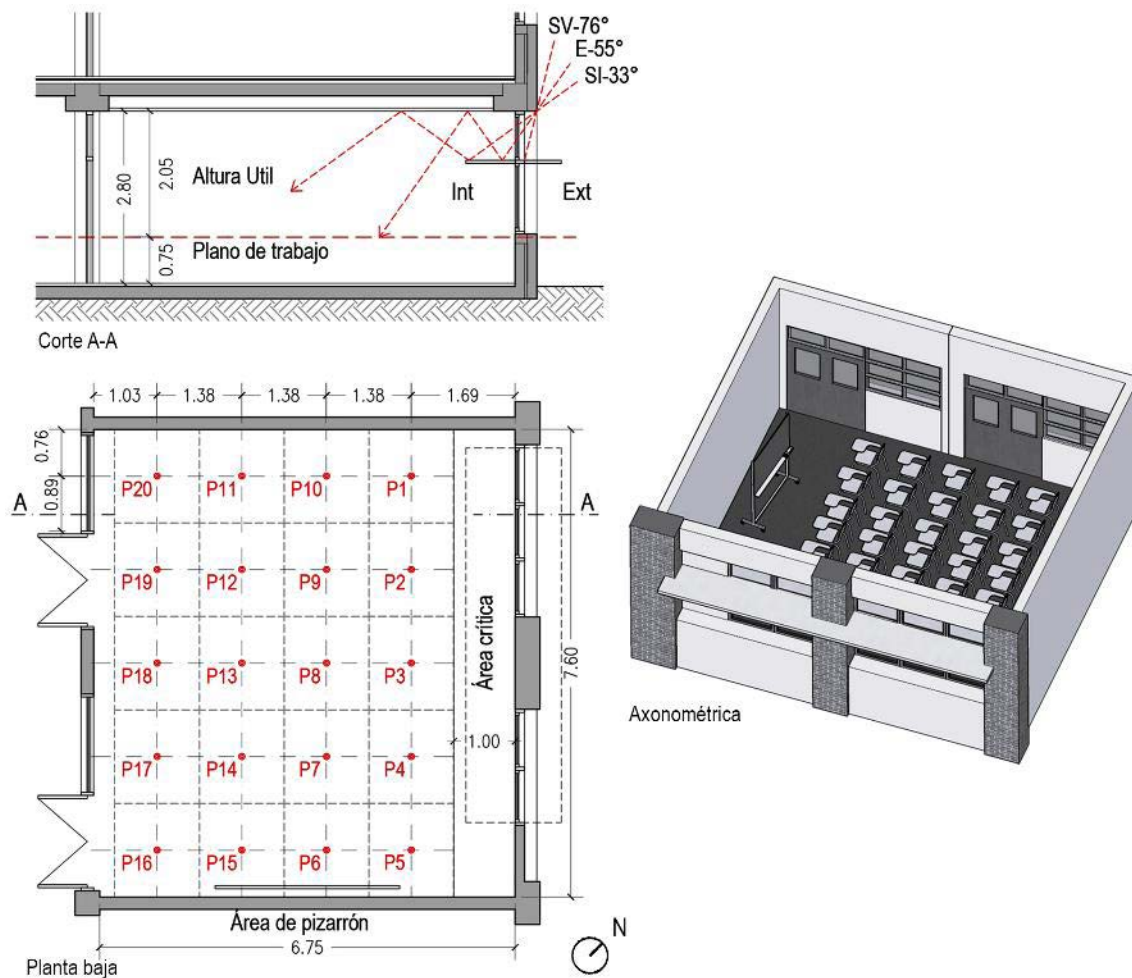


Figura 6. Planta, corte y axonométrica del aula propuesta con puntos de medición y simulación. Fuente: Elaboración de los autores.

para aulas de acuerdo a DIMEN, 1998); Uniformidad de iluminación >0.5 (de acuerdo a la exigencia del Decreto N° 351/79); y un margen de deslumbramiento perceptible hasta 38% (niveles establecidos por Wienold y Christofferen, 2006).

3. ETAPA DE PROPUESTA

Esta etapa implicó la elaboración y evaluación de una propuesta de optimización a partir del diagnóstico realizado, utilizando los mismos indicadores que en la etapa de diagnóstico, a fin de valorar las mejoras.

Se tuvo en cuenta que el edificio es uno construido, por lo tanto, la alternativa planteada debía ser factible de ser ejecutada y de fácil implementación. La propuesta se describe a continuación y se detalla en la Figura 6.

1. Se propuso desmontar el tabique divisorio entre aulas, uniendo dos espacios para formar un aula más grande, de forma cuadrada y con mayor apertura al exterior.
2. Se modificó la ubicación del pizarrón a uno de los tabiques laterales del aula. Además, se planteó

proteger el área del pizarrón de la penetración solar directa sustituyendo uno de los paños vidriados de la abertura existente por un paño ciego.

3. Se realizaron cambios en la distribución de pupitres, dejando una franja de 1.00 m de ancho a partir del muro exterior (área crítica) para evitar valores de exceso de luz y discomfort visual sobre los planos de trabajo. Con la nueva disposición del pizarrón, las aberturas se disponen del lado izquierdo de los pupitres.
4. Se colocó una repisa de luz, dividiendo la abertura existente en dos paños verticales, para reflejar la luz que incide sobre ella hacia la superficie del techo interior, logrando así una mayor penetración de la luz y una distribución más uniforme.

Al igual que en la etapa de diagnóstico, para definir el punto de evaluación de deslumbramiento, se consideró la ubicación más desfavorable que pudiese adquirir un observador dentro del aula. Luego de modificada la ubicación del pizarrón, la posición más desfavorable ya no es la del docente, sino la de un estudiante sentado en el lado izquierdo del aula, mirando hacia el pizarrón.

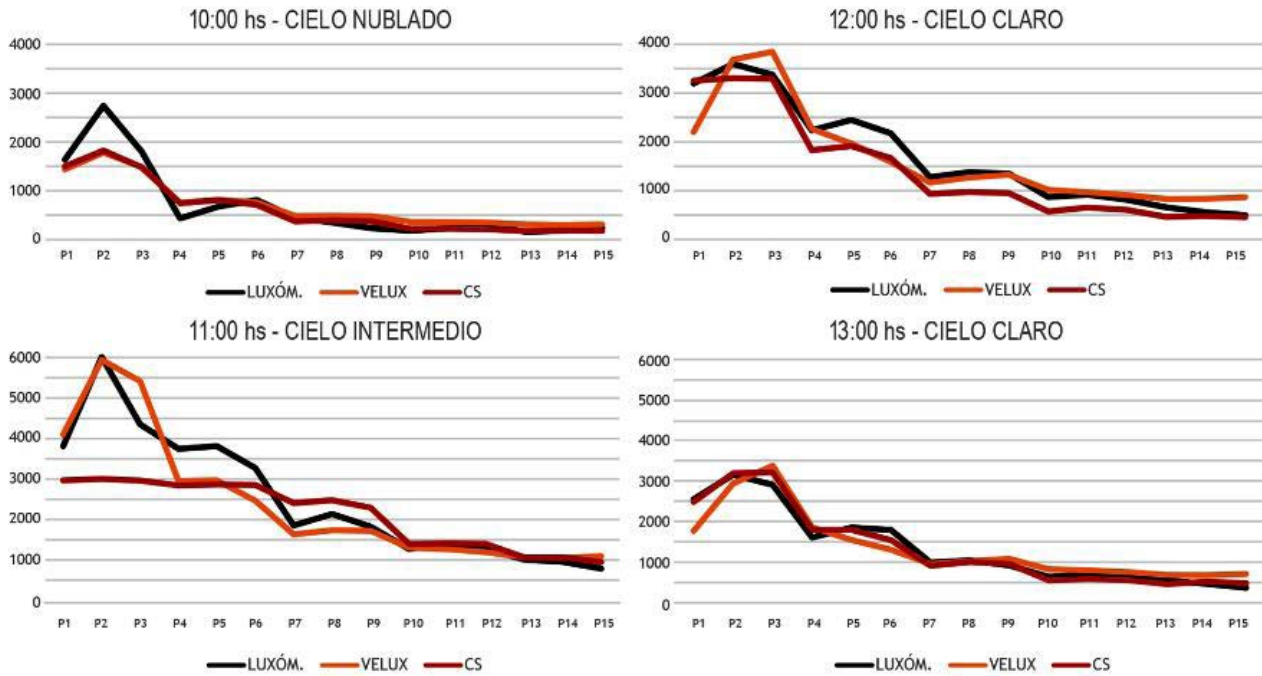


Figura 7. Gráficos comparativos entre resultados medidos y simulados. Fuente: Elaboración de los autores.

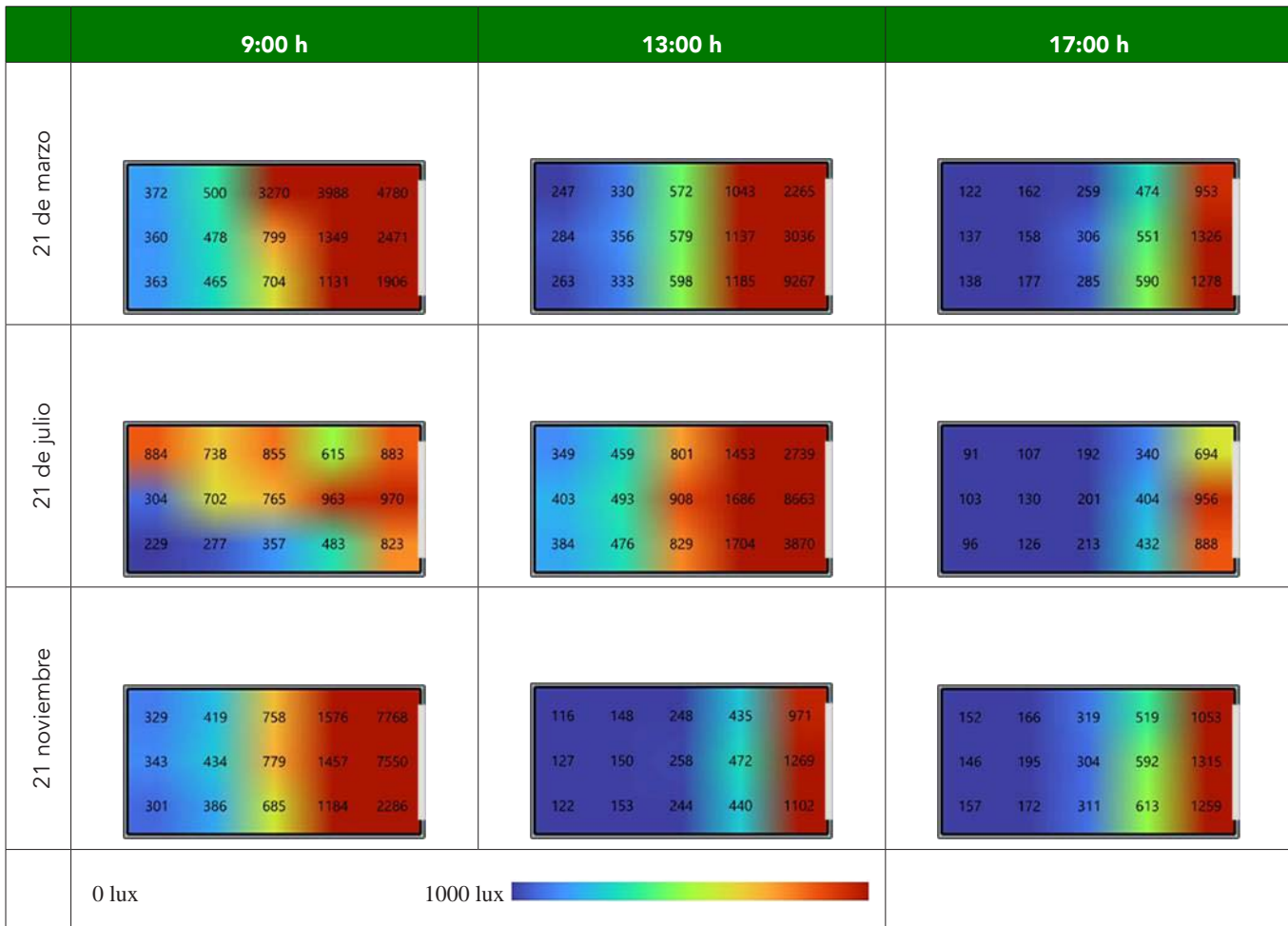


Figura 8. Niveles de iluminación en aula existente. Tipo de cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

	21 de marzo			21 de julio			21 de noviembre		
	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00
P-1	4780	2265	953	883	2739	694	7768	971	1053
P-2	2471	3036	1326	970	8663	956	7550	1269	1315
P-3	1906	9267	1278	823	3870	888	2286	1102	1259
P-4	1131	1185	590	483	1704	432	1184	440	613
P-5	1349	1137	551	963	1686	404	1457	472	592
P-6	3988	1043	474	615	1453	340	1576	435	519
P-7	3270	572	259	855	801	192	758	248	319
P-8	799	579	306	765	908	201	779	258	304
P-9	704	598	285	357	829	213	685	244	311
P-10	465	333	177	277	476	126	386	153	172
P-11	478	356	158	702	493	130	434	150	195
P-12	500	330	162	738	459	107	419	148	166
P-13	372	247	122	884	349	91	329	116	152
P-14	360	284	137	304	403	103	343	127	146
P-15	363	263	138	229	384	96	301	122	157
Emáx.	4780	9267	1326	970	8663	956	7768	1269	1315
Emin.	360	247	122	229	349	91	301	116	146
Emed.	1529.1	1433.0	461.1	656.5	1681.1	331.5	1750.3	417.0	484.9
Un	0.24	0.17	0.26	0.35	0.21	0.27	0.17	0.28	0.30

Tabla 3. Niveles y uniformidad de iluminación en aula existente. Cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

RESULTADOS

DIAGNÓSTICO CASO EXISTENTE

Diagnóstico: Etapa a

En primer lugar, se presentan de manera comparativa los resultados de niveles de iluminación en el aula existente, obtenidos mediante medición y simulación (Figura 7). Puede observarse que los valores simulados son fieles a los valores medidos con luxómetro. A las 11:00 h, la condición de cielo intermedio muestra una mayor diferencia entre los resultados simulados y los medidos.

Se confirma que los valores arrojados por Climate Studio son más cercanos a las mediciones que los obtenidos mediante Velux DV. Esto ocurre ya que Climate Studio tiene un motor de cálculo más preciso.

Los puntos más cercanos a la ventana (P1 a P3) registran valores de más de 1000 lux en los cuatro horarios analizados, excediendo rangos recomendados y llegando, en algunos casos, a alcanzar puntos de disconfort visual (>5000 lux). La totalidad de los puntos medidos y simulados a las 11:00 h presenta valores de exceso de luz (>1000 lux),

con respecto al rango considerado (entre 500 y 750 lux). A medida que los puntos se alejan de la ventana, el nivel de iluminación disminuye. Los puntos P4 a P7 muestran resultados cercanos al rango de confort visual a las 10:00 h (400 a 600 lux), no obstante, desde las 11:00 h hasta las 13:00 h existe exceso de luz (1000 a 2000 lux). Los puntos que se encuentran en el medio del aula (P7 a P12) alcanzan niveles cercanos al confort visual a las 12:00 h y 13:00 h. En los puntos más alejados, P13 a P15, a las 10:00 h, la iluminación disminuye a niveles insuficientes (<200 lux).

Diagnóstico: Etapa b

En seguida, se exponen los resultados de la valoración de los indicadores estudiados durante 3 momentos del año. Con respecto a niveles de iluminación, la grilla de la Figura 8 y la Tabla 3 muestran resultados de niveles de iluminación en los 3 meses y horarios simulados.

Se advierte aquí una relación con resultados anteriores: niveles muy elevados de Emax en puntos cercanos a las aberturas, próximos a los 9200 lux en las primeras horas de la mañana (debido a la existencia de penetración solar directa), que decrecen durante el transcurso del día hasta alcanzar los 1300 lux a las 17:00 h. Los valores de Emin correspondientes al otro extremo del aula evidencian una

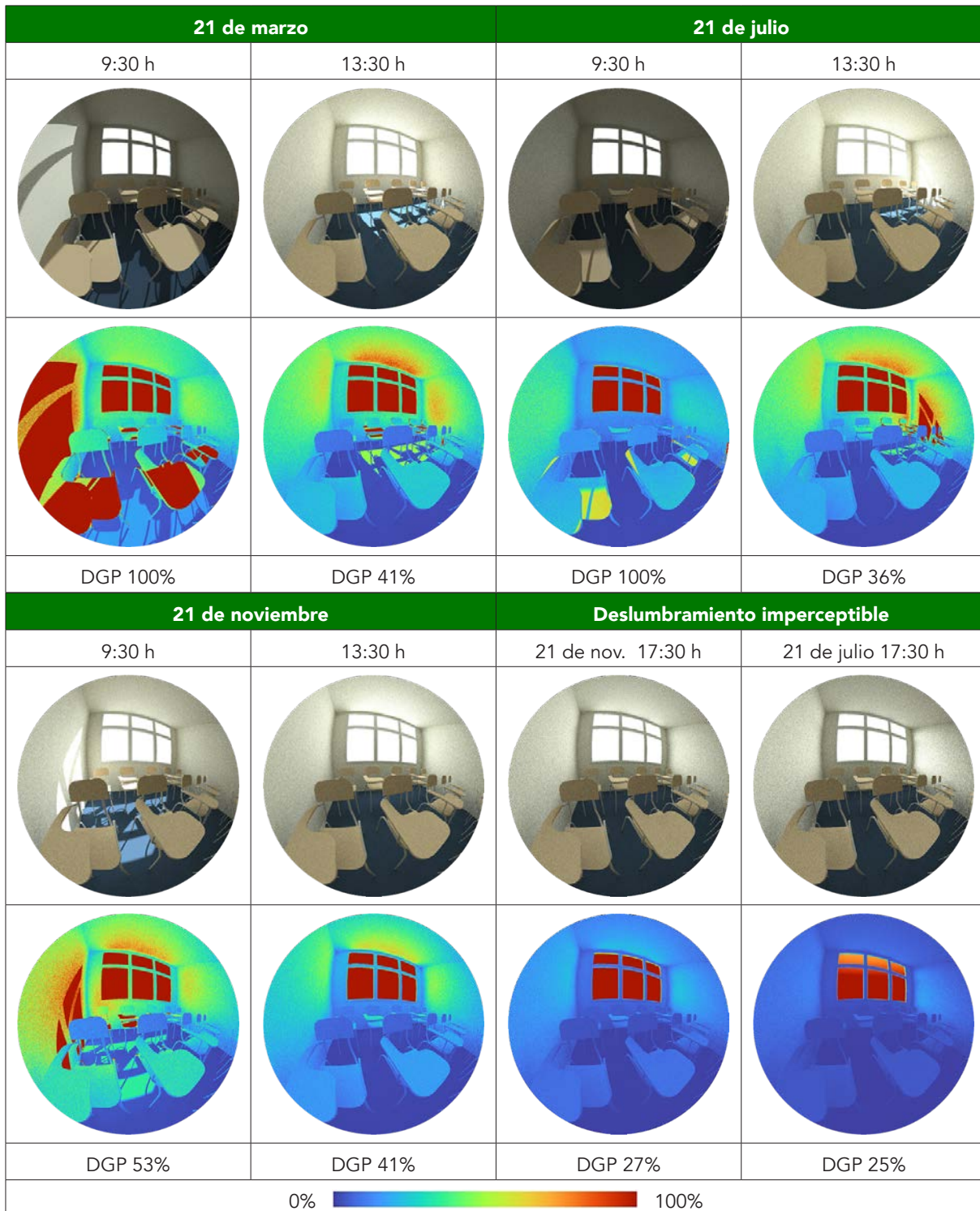


Figura 9. Valores de deslumbramiento DPG (%) del aula existente. Fuente: Elaboración de los autores.

reducción significativa de iluminancia, llegando a niveles menores a 300 lux en los mismos horarios.

En cuanto a la uniformidad en la distribución de luz natural, los valores son, en todos los casos, menores a 0.5, es decir, ninguno verifica a las exigencias establecidas. Solamente uno de los casos (julio a las 9:00 h) presenta una uniformidad aceptable. En general, la uniformidad

de luz es deficiente, ya que hay puntos muy iluminados y puntos muy poco iluminados.

DESOLUMBRAMIENTO

La Figura 9 expresa resultados de índice DGP (%). En ella se puede notar que tales resultados son coherentes con los valores de iluminancia anteriores. La probabilidad de

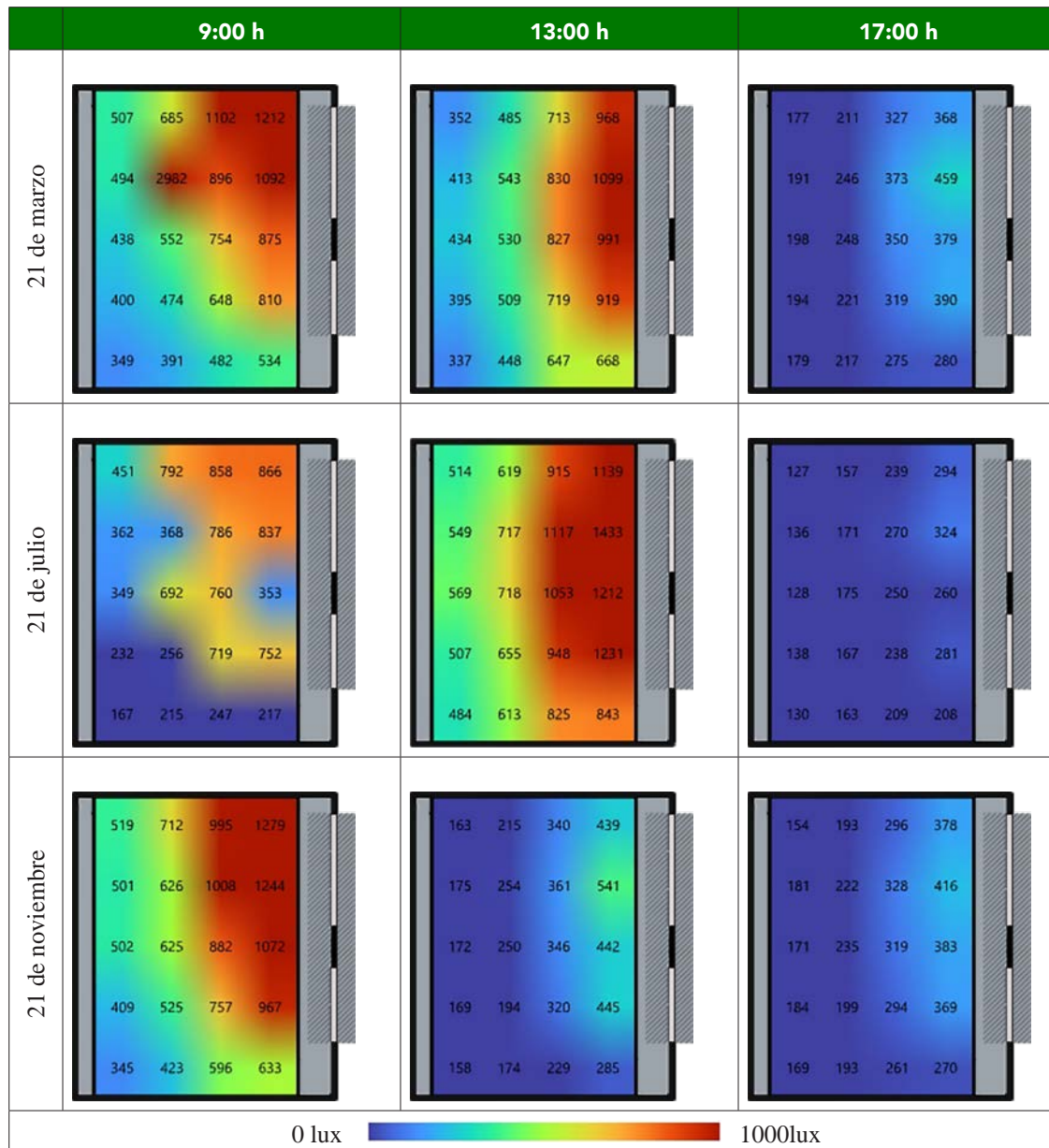


Figura 10. Niveles de iluminación en aula propuesta. Tipo de cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

deslumbramiento es más elevada durante la mañana en todos los casos, llegando a picos del 100% (intolerable) el 21 de marzo y 21 de julio a las 9:30 h, en los momentos de penetración solar directa. Esta situación coincide, además, con los valores más altos de iluminancia y los bajos niveles de distribución de luz.

A partir de las 13:30 los valores empiezan a disminuir. El 21 de julio el deslumbramiento es perceptible de acuerdo a los rangos establecidos (36%). Sin embargo, tanto el 21 de marzo y como el 21 de noviembre siguen presentando valores molestos (41%). A las 17:30 h en todos los casos, la ocurrencia de deslumbramiento es imperceptible, registrándose valores de 29% (21 de marzo), 25% (21 de julio) y 27% (21 de noviembre).

CASO PROPUESTO

NIVELES DE ILUMINACIÓN

La grilla de la Figura 10 y la Tabla 4 exponen resultados de niveles de iluminación del aula propuesta. Por un lado, puede observarse una reducción considerable de E_{max}, con valores entre 500 y 1000 lux, próximos a las aberturas, presentando un pico de 2962 lux el 21 de marzo a las 9:00 h. Esto ocurre porque la bandeja de luz obstruye la penetración solar directa.

Los puntos en los sectores más alejados de las aberturas tiene valores entre los 350 y 510 lux durante la mañana

	21 de marzo			21 de julio			21 de noviembre		
	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00
P-1	1212	968	368	866	1139	294	1279	439	378
P-2	1092	1099	459	837	1433	324	1244	541	416
P-3	875	991	379	353	1212	260	1072	442	383
P-4	810	919	390	752	1231	281	967	445	369
P-5	534	668	280	217	843	208	633	285	270
P-6	482	647	275	247	825	209	596	229	261
P-7	648	719	319	719	948	238	757	320	294
P-8	754	827	350	760	1053	250	882	346	319
P-9	896	830	373	786	1117	270	1008	361	328
P-10	1102	713	327	858	915	239	995	340	296
P-11	685	485	211	792	619	157	712	215	193
P-12	2962	543	246	368	717	171	626	254	222
P-13	552	530	248	692	718	175	625	250	235
P-14	474	509	221	256	655	167	525	194	199
P-15	391	448	217	215	613	163	423	174	193
P-16	349	337	179	167	484	130	345	158	169
P-17	400	395	194	232	507	138	409	169	184
P-18	438	434	198	349	569	128	502	172	171
P-19	494	413	191	362	549	136	501	175	181
P-20	507	352	177	451	514	127	519	163	154
Emáx.	2962	1099	459	866	1433	324	1279	541	416
Emin.	349	337	177	167	484	127	345	158	154
Emed.	782.9	641.4	280.1	514.0	833.1	203.3	731.0	283.6	260.8
U	0.45	0.53	0.63	0.32	0.58	0.62	0.47	0.56	0.59

Tabla 4. Niveles y uniformidad de iluminación en aula propuesta. Cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

en marzo y julio, alcanzando niveles de confort visual. Será necesario reforzar con iluminación artificial en noviembre a las 13:00 h y en los 3 meses a las 17:00 h, porque los valores son bajos (< de 300 lux).

La uniformidad en la distribución de luz natural registra un aumento en todos los valores, excepto en julio (9:00 h) que muestra una mínima disminución (de 0,35 a 0,32). Los valores más bajos de uniformidad ocurren a las 9:00 h (0.45 en marzo, 0.32 en julio y 0.47 en noviembre), y se acercan mucho a la verificación de las exigencias establecidas en Argentina (0,5). Aun así, se consideran aceptables en el rango presentado. A partir de las 13:00 h, la uniformidad registra resultados superiores a 0,5 en todos los casos.

DESLUMBRAMIENTO

Los resultados de deslumbramiento del aula propuesta se muestran en la Figura 11.

Los resultados obtenidos son coherentes con la reducción de valores de iluminancia y el aumento de uniformidad en la distribución de la luz natural. La probabilidad de deslumbramiento también muestra una reducción significativa durante la mañana en todos los casos. A pesar de esto, los valores siguen correspondiendo al rango de deslumbramiento molesto: de 44% (21 de marzo), 39% (21 de julio) y 35% (21 de noviembre). A partir de las 13:30, los valores se ubican en el rango de deslumbramiento perceptible (31% en marzo y julio) e imperceptible (29% en noviembre y todos los casos a las 17:30 h).

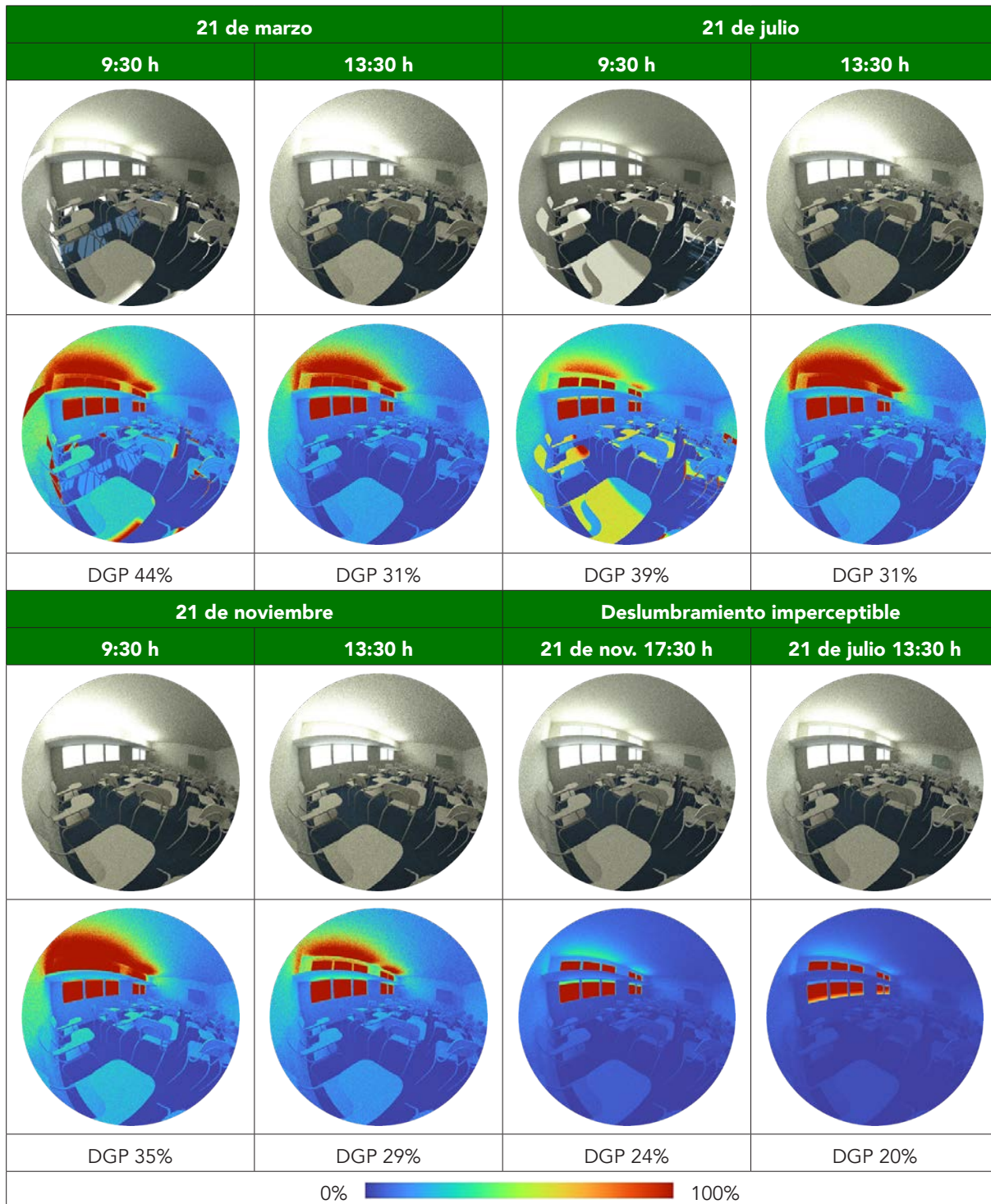


Figura 11. Valores de deslumbramiento DPG (%) del aula propuesta. Fuente: Elaboración de los autores.

DISCUSIÓN

La distribución funcional del aula existente es ineficiente. Los puntos de mayor nivel de iluminación están en la parte de atrás del aula, próximos a la ventana, y no en el punto focal de atención de los alumnos (área del pizarrón). Por lo tanto, en los momentos en donde no están prendidas las luces artificiales, los alumnos arrojan

sombra sobre el plano de trabajo del pupitre. Asimismo, la penetración solar directa existente durante la mañana hace que los pupitres próximos a la ventana tengan exceso de luz en el plano de trabajo, llegando a valores de desconfort visual. Los resultados evidenciaron también que existen problemas serios de deslumbramiento en el punto de vista que tendría una persona mirando hacia la ventana, es decir, comprometiendo el desempeño de

trabajo del docente que mira hacia los pupitres desde el área de pizarrón.

La alternativa propuesta implicó mejoras significativas en el aula. La distribución de pupitres planteada evita que los alumnos arrojen sombra sobre el plano de trabajo, y que el docente mire hacia las ventanas al momento de dar clases. La incorporación de una bandeja de luz posibilitó la obstrucción de la radiación solar directa, impidiendo la incidencia de la misma sobre los planos de trabajo, con lo cual se mejora significativamente los valores de iluminancia próximos a la ventana. Además, la superficie reflectante de la bandeja permitió la reflexión de la luz incidente hacia adentro del aula, posibilitando una distribución más uniforme de la iluminación en el interior del aula. Pese a que se alcanzaron reducciones significativas, los resultados aún pueden mejorarse. Los valores de uniformidad de iluminación todavía son bajos (<0.50) y los valores de deslumbramiento expresan percepción de cierta molestia durante la mañana (44% y 39%). La Tabla 5 resume los resultados obtenidos y los expone de manera comparativa, para evidenciar las mejoras alcanzadas.

CONCLUSIONES

Este trabajo se propuso identificar estrategias de diseño pasivo orientadas a alcanzar niveles recomendados de confort lumínico en espacios interiores de edificios educativos. Los resultados obtenidos muestran el logro de los objetivos planteados. A estos resultados se le suma el beneficio del potencial ahorro de energía eléctrica producto de la utilización de iluminación natural, que podrá ser cuantificado en estudios posteriores.

La discusión de resultados señala que los mismos pueden seguir optimizándose, sobre todo durante los horarios matutinos. En futuros estudios puede proponerse la incorporación de cortinas interiores tipo *roller* con telas *sunscreens*, que actúen como pantallas difusoras, para lograr iluminancias más uniformes y evitar deslumbramientos molestos. De igual forma, los resultados obtenidos podrán tenerse en cuenta en el diseño de integración de iluminación natural con iluminación artificial, en la elección de tipos de lámparas que resulten convenientes.

Tanto el comportamiento del desempeño del aula existente como el diseño de alternativas y la previsualización de resultados fueron posibles gracias a la utilización de herramientas y procedimientos de medición y de simulación, lo que permitió la capacitación de profesionales arquitectos de la SPTSyM- UNVM en el manejo de indicadores asociados a la iluminación natural y su inclusión dentro de prácticas de diseño. El software Climate Studio fue seleccionado por sobre el Software Velux Daylight Visualizer, dado su fácil manejo, su mejor interfaz gráfica, su amplia biblioteca de materiales y sus resultados más ajustados a los valores de las mediciones. Estas herramientas y procedimientos de trabajo serán tenidas en cuenta en el desarrollo de proyectos futuros.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a sus autoridades, Dra. Arq. Mariana Gatani y Mgter. Arq. Gabriela Sánchez. Además, al Arq. Carlos Azócar, Secretario de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento de la UNVM, Córdoba, Argentina, y a todo su equipo, quienes con su capacidad y experiencia aportaron a la realización de este estudio.

	Indic.	21 de marzo			21 de julio			21 de noviembre		
		09:00	13:00	17:00	09:00	13:00	17:00	09:00	13:00	17:00
AE	E max	4780	9267	1326	970	8663	956	7768	1296	1315
	E min	360	247	122	229	349	91	301	116	146
	E med	1529.1	1433.0	461.1	656.5	1681.1	331.5	1750.3	417.0	484.9
AP	E max	2962	1099	459	866	1433	324	1279	541	416
	E min	349	337	177	167	484	127	345	158	154
	E med	782.9	641.4	280.1	514.0	822.1	203.3	731.0	283.6	260.0
AE	U	0.24	0.17	0.26	0.35	0.21	0.27	0.17	0.28	0.30
AP	U	0.45	0.53	0.63	0.32	0.59	0.62	0.47	0.56	0.59
AE	DGP	100%	41%	29%	100%	36%	25%	53%	41%	27%
AP	DGP	44%	31%	23%	39%	31%	20%	35%	29%	24%

Tabla 5. Análisis comparativo entre aula existente y aula propuesta. Fuente: Elaboración de los autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Callejas, L., Pereira, L., Torres, P. y Piderit, B. (2020). Optimization of Natural Lighting Design for Visual Confort in Modular Classrooms: Temuco Case. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503, 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012007>.
- Casabianca, G. y Evans, J. (2003). Estantes de luz: Verificación de iluminación natural, asoleamiento y protección solar en maquetas de ensayo. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 7(1), 05.25-05.30.
- Cisterna, M., Ledesma, S., Llabra, C., Marquez Vega, S., Martínez, C., Nota, V., . . . Gonzalo, G. (2015). Condiciones de habitabilidad y confort en edificios escolares. Iluminación natural en aulas de escuelas de Tafi del Valle, Tucumán. *Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la ASADES*. 3, págs. 01.25-01.37. Mendoza: Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente.
- CITEC-UBB (2012). *Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos (GGGEduc)*. Santiago de Chile: Agencia Chilena de Eficiencia Energética (ACHEE).
- Decreto 351/79(1979). *Anexo IV "Iluminación y color". Correspondiente a los artículos 71 a 84 de la Reglamentación aprobada*. Buenos Aires: Ministerio de Justicia y Derechos Humanos.
- Ferrón, L., Pattini, A. y Lara, M. (2010). Aplicabilidad de sistemas de iluminación natural de bajo costo. Refuncionalización lumínica en una oficina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25, 57-63.
- Gonzalo, G. (2015). *Manual de Arquitectura Bioclimática*. Tucumán: Nobuko.
- Gonzalo, G., Ledesma, S., Nota, V. y Márquez, G. (2001). Evaluación comparativa del comportamiento lumínico y térmico de diferentes soluciones de aventanamientos para escuelas y oficinas de la provincia de Tucumán. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 5, 05.13-05.18.
- Heschong, L., Wright, R. y Okura, S. (2002). Daylighting Impacts on Human Performance in School. *Journal of Illuminating Engineering Society*, 31, 101-114.
- Hoses, S., San Juan, G., Melchiori, M. y Viegas, G. (2001). Estrategias de control solar en aulas escolares y análisis de su incidencia en la iluminación natural interior mediante la utilización de modelos analógicos a escala. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 5, 05.25-05.30.
- IRAM AADL J20-06 (2017). *Iluminación natural y artificial en industrias*. Buenos Aires: Instituto de Racionalización Argentino de Materiales (IRAM) y Asociación Argentina de Luminotecnia (AADL).
- Ledesma, S., Gonzalo, G., Cisterna, M., Márquez Vega, S., Quiñones, G. y Nota, V. (2004). Evaluación comparativa de eficiencia de parasoles y su incidencia en la iluminación natural de aulas en San Miguel de Tucumán. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 8(1), 05.55-05.60.
- Ley N° 19.587 "Higiene y Seguridad en el Trabajo" (1979). Buenos Aires: Ministerio de Justicia y Derechos Humanos.
- Ministerio de Educación [DIMEN] (1998). *Criterios y Normativas básicas de arquitectura escolar*.
- Monteoliva, J., Garretón, J. y Pattini, A. (2021). Comparative Investigation of Daylight Glare Probability (DGP) Comfort Classes in Clear Sky Condition. *Journal of Daylighting*, 8, 284-293.
- Monteoliva, J., Villalba, A. y Pattini, A. (2014). Uso de dispositivo de control solar en aulas: impacto en la simulación dinámica de la iluminación natural. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 14, 43-58.
- Muñoz Núñez, D. (2010). La iluminación natural en los espacios arquitectónicos educativos interiores. Modelo de indicadores de diseño. Tesis de Maestría en Ciencias del Hábitat con orientación terminal en Arquitectura. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma San Luis Potosí.
- Palarino, C. y Piderit, B. (2020). Optimisation of Passive Solar Design Strategies in Side-lit Offices: Maximising Daylight Penetration While Reducing the Risk of Glare in Different Chilean Climate Contexts. *Journal of Daylighting*, 7, 107-121.
- Pattini, A. (2000). Recomendaciones de niveles de iluminación en edificios no residenciales. Una comparación internacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 7-12.
- Pattini, A. (2009). *La luz natural en las escuelas: aprovechamiento y control de la luz solar en aulas*. Buenos Aires: Editorial Dunken.
- Pattini, A. y Kirschbaum, C. (2006). Iluminación natural en edificios solares. El caso del control y distribución lumínica en aulas de un edificio escolar construido en Mendoza. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 10, 05.197-05.201.
- Pattini, A., Rodríguez, R., Lasagno, C., Villalba, A., Córca, L., Ferrón, L. y Rosso, R. (2009). Evaluación de deslumbramiento en edificios con iluminación natural en climas soleados. El caso de una biblioteca con techo vidriado. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 13, 05.169-05.177.
- Phillips, R. (1997). *Educational Facility Age and the Academic Achievement of Upper Elementary School Students*. Tesis doctoral. Georgia, Estados Unidos: University of Georgia.
- Piderit, B. y Bodart, M. (2012). Design strategies applied to classroom's daylight design optimization. Optimization of classrooms design. En J. Reiser, C. Jimenez y S. Biondi Antúnez de Mayolo (Eds.), *PLEA 2012 28th Conference: Passive and Low Energy architecture: Opportunities, limits & needs, Towards an environmentally responsible architecture*. Lima, 7 al 9 de noviembre 2012. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2078.1/145792>
- Robles Machuca, L. (2014). *Confort Visual: Estrategias para el diseño de iluminación natural en aulas del sistema de educación básica primaria en el AMM Nuevo León*. Tesis de maestría. México: Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Arquitectura.
- Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento [SPTSyM] (2020). *Plan Maestro de Infraestructura 2020-2021*. Villa María: SPTSyM, Universidad Nacional de Villa María.
- Superintendencia de Riesgos de Trabajo [SRT] (2012). Resolución SRT84-2012. *La Iluminación en el ambiente laboral*. Buenos Aires: SRT, Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social.
- Universidad de Villa María [UNVM] (2019). *Programa "Hacia una Ciudad Universitaria Sustentable"*. Villa María: Universidad de Villa María.
- Wienold, J. y Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Elsevier: Energy and Buildings*, 38(7), 743-757.