

EVALUACION DE PROPUESTAS DE DISEÑO PARA LA OPTIMIZACION DEL DESEMPEÑO LUMINICO EN AULAS DEL TROPICO, BASADAS EN METRICAS DINAMICAS

Montoya Olga ⁽¹⁾, San Juan Gustavo ⁽²⁾, Saavedra Lina ⁽³⁾

⁽¹⁾ Programa de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño (FAAD). Universidad de San Buenaventura, Cali. Avenida 10 de mayo, La Umbría, vía a Pance. C.P. 76001. Colombia. Tel: 057-2-4882222 ext. 8059. E-mail: olmontoy@usbcali.edu.co

⁽²⁾ Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC-CONICET/UNLP). Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires. Tel. 0221-4236587/90 int. 250. e-mail: gustavosanjuan60@hotmail.com

⁽³⁾ Estudiante último año. Programa de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño (FAAD). Universidad de San Buenaventura, Cali. Avenida 10 de mayo, La Umbría, vía a Pance. C.P. 76001. Colombia. Tel: 057-2-4882222 ext. 8059. E-mail: olmontoy@usbcali.edu.co

Recibido 16/08/19, aceptado 22/10/19

RESUMEN: El trabajo presenta el análisis de las estrategias de diseño para alcanzar la comodidad visual en aulas, en el marco de la norma colombiana NTC 4595. La metodología se basa en el diseño experimental con un modelo virtual, localizado en Cali, Colombia, al cual se le aplican variaciones de diseño propuestas por la norma, y otras, resultado del estudio, y se analizan a partir de las métricas dinámicas para simulación anual: UDI, sDA y ASE. Los resultados evidencian la necesidad de considerar las condiciones exteriores inmediatas, plantear elementos de protección solar en fachadas expuestas hacia el norte y sur, evitar la exposición directa de la fachada hacia este-oeste, y aplicar materiales claros al interior. Lo anterior, aporta a la norma local, para promover diseños con el máximo aprovechamiento de iluminación natural que logren satisfacer los requerimientos lumínicos de los estudiantes y los valores recomendados en la norma.

Palabras clave: Aulas escolares, desempeño lumínico, clima tropical, métricas dinámicas, simulación,

INTRODUCCION

Un adecuado proceso de enseñanza y aprendizaje, requiere condiciones confortables y satisfactorias en el espacio del aula escolar. (San Juan et al., 2014). Son diversos los estudios que señalan cómo las condiciones ambientales inadecuadas, inciden en las actividades de aprendizaje de los estudiantes, como también en la fatiga y estrés docente (Zapata et al., 2018).

En el tema del confort visual, es tan importante la sensación psicofisiológica de un individuo sobre el ambiente lumínico en el que se encuentra (Arango, 2011), como la posibilidad de desarrollar las tareas visuales, con el menor esfuerzo, riesgo y perjuicio a la vista (Lamberts et al., 2012). Por lo tanto, es necesario contar con los niveles lumínicos adecuados sobre la superficie de trabajo, controlar los brillos y contrastes excesivos, evitar reflejos molestos y favorecer la buena reproducción de los colores. (Zapata et al., 2018). Una inadecuada resolución de la envolvente edilicia, puede generar brillos indeseados y altos contrastes por falta de uniformidad, además, condiciones térmicas inadecuadas e ineficiencia energética como señalan Wu y Ng (2003).

La Norma colombiana NTC4595 (primera versión año 2000 y actualización en el 2015), establece recomendaciones de diseño con el objetivo de alcanzar la comodidad en los temas visual, térmico y auditivo, para diferentes tipos de clima: moderado, frío y templado; cálido seco y cálido húmedo. Para el clima cálido seco, en el cual se inscribe la ciudad de Cali en la primera versión de la Norma (por presentar temperaturas entre 5°C y 35°C, y humedad relativa entre 40% y 60%; a pesar que los rangos

climáticos cambian con la actualización de la norma, lo cual agrega confusión y es objeto de análisis en un trabajo previo (Zapata et al., 2018). Adicional a esto, las disposiciones en cada uno de los temas no guardan relación, ni coherencia entre ellos, llegando a contradecirse entre los mismos (Montoya y San Juan, 2018).

Para la comodidad visual, la Norma establece *indicaciones sobre la cantidad y calidad de la luz y disposiciones varias* (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), pág. 15), haciendo énfasis en el aprovechamiento de la luz natural durante la mayor parte de la jornada, sin necesidad del uso de iluminación artificial. Lo anterior es posible y favorece ahorros entre el 50% y 80% sobre el consumo total de una institución (Monteoliva y Pattini, 2013), sin embargo, como lo indica Pattini (2009), esto depende de la presencia de sol y la luminosidad de la bóveda celeste del lugar

La dimensión de las aberturas (ubicadas por encima del plano de trabajo), deben ser 1/5 en relación con el área del salón, y si presentan materiales opacos, el área debe aumentar 20%, y hasta 60% en caso de presentar celosías de concreto y otros elementos que obstruyan el paso de la luz. En cuanto a las condiciones del exterior, se promueve el acceso de luz desde el exterior, sin elementos que lo impidan. La orientación debe ser perpendicular al eje norte-sur, y de no ser así, deben aparecer elementos que obstruyan el paso directo de los rayos solares al espacio. Las últimas disposiciones de la norma se refieren a los coeficientes de reflexión de las superficies al interior de los espacios, las cuales no deben ser inferior al 15% en pisos, 50% en paredes distintas a las aberturas o sus enfrentadas, 74% en las paredes con las aberturas o sus enfrentadas, y 80% en cielo raso.

El nivel de iluminancia recomendado sobre plano de trabajo es de 300 lux para la versión de la Norma del año 2000; y de mayor exigencia, 500 lux, para la versión del año 2015. Este último en el mismo rango indicado por las normas en Argentina y Holanda, superando el umbral de países en condiciones similares como México (400 lux) y Brasil (200 lux) (Pattini, 2000). Sin embargo, estudios recientes enfatizan sobre el carácter dinámico de la luz al interior de los espacios, y las limitaciones al caracterizar los espacios a través de valores absolutos o instantáneos en el tiempo (Monteoliva et al., 2014), además de la conveniencia de combinar diferentes métricas para definir el ambiente lumínico, especialmente, en el caso de la iluminación natural (Yamin et al., 2014).

Entre las dificultades que el tema visual implica, está la imposibilidad de estandarizar un método para predecir el comportamiento lumínico con las condiciones reales climáticas (Nabil y Mardaljevic, 2006), y el carácter dinámico de la luz al interior de los espacios como lo señala Pattini (2000). Además, la norma deja abierta la posibilidad de modificar todas las recomendaciones realizadas, a través de simulaciones o cálculos que demuestren el cumplimiento de los rangos establecidos (Díaz et al., 2013).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El diseño experimental se realizó a partir de un modelo de aula construido virtualmente, que sintetiza las condiciones generales de las aulas. El caso se localiza en Santiago de Cali, ciudad de Colombia, 3°25' latitud Norte, 76°30' longitud Oeste, entre 950 y 1100 msnm. La temperatura media anual es 24.8°C, la media máxima anual 29.9 °C y la media mínima 19.4 °C; y la humedad relativa anual es de 72.2%. La irradiación solar media es de 4332.6 Wh/m² X DIA), y 1.56 es el promedio de días al mes sin brillo solar; como lo indican los promedios anuales presentados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

El rango confort visual para aulas escolares en la primera versión de la norma NTC 4595 (año 2000), es de 300 lux promedio. Para la segunda versión, en el año 2015, propone los siguientes valores:

- Nivel promedio 500 lux
- Factor de Luz Día-FLD debe ser superior al 2%
- Coeficiente de uniformidad-U_o = 60%

- Y otras disposiciones como el deslumbramiento máximo-UGR=19 y eficiencia energética = VEEI = 4

Métricas para el análisis

Para el análisis se utilizaron las métricas dinámicas basadas en archivos climáticos de radiación solar, con las cuales se realizaron simulaciones teóricas. Estas métricas además de permitir el desempeño lumínico anual de un espacio, permiten tener datos más certeros sobre el tipo de cielo utilizado, derivado de la información de radiación contenida en el archivo climático. Las métricas dinámicas usadas son:

- **Rango útil de iluminancia, UDI**, por sus siglas en inglés (Useful Daylight Illuminance) desarrolladas por Mardaljevic y Nabil (2005), la cual permite identificar el porcentaje de tiempo al año con presencia de iluminancias entre rango útil de 100(lux) a 2000 (lux). Lo que sugiere que valores por fuera de dicho rango, no son útiles (Monteoliva et al.,2016). El porcentaje de tiempo con el rango útil recomendado al año, es de 70% (Mardaljevic y Nabil, 2005).

La Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norteamérica IESNA (2012), por sus siglas en inglés (Illuminating Engineering Society of North América), desarrollaron dos métricas que permiten complementarse (Heschong et al., 2012) y robustecer el análisis sobre desempeño lumínico:

- **Autonomía de luz en el espacio, sDA** por sus siglas en inglés (Spatial Daylight Autonomy), indica el porcentaje de área con un valor de iluminancia (de 300 lux en este caso), el 50% del tiempo al año. El porcentaje recomendado por Heschong et al. (2012) es 75%.

- **Exposición solar anual, ASE** por sus siglas en inglés (Annual Sunlight Exposure), se refiere al porcentaje del área del piso que recibe al menos 1000 lux por al menos 250 horas ocupadas al año (Elghazi et al., 2014), siendo un indicador relacionado con el deslumbramiento, o disconfort como lo indican Kazanasmaz et al. (2016). El valor aceptado para dicho indicador es máximo 10% (U.S. Green Building Council-USGBC, 2013).

- **Factor de Luz Día, DF**, por sus siglas en inglés (Daylight Factor), es la relación en porcentaje $[(I_{int} / I_{ext}) \cdot 100]$ entre la iluminancia en un punto del espacio interior (I_{int}) y la iluminancia exterior (I_{ext}), en condiciones de cielo uniforme, nublado y sin obstrucciones, de acuerdo con la definición realizada por Moon y Spencer en 1942, citado por Reinhart et al. (2006). El porcentaje adecuado es del 2% para el tipo de trabajo de oficina y aulas, de acuerdo a lo indicado por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación (ICONTEC) (2006).

Caracterización del modelo base:

Tipo de cielo: intermedio entre soleado y nublado. El caso “base”, corresponde con un aula típica de 8 por 8 mts, con altura de 3 mts. Orienta su fachada expuesta en sentido sur, con ventana que corresponde a 1/6 del área de la planta de 5.33 de ancho, 1.07 de alto (22% de fachada); y ventana en fachada hacia el corredor con las mismas dimensiones (22% de fachada), (Figura 1). Al interior hay dos paredes de color claro (ubicadas en las paredes del pizarrón y su enfrentada), y dos de color gris concreto (en las paredes con las ventanas). Los coeficientes de reflexión de estas, como el del cielorraso y piso, se indican en la Tabla 1, de acuerdo a las características generales de las aulas del estudio.

Las ventanas se constituyen por un vidrio simple claro. El modelo base no cuenta con ningún elemento de protección en fachada que impida el ingreso de sol directo. El plano de trabajo se ubicó a 0.70 mts sobre nivel del suelo, acorde con la altura de los puestos de trabajo de los estudiantes, y una grilla de puntos distribuidos horizontalmente cada 50 cms.

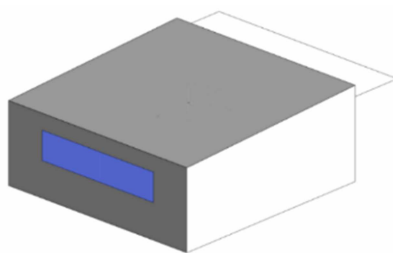


Figura 1: modelo base en entorno DIVA para RHINOCEROS 5

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA	REFLECTANCIA	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA	REFLECTANCIA
Cielo raso opaco	OutsideFacade	30	Piso opaco	GenericFloor	20
Pared blanca	Whiteinteriorwall	70	Puerta opaca	OutsideFacade	30
Pared opaca	OutsideFacade	30	Ventana	Glazing_SinglePane	88

Tabla 1: características de los materiales caso base *Los valores de reflectancia son tomados del software DIVA 4.1.0 para Rhinoceros 5

Parámetros de simulación

La simulación se basa en el archivo climático para la ciudad de Cali (con extensión epw), y se realizó exclusivamente para iluminación natural, con el fin de analizar el desempeño lumínico del aula durante la jornada escolar, con el aprovechamiento máximo de la luz solar, tal y como lo promueve la norma. Se desarrollaron en la herramienta DIVA 4.1.0 (Jakubiec y Reinhart, 2012) para Rhinoceros 5. La ocupación del espacio se tomó de 8 a.m. a 5 p.m., de lunes a viernes, de acuerdo al horario de uso de los salones para uso escolar.

Diseño del Caso base y alternativas aplicadas

Las alternativas de diseño exploradas aplicadas al caso “base”, se derivan de las recomendaciones de la norma NTC 4595 para la comodidad visual, organizadas en cinco grupos: El primer grupo (G1), está definido por los tamaños de ventanas, en relación con el área de la planta 1/5, 1/9 y 1/4. Esta última si bien no es parte de la Norma, se incluye por ser la relación predominante en las aulas de colegios construidos en la ciudad bajo la norma, estudiadas a profundidad en trabajos anteriores adelantados por Montoya y San Juan (2018) y por Zapata et al. (2018). (Tabla 2).

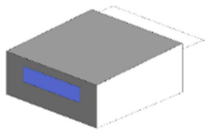
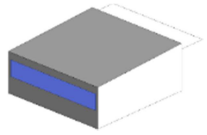
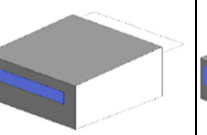
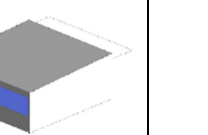
MODELO		GRUPO 1: DIMENSIONES DE ABERTURAS							
		1/6 CASO BASE-CB		1/5		1/9		1/4	
									
PRINCIPAL	Largo	5,00	22%	7,60	38%	6,00	31%	7,60	44%
	Alto	1,07		1,20		0,83		1,39	
GALERIA	Largo	5,00	22%	6,00	15%	5,00	9%	6,40	22%
	Alto	1.07		0.61		0.43		0.84	

Tabla 2: grupo 1 de alternativas de diseño. Fuente: elaboración propia

El segundo grupo (G2) contiene las alternativas con el cambio de color de las superficies internas, a blanco con reflectancia de 70% solo en cielorraso; blanco en todas las superficies; y blanco solo en piso, para verificar la incidencia del color recomendado por la Norma, ver Tabla 3.

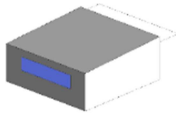
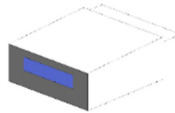
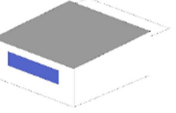
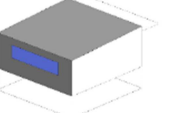
MODELO	GRUPO 2: COLOR MATERIALES INTERIORES			
	CASO BASE-CB	CIELO	PAREDES	PISO
				
PARED TABLERO Y OPUESTA	Blanco (70% reflectancia)	Blanco (70% reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)	Blanco (70% reflectancia)
PARED VENTANA Y GALERIA	Gris (30 % reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)
CIELORRASO		Blanco (70%)		Gris (30 % reflectancia)
PISO	Gris (30 % reflectancia)			

Tabla 3: grupo 2 de alternativas de diseño. Fuente: elaboración propia

El tercer grupo (G3) de alternativas se refieren a los elementos de protección solar en fachada y se aplican al caso 1/4 de ventana, ya que corresponde a un aumento del 60% con respecto al caso base (1/6), indicado por la Norma NTC 4595 para conservar el nivel lumínico adecuado (Tabla 4 y 5).

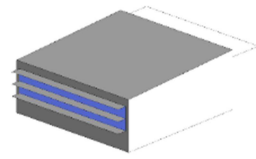
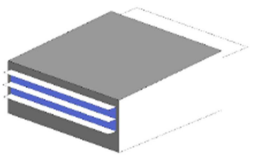
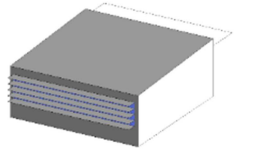
MODELO	GRUPO 3: ELEMENTOS DE PROTECCION SOLAR EN FACHADA		
	HORIZONTALES (HOR)	HORIZONTALES BLANCOS (HOR BLA)	+HORIZONTALES (+HOR)
			
Cantidad y Dimensión de elementos	3 elementos (7,60 X 0.60 c/u)	3 elementos (7,60 X 0.60 c/u)	5 elementos (7,60 X 0.60 c/u)

Tabla 4: grupo 3 de alternativas de diseño elementos horizontales. Fuente: elaboración propia

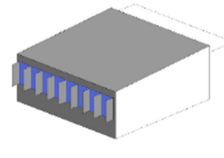
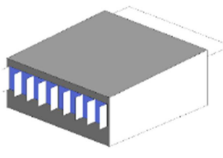
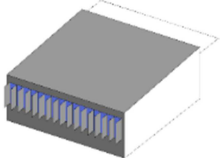
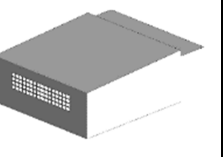
MODELO	VERTICALES (VER)	VERTICALES BLANCOS (VER BLA)	+ VERTICALES (+ VER)	CALADOS (CAL)
				
	Cantidad y Dimensión de elementos	9 elementos (1.39 X 0.60 c/u)	9 elementos (1.39 X 0.60 c/u)	16 elementos (1.39 X 0.60 c/u)

Tabla 5: grupo 3 de alternativas de diseño elementos verticales. Fuente: elaboración propia

Al cuarto grupo (G4) se le aplican diferentes orientaciones: hacia el sur este y sur oeste, con el objetivo de analizar una mayor exposición de la fachada principal, como se presenta en la Tabla 6.

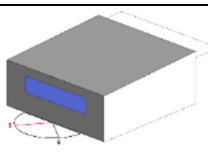
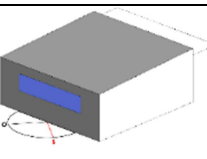
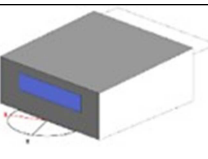
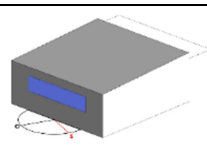
MODELO	GRUPO 4: ORIENTACION FACHADA PRINCIPAL			
	SURESTE 1 (SE1)	SUROESTE 1 (SO1)	SURESTE 2 (SE2)	SUROESTE 2 (SO2)
				
Angulo (%)	45%	45%	67.5 %	67.5 %

Tabla 6: Grupo 4 de alternativas de diseño. Fuente: elaboración propia

En el quinto grupo (G5), se exploran diferentes situaciones para las condiciones exteriores como patio descubierto mayor a 3 mts (recomendación de la norma), y dos alternativas no consideradas por la norma como son: el patio cubierto con material opaco y árbol, como elementos de obstrucción al exterior inmediato, con el fin de caracterizar algunas situaciones que se puedan presentar, así (Tabla 7):

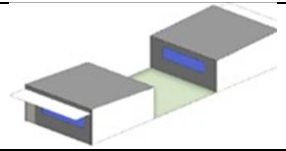
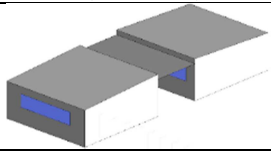
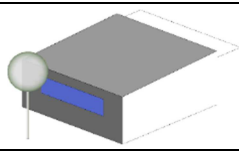
MODELO	GRUPO 5: CONDICIONES EXTERIORES		
	PATIOS	DISTANCIA ENTRE EDIFICIOS (EDIFICIO)	ARBOL
			
Especificaciones	Patio de 8 X 8 mts	Distancia entre edificios de 4 mts con una cubierta en cielo opaco (30% reflectancia)	Árbol de 6 mts alto, 3 mts Ø, y 3 mts distancia a fachada

Tabla 7: Obstrucciones exteriores. Fuente: elaboración propia

RESULTADOS Y ANALISIS

Para una mayor ilustración, se presentan a continuación los resultados descriptivos de las simulaciones en cada una de las métricas de análisis en las tablas 8 a la 10:








GRUPOS	GRUPO 1: DIMENSIONES ABERTURAS				GRUPO 2: COLOR MATERIALES		
	1/6 CB	1/4	1/5	1/9	CIELO	PAREDES	PISO
LEED SDA ₃₀₀ , 50%							
	44.6%	73.0%	60.6%	59.2%	25.6%	48.4%	44.6%
UDI _{300-3000 lux}	82.5%	81.2%	80.3%	64.8%	84.91%	86.32%	82.36%
DF	3.6%	6.1%	5.0%	2.8%	4.1%	3.8%	3.7%
LEED ASE	12.1%	14.5%	13.5%	12.8%	12.1%	12.1%	12.1%

Tabla 8: Resultados simulación visual, grupo 1 y 2. . Fuente: elaboración propia




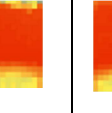
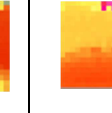
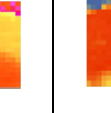
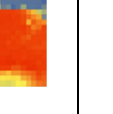
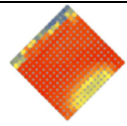
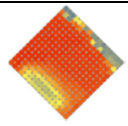
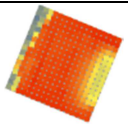
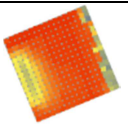
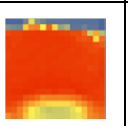
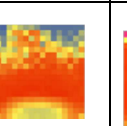
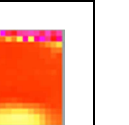
GRUPOS	GRUPO 3: ELEMENTOS DE PROTECCION SOLAR EN FACHADA						
	HOR	HOR BLA	+ HOR	VER	VER BL	+ VER	CAL
LEED SDA ₃₀₀ , 50%							
	96,20%	96,20%	89,60%	89,60%	89,60%	90,00%	35,60%
UDI _{300-3000 lux}	94,49%	93,52%	87,8%	85,79%	85,79%	87,40%	80,57%
DF	2,90%	3,30%	1,80%	4,60%	4,60%	3,90%	3,00%
LEED ASE	0,70%	0,70%	0,00%	12,10%	12,10%	12,10%	10,40%

Tabla 9: Resultados simulación visual grupo. Fuente: elaboración propia

GRUPOS	GRUPO 4: ORIENTACION FACHADA PRINCIPAL				GRUPO 5: OBSTRUCCIONES EXTERIORES		
	SE 1	SO1	SE 2	SO 2	PATIOS	EDIFICIO	ARBOL
LEED SDA ₃₀₀ , 50%							

	49,80%	28,40%	59,20%	65,10%	45,70%	39,40%	44,60%
UDI _{300-3000 lux}	82,19%	80,85%	80,95%	80,38%	80,58%	68,35%	82,52%
DF	3,70%	3,70%	3,70%	3,70%	3,60%	3,10%	3,60%
LEED ASE	24,90%	32,20%	56,10%	60,60%	12,10%	12,10%	12,10%

Tabla 10: Resultados simulación visual, grupos 4 y 5. Fuente: elaboración propia

Análisis

Se puede observar en la Figura 2, que en el grupo 1, las dimensiones de las ventanas en relación 1/6, 1/5 y 1/4, presentan un % de UDI₃₀₀₋₃₀₀₀ muy similar, mientras la relación 1/9 sugerida en la versión de la Norma del año 2015 (Específica en comodidad térmica), representa un desempeño menor del nivel recomendado, en detrimento de la calidad visual del espacio. El resto de las estrategias aplicadas presentan el rango de iluminancia por encima del 70% del tiempo al año (Mardaljevic y Nabil, 2005).

También se puede observar, en la misma figura 2, que las estrategias con mejor UDI₃₀₀₋₃₀₀₀ son aquellas que presentan elementos de protección solar en fachada, siendo las estrategias del grupo 3, las de mejor desempeño. En estas, las protecciones horizontales (3. HO y 3. HO BL) son las de mejor desempeño, con 94%, seguido de las protecciones verticales (3.VE y 3.VE BLA) con 85% de UDI₃₀₀₋₃₀₀₀. Por el contrario, la estrategia con menor UDI₃₀₀₋₃₀₀₀, además de la ventana en proporción 1/9 del grupo 1 explicada anteriormente, es la separación menor entre edificaciones (5. EDIFICIO) del grupo 5. Reafirmando la importancia de esta recomendación de la norma NTC 4595.

En cuanto a las rotaciones de orientación exponiendo la fachada hacia el este (4. SE1 y SE) y oeste (4. SE1 y 4.SE2), no representan un mejor UDI₃₀₀₋₃₀₀₀, por el contrario, presentan un comportamiento similar al caso “base” (1.1/6 CB) orientado hacia el sur, lo cual reafirma la necesidad de una orientación norte-sur, adecuada en la latitud del estudio, para alcanzar los niveles lumínicos adecuados y generar espacios cómodos visualmente (Díaz et al., 2013).

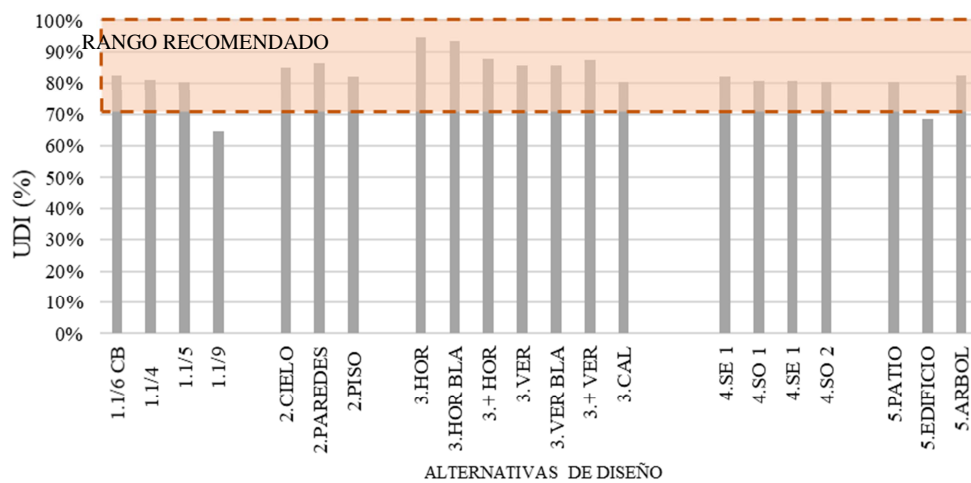


Figura 2: Comparación del Rango útil de iluminancia UDI₃₀₀₋₃₀₀₀ entre las estrategias de diseño

Rango útil de iluminancia (UDI₃₀₀₋₃₀₀₀) y + autonomía espacial de luz diurna (sDA_{300, 50%})

Al comparar las estrategias a partir de la combinación de UDI₃₀₀₋₃₀₀₀ y sDA_{300, 50%} vemos en la Figura 3, que las estrategias con mejor desempeño son las que presentan elementos de protección solar horizontales y verticales (2.HO, 2.VE BL, 2. + VE), resaltadas en el gráfico; y las de más bajo desempeño, son: la relación 1/9 de abertura en relación con la fachada y la distancia entre edificaciones cubierta; las dos reducen los porcentajes en las dos métricas. El resto de las estrategias, cumplen en el 70% recomendado para el UDI₃₀₀₋₃₀₀₀ (Mardaljevic y Nabil 2005); sin embargo, no alcanzan el 75% mínimo recomendado por el sDA (Heschong et al., 2012).

Lo anterior muestra, que estrategias como: la fachada con calados (2.CA), cielo blanco (2.CI) y la fachada orientada al suroeste (4.SO) a pesar de presentar un UDI₃₀₀₋₃₀₀₀ adecuado, no logran el sDA_{300, 50%}, o el mínimo porcentaje del espacio con iluminancia superior a 300 lux el 50% de tiempo al año.

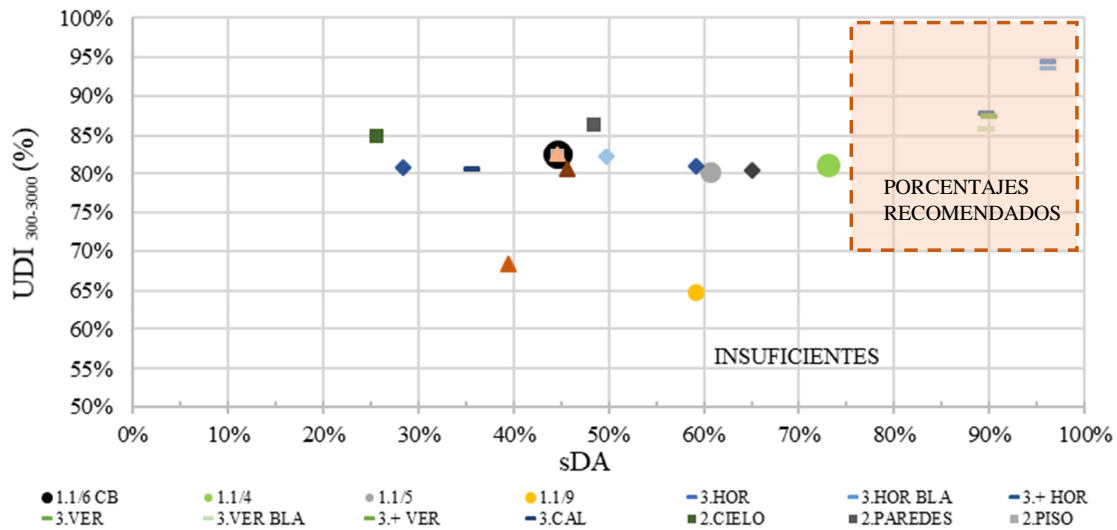


Figura 3: Comparación porcentaje (%) UDI y sDA entre las estrategias de diseño

Exposición solar anual (ASE) y factor de luz diurna (DF)

Al cruzar la información anterior con la métrica ASE, se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que la mayoría de las estrategias sobrepasan el porcentaje mínimo de 10% recomendado (U.S. Green Building Council-USGBC, 2013). Las estrategias que logran el valor, son las estrategias con elementos de protección horizontal en concreto (2. HO), más elementos de protección solar (2. +HO) y color claro (2. HO BL), demostrando la efectividad de estas protecciones frente a los ángulos de inclinación y azimut solar en esta orientación y en la latitud tropical del caso de estudio. Por el contrario, todas las estrategias con rotación de orientación del caso “base” hacia el este y el oeste, generan ingreso de luz directa al espacio por encima del 25%, demostrando lo inadecuado de ésta sobre exposición en el caso de estudio. En cuanto al DF, la mayoría de las estrategias cumplen con valores superiores al 2%, con excepción de la mayor cantidad de elementos horizontales (2+HO). (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

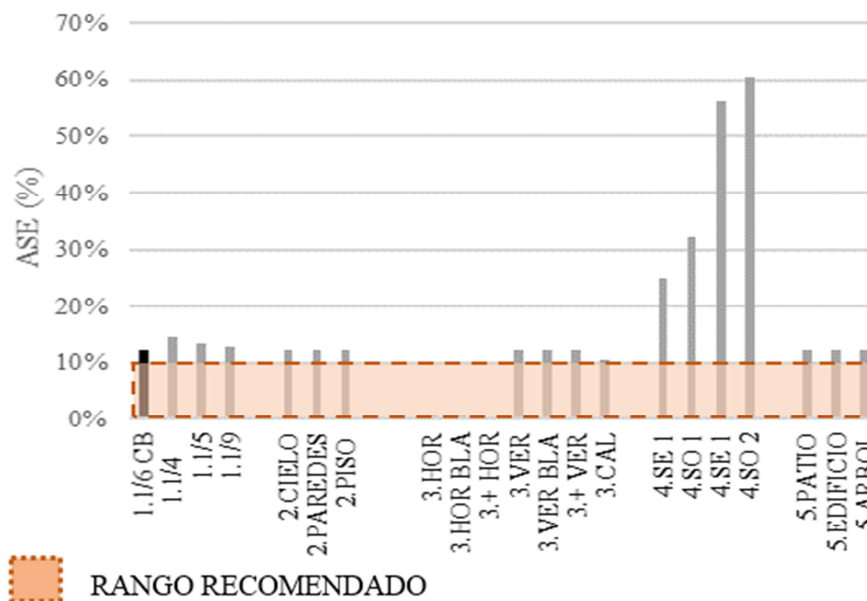


Figura 4: Comparación ASE estrategias de diseño

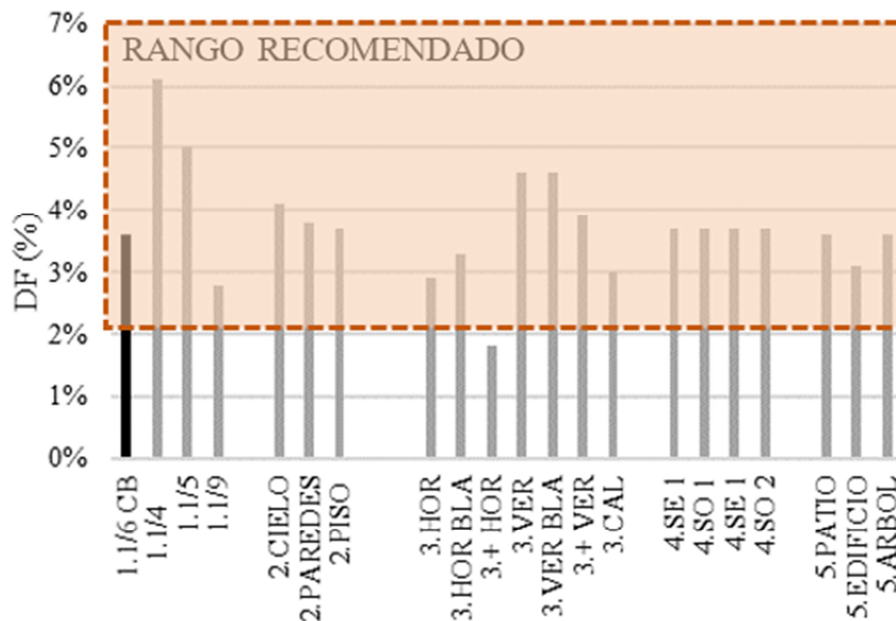


Figura 5: Comparación DF estrategias de diseño

También se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que el DF aumenta proporcionalmente con el área de la fachada, presentando los menores valores no solo en la menor área de ventana (1.1/9), sino en las estrategias que presentan protección horizontal (2.HO, 2.HO BL y +HO), mostrando en este caso mejor desempeño las protecciones verticales y las rotaciones.

CONCLUSIONES

El análisis del confort visual de aulas, a partir de la implementación de métricas dinámicas como UDI₃₀₀₋₃₀₀₀, el sDA_{300, 50%} ASE y DF, muestran la importancia del uso complementario de las anteriores, con el fin de lograr una mejor caracterización del espacio. A partir de este análisis combinado, se pueden determinar las mejores estrategias de diseño.

La mayor cantidad de estrategias recomendadas por la norma NTC 4595, presentaron un desempeño adecuada bajo la métrica UDI₃₀₀₋₃₀₀₀. Sin embargo, el análisis posterior bajo el sDA_{300, 50%} evidenció, que, si bien en el aula se presentan los niveles de iluminancia en el rango útil, estos no se presentan en la mayoría del aula, el 50% del año. Lo anterior indica, que las áreas con los rangos adecuados, seguro se concentran en las zonas cercanas a las ventanas, mientras los puestos alejados de esta zona, no tendrán los niveles recomendados, con el agotamiento visual a largo plazo que esto implica.

Las estrategias dentro de los porcentajes recomendados de UDI₃₀₀₋₃₀₀₀ y el porcentaje del área con iluminancia superior a 300 lux la mitad del tiempo sDA_{300, 50%}, y el control en los valores en el ingreso solar directo al espacio (ASE), resultaron los **Elementos de protección horizontal en fachada**, los cuales gracias al análisis posterior del factor de luz diurna (DF), deben tener acabado de color blanco. Se evidencia la necesidad de plantear de manera permanente elementos de protección solar (de preferencia horizontal) en la latitud de los casos de estudio, en las orientaciones norte y sur.

Las estrategias analizadas, demuestran la necesidad de actualizar la norma colombiana NTC 4595 con criterios dinámicos del carácter de la luz en el espacio, a través de cumplimientos anuales, y no con valores estáticos, limitados en su caracterización espacial. Así mismo, se demostró a lo largo del trabajo, la necesidad de mayor definición en los elementos de protección en fachada, los cuales presentan comportamiento diferenciados, finalmente se sustenta el que las estrategias propuestas por la norma NTC 4595 como: colores al interior, dimensiones de aberturas, rotaciones, no son efectivas de manera aislada, y que obliga a un abordaje integral y complejo para la comodidad visual en los espacios educativos.

REFERENCIAS

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación (ICONTEC) (2006). Norma Técnica Colombiana NTC 4595 Ingeniería Civil y Arquitectura Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares. Bogotá.
- Arango L. (2011). Ensaio do método para análise integrada da iluminação natural e da conveniência solar. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Zapata C. M., Viegas, G. M., San Juan, G. A., Ramos, H., Coronado, J. A., Ochoa, J., ... Montoya, O. L. (2018). Comodidad ambiental en aulas escolares. Incidencia en la salud docente y en el rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali (1st ed.). Editorial Bonaventuriana; Ediciones Unisalle; Universidad Nacional de la Plata.
- Arango L., Vásquez, N., Cano L., Cuervo, A. (2013). Revisión de las recomendaciones de la NTC 4595 con relación a las aberturas de los salones de clase. *DEARQ: Revista de Arquitectura de La Universidad de Los Andes*, (13), 214–229.
- Elghazi Y., Wagdy A., Mohamed S., y Hassan A. (2014). Daylighting driven design : optimizing kaleidocycle facade for hot arid climate. *Aachen: Fifth German-Austrian IBPSA Conference, RWTH Aachen University*, 314–321.
- Heschong L., Wymelenberg V., Den Andersen M., Digert N., Fernandes, L., Keller, A., Mosher, B. (2012). Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). IES-Illuminating Engineering Society.
- Kazanasmaz T., Grobe L., Bauer C., Krehel M., y Wittkopf, S. (2016). Three approaches to optimize optical properties and size of a South-facing window for spatial Daylight Autonomy. *Building and Environment*, 102, 243–256.
- Lamberts R., Dutra L., y Pereira F. (2012). Eficiência Energética na Arquitetura (3rd ed.). Florianópolis.
- Mardaljevic J., y Nabil A. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in Buildings. *Lighting Research and Technology*, 37 (1), 41–59.
- Monteoliva J. M., Aceña A., Villalba A. M., Pattini A. E. (2016). Modelo simplificado para el cálculo de iluminancia por luz natural (UDI) en espacios individuales perimetrales de cielos claros: Caso de estudio: Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 6(1), 50–59.
- Monteoliva J. M., y Pattini A. (2013). Iluminación natural en aulas: análisis predictivo dinámico del rendimiento lumínico-energético en clima soleados. *Ambiente Construido*, 13(4), 235–248.
- Montoya, O. L., San Juan, G. A. (2018). Calidad ambiental de las aulas de colegios en el trópico: Evaluación subjetiva y objetiva del confort térmico, Visual y sonoro. In ASADES (Ed.), *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 6 (pp. 133–144).
- Nabil A., Mardaljevic J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7), 905–913.
- Pattini A. (2009). Elementos De Control De Luz Solar Directa En Fachadas Vidriadas De Edificios No Residenciales De Ciudad Oasis. *Rediseño Para Aulas*. 179–186.
- Reinhart C. F., Mardaljevic J., y Rogers Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 3(1).
- U.S. Green Building Council-USGBC. (2013). LEED Reference Guide for Building Design and Construction. Washington DC.
- Wu, W., y Ng, E. (2003). A review of the development of daylighting in schools. *Lighting research y technology*, 35(2), 111-124.
- Yamin J. A., Colombo E. M., Rodríguez R. G., y Pattini A. E. (2014). Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable Evaluación de confort visual en escenas con iluminación natural directa, 54 (261), 189–199.
- Zapata C. M., Viegas G. M., San Juan G. A., Ramos H., Coronado J. A., Echeverría N., Ochoa, J., Tilano L., Rendón L., Tafur L., Montoya, O. L. (2018). Identificación de factores de desempeño ambiental (acústico, térmico y visual) determinantes de la salud mental de docentes de escuelas públicas de Bogotá, Medellín y Cali. In *Alapsa. VIII Congreso Latinoamericano de Psicología de La Salud* (p. 2018). La Habana.

EVALUATION OF DESIGN PROPOSALS FOR THE OPTIMIZATION OF LIGHTING PERFORMANCE IN TROPICAL CLASSROOMS, BASED ON DYNAMIC METRICS

ABSTRACT

The paper presents the analysis of design strategies to achieve visual comfort in classrooms, proposed by the Colombian standard NTC 4595. The methodology is based on experimental design, based on a virtual model, located in Cali, Colombia, to which design variations proposed by the standard are applied, and others, the result of the study, which are analyzed based on the dynamic metrics for annual simulation: UDI, sDA and ASE. The results show the need to consider the immediate exterior conditions, to propose sun protection elements on facades exposed to the north and south, to avoid direct exposure of the facade to the east-west, and clear materials inside. These results are intended to provide to the guidelines of the local norm, which, despite the efforts, are of low effectiveness when providing classrooms with the maximum use of natural lighting to meet the lighting requirements indicated in the standard.

Key words: School classrooms, Lighting performance, tropical climate, dynamic metrics simulation.