

CONFORT TÉRMICO EN AULAS ESCOLARES DEL TRÓPICO, A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOCLIMÁTICAS PASIVAS

Montoya Olga ⁽¹⁾, Viegas Graciela ⁽²⁾

⁽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: gachiviegas@yahoo.com.ar

Recibido 15/08/19, aceptado 23/10/19

RESUMEN: El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el confort térmico alcanzado en un aula típica de escuela localizada en Cali, Colombia, a partir de la aplicación de estrategias bioclimáticas pasivas. La escuela fue construida siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595. Se pretende determinar su pertinencia como documento normativo que regula el diseño y la construcción de los establecimientos educativos del país. La metodología desarrolla: i. modelos de simulación térmica del aula prototípica en EnergyPlus 8.7, tanto en el estado de base como luego de la aplicación de 15 estrategias de diseño; y, ii. La evaluación del confort térmico alcanzado a partir de aplicar dichas estrategias bajo el modelo de confort adaptativo (ASHRAE55). Se pudo concluir que todas las estrategias resultaron dentro del rango de confort, sin embargo, se identifican algunas estrategias que se podrían incluir y otras modificar, con el fin de conseguir un mejor desempeño térmico.

Palabras clave: confort térmico adaptativo, aulas escolares, clima tropical, estrategias de diseño, simulación térmica.

INTRODUCCION

La educación se ha convertido en factor clave para el desarrollo de los países y es cada vez más imperiosa la necesidad de transformar no sólo la estructura curricular sino las formas organizacionales, de planificación y gestión de todas las actividades. Asimismo la brecha entre la oferta y la demanda respecto a edificios escolares es grande y no puede ser solucionada sólo por el aumento cuantitativo. Una de las soluciones es el mejoramiento cualitativo del parque existente, según los recursos técnicos, económicos y sociales, con los que se cuenta (San Juan, 2009).

Se asume que la arquitectura escolar debe responder a dos aspectos fundamentales para lograr un ambiente saludable: lograr buenas condiciones de confort y obtener un nivel de eficiencia energética óptimo (tendiente al mínimo consumo, con el máximo de calidad). Respecto a las condiciones de confort, deben ser coherentes con la actividad realizada, proporcionando un bienestar deseable. Si nos remitimos al ambiente escolar, se considera que la mejor condición del ambiente, redundando en una mejor relación enseñanza-aprendizaje, en la disminución de problemas fisiológicos y en el aumento de la productividad escolar (Niclas y Bailey, 1996). Respecto a la eficiencia energética en edificios escolares (relacionada al uso de los recursos escasos, principalmente los energéticos no renovables), se entiende que los distintos espacios componentes de una escuela (salón de usos múltiples, circulaciones, aulas, administración, etc.) son demandantes de una cierta calidad ambiental, lo que implica demandas energéticas distintas y acciones proyectuales diferentes o similares. Pero la demanda de calidad y energía en el “sector aulas” es la principal (puede llegar al 60% o más del total del edificio). Es por ello que se considera el ámbito de mayor diseño. En este sentido, los países cuentan con normativas y directrices que generan recomendaciones de diseño y parámetros mínimos y máximos a cumplir para alcanzar ciertos niveles de confort y comodidad en los edificios escolares. Si

¹ Investigador FAAD-USB.

² Investigador Independiente CONICET-UNLP.

nos remitimos al caso del diseño de edificios escolares en Colombia, la norma NTC 4595: *Ingeniería Civil y Arquitectura. Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares*, la misma establece las condiciones de comodidad térmica, visual y auditiva de los espacios destinados a la educación. En este marco, en relación a la comodidad térmica, la normativa se enfoca en la morfología y la constitución de los edificios, apuntando a que no se utilicen equipos mecánicos especializados para lograr que la mayoría de las personas no consideren el clima como factor perturbador del desarrollo de sus actividades (NTC, 2006). Esta norma establece ciertos parámetros de interés, diferenciados por tipo de climas: básicos: moderado, frío y templado, cálido seco y cálido húmedo; algunos de ellos generales, principalmente en cuanto a la ventilación y protección solar. Por un lado establece que el área efectiva de aberturas óptima para ventilar debe ser entre 1/6 y 1/9 del área de la planta del espacio a ventilar, para las aulas de los climas cálido húmedo y seco respectivamente. Por otro lado propone una clasificación climática bastante confusa, la cual fue tratada en profundidad en trabajo anterior (Zapata et al., 2018).

Para el clima de Cali, el cálido húmedo, la norma ofrece indicaciones de orientación de las aberturas para que el viento incida con ángulos entre 30° y 90° para su aprovechamiento, y en caso contrario, recomienda la instalación de elementos como aletas que ayuden a direccionarlo. Se promueve la ventilación natural de manera constante y homogénea a través de ventanas, celosías puertas abiertas entre otros; preferiblemente tomada de espacios exteriores o patios. En cuanto a la protección de la radiación solar, se recomienda orientar la mayor cantidad de aberturas y superficies de manera perpendicular al eje norte-sur. Además de contar con aleros y otros elementos que prevengan el ingreso directo de los rayos solares. Por otro lado, se recomiendan materiales que presenten un porcentaje de factor de ganancia de calor solar (o ganancia solar incidente), siendo de 7.5% para las superficies hacia el norte y sur; de 5% las superficies con orientaciones diferentes; y de 4% para la cubierta. En esta última se recomienda la aparición de cielorraso con cámara de aire. Más allá de los criterios sobre ventilación y protección de la radiación solar planteados, no especifica rangos de confort o metodología para su análisis, tema de interés en el diseño de espacios educativos.

La palabra Confort, se refiere a un estado ideal del hombre que supone una situación de bienestar y salud, en un ambiente donde no exista molestia ni distracción que lo afecte física o mentalmente. Esta sensación compleja, depende por un lado de la sensibilidad de cada persona, así como de la actividad que desarrolla a partir de factores físicos, fisiológicos, sociológicos y psicológicos, en donde el cuerpo humano se siente cómodo y en equilibrio con su entorno. La organización Mundial de la Salud (OMS, 1964), lo define como “un estado de completo bienestar físico, mental y social”. El confort térmico en escuelas se comenzó a investigar en países con estaciones climáticas diferenciadas, en donde las condiciones de confort se dan, la mayor parte del año, gracias a sistemas mecánicos de climatización. Esta situación es diferente a los entornos ventilados naturalmente. Varias investigaciones se han dado a la tarea de comparar la sensación térmica de las personas en aulas con aire acondicionado y ventiladas naturalmente (Kwok, 1997; Tablada et al., 2005), demostrando que hay mayor exigencia térmica (menores temperaturas), en las personas habituadas a espacios con aire acondicionado, frente a las que habitan espacios sin climatización artificial.

En este sentido la *Norma Técnica Colombiana 5316: Condiciones Ambientales Térmicas de Inmuebles para Personas* (ICONTEC, 2004), idéntica traducción (IDT) de la norma ASHRAE 55 (Standard, 2017), reglamenta las condiciones de confort en edificaciones. Define para Colombia un rango de confort para verano de $22.5\text{ °C} < \text{Temperatura Operativa } (T_o) < 26\text{ °C}$, 60 % HR, y unidad de tasa metabólica (met) ≤ 1.2 , donde se acepta como máximo el 10 % de la población insatisfecha. Por su parte, el standard ASHRAE 55 retoma la escala de sensación térmica y establece dos métodos para determinar el confort térmico de los edificios.

Se considera entonces, muy importante generar auditorías ambientales y simulaciones térmicas para identificar los niveles reales de los parámetros involucrados, en función de lo establecido por las normativas nacionales e internacionales vigentes, y de esta manera arribar a conclusiones y recomendaciones que colaboren en el diseño de edificios escolares nuevos o existentes (Retrofit). En particular las simulaciones térmicas son una herramienta que permite conocer la situación de base de las condiciones de confort, y realizar modificaciones para mejorar dichas condiciones. La etapa de simulación, implica realizar modelos edilicios teóricos a partir de un programa de simulación térmica denominado EnergyPlus⁽³⁾. La utilidad del modelo radica en que se pueden evaluar diferentes

³http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm_source=EnergyPlus&utm_medium=redirect&utm_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1

alternativas de mejoramiento si correspondiera. Una vez desarrolladas las simulaciones es posible evaluar el comportamiento de cada edificio ante la modificación de variables como la orientación, las características constructivas, el control de la ganancia solar, y la aplicación de medidas de acondicionamiento de la envolvente y mejoramiento de la ventilación, entre otros.

Si bien en Colombia, existen antecedentes de trabajo sobre el confort térmico en aulas (Zapata et al., 2018; Montoya y San Juan, 2018), no se observan suficientes estudios sobre la temática mencionada. En este marco, el objetivo de presente trabajo es evaluar el confort térmico de un aula prototípica de una escuela de Cali, Colombia, a partir de la aplicación de las estrategias de diseño que propone la norma colombiana NTC4595 en un modelo de simulación térmica transitoria de la misma.

METODOLOGÍA

El presente análisis se realizó sobre una escuela localizada en la ciudad de Cali, representativa del universo de análisis. En Cali la temperatura promedio ronda los 24°C, con variaciones durante el día y la noche entre 17 y 34°C. El clima cuenta con dos estaciones al año: una estación seca en los meses de diciembre a febrero y en julio y agosto; el tiempo de lluvias se desarrolla durante los meses de marzo a mayo y entre septiembre y noviembre. La humedad relativa del aire es menor del 70% durante los meses secos y en los meses de más lluvia puede alcanzar un máximo de 76%. Durante un año, la época más ventilada puede durar 4 meses y se da entre los meses de octubre y febrero con velocidades promedio del viento de más de 5,2 kilómetros por hora. La dirección predominante promedio también varía durante el año, sin embargo, los vientos del norte y el noreste se repiten durante todo el año.

Desde el punto de vista de la infraestructura, se trabajó con una escuela de gestión oficial que hubiera sido construida después del año 2000, garantizando así que siguiera los parámetros arquitectónicos y de uso de la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595 previamente mencionada, que entró en rigor en el año 1999. Cabe aclarar que este trabajo es parte de una investigación que se fundamenta en la observación y evaluación ambiental de aulas que han sido construidas siguiendo los parámetros establecidos en dicho documento, con el objetivo de definir, entre otras cosas, su pertinencia como documento normativo que regula el diseño y la construcción de los establecimientos educativos del país.

En la escuela analizada se eligió un aula con condiciones y acomodación típica, basándonos en la premisa de que en Colombia aún se aplica un modelo educativo con pedagogías tradicionales de tipo magistral. El aula es utilizada por niños entre 5to y 6to grado en cualquier horario y está ubicada en un piso superior, con cubierta expuesta a la radiación solar.

Como antecedente al presente trabajo, se realizaron auditorias térmico energéticas sobre la escuela caso de estudio y se observó que las mediciones realizadas por más de un mes dieron como resultado temperaturas promedio al interior de las aulas entre 19°C y 31°C en el mes de agosto. En el caso de la humedad relativa, presentó valores que superaron el 80%. Las temperaturas interiores en las aulas aumentaban a partir de las 7:00 aproximadamente, y alcanzaban su mayor valor entre las 13:00 y las 16:00 hs.

Para el desarrollo del trabajo se realizó el modelo de simulación en base a un conocimiento previo y real de la escuela, para evaluar en una situación denominada caso base. El ajuste del modelo se logra gracias a la ventilación natural; la correlación entre el modelo simulado y el aula medida in situ se presenta en la primera parte de los resultados. En una etapa posterior se propusieron medidas de mejoramiento las cuales fueron evaluadas bajo el modelo de confort adaptativo estipulado en el estándar ASHRAE55.

El modelo adaptativo, se basa en la temperatura promedio exterior, y se aplica exclusivamente para espacios ventilados naturalmente. Las ecuaciones para determinar el límite superior (1) y el inferior (2), en el que el 80% de los ocupantes estarán en To de confort bajo el modelo adaptativo, se presentan a continuación (ANSI/ASHRAE Standard 55-, 2017):

$$1) \text{ Aceptabilidad superior al } 80\% = 0.31 * \overline{T_{pma(out)}} + 21.3$$

$$2) \text{ Aceptabilidad inferior al } 80\% = 0.31 * \overline{T_{pma(out)}} + 14.3$$

Dónde: $\overline{T_{pma(out)}}$ = Temperatura promedio mensual exterior

La misma versión del ASHRAE propone como definición para la temperatura operativa- T_o , como el promedio de las temperaturas medias radiantes y la temperatura interior, ponderadas por el coeficiente de transferencia de calor. Y para su identificación, la siguiente ecuación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

$$1) \quad T_o = A * T_a + (1 + A)T_{mr}$$

Dónde: T_o = Temperatura operativa;

T_a = Temperatura del aire/

T_{mr} = Temperatura media radiante

A (valor en función de la velocidad del aire) = 0.5 (si <0.2m/s); = 0.6 (0.2 a 0.6 m/s); = 0.7 (0.6 a 1.0 m/s).

En la documentación del software EnergyPlus se explica en detalle las formulas seguidas para identificar la tanto la T_o como la T_{mr} basadas en la norma ASHRAE (Big Ladder Software LLC, n.d., 2019). Una vez descritos los tipos de modelos de confort, se desarrolla la estructura del trabajo. El análisis de resultados se organiza en tres instancias: i. Análisis de las temperaturas promedio en la situación de base y bajo la aplicación de estrategias de mejoramiento; ii. Análisis de confort bajo el modelo adaptativo. A continuación, se describe el diseño del modelo de simulación térmica del edificio, focalizado en el aula prototípica estudiada, y luego se describen las estrategias de diseño para el mejoramiento de aulas.

Diseño del modelo de simulación

Se trata de un modelo de simulación que representa una escuela construida en tres niveles, que sintetiza las condiciones generales del universo de análisis (Figuras 1, 2 y 3). De este modelo se toma un aula sobre la cual se aplican las estrategias de diseño que propone la norma, con el fin de validarlas, y por otro lado otras mejoras que permitan alcanzar el confort al interior del aula. Se establece un aula del piso superior, como la representativa, ya que guarda similitud con la situación térmica de la planta baja, siendo más crítica por no estar en contacto con el terreno y por tener cubierta expuesta al cenit.

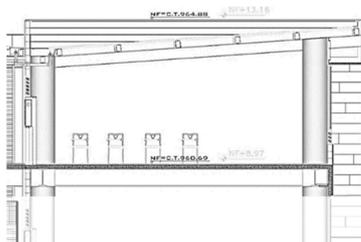


Figura 1: Corte aula. Fuente: Secretaría de Educación Municipal



Figura 2: Interior aula



Figura 3: Exterior aula

Fuente: archivo de la investigación.

Se trata de un aula típica de 8 x 8 m de desarrollo en planta, con una altura interior del espacio de 3 m. Su fachada está orientada y expuesta en sentido sur, con una ventana cuya superficie es 1/6 del área de la planta, y sus medidas son 5.33m de ancho por 1.07m de alto (24% de fachada expuesta); y posee una ventana en la fachada interior hacia el corredor con las mismas dimensiones (24% de fachada), como se muestra en la.Figura 4

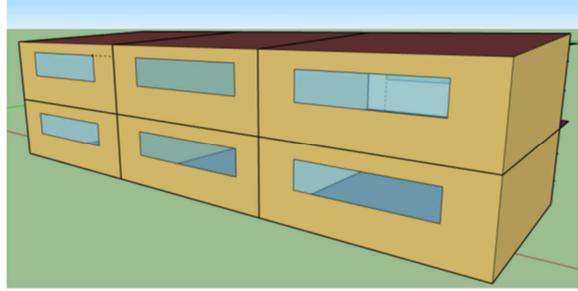


Figura 4: Modelo de aula típica en entorno EnergyPlus

La simulación se realiza en el programa EnergyPlus versión 8.7. Los datos de localización utilizados son: latitud 3.55 norte, longitud 76.38 oeste. El huso Horario es -0.5, y la altitud de 969 msnm. Con respecto a los parámetros de la simulación desarrollada, los mismos pueden observarse en la Tabla 1.

DESCRIPCION	VALORES	EXPLICACION
Tipo de edificio	Aula Piso superior	Se realizan las simulaciones para el aula tipo en la condición más desfavorable
Dimensiones (m3)	8 x 8 x 3 (192m3)	El aula tipo tiene cubierta al exterior, y ventanas en las fachadas opuestas.
Conductividad cerramientos exteriores (W/m.K)	1.11	Los cerramientos exteriores son de bloque de concreto de 20 cms de espesor
Espesor (m)	0.2032	Bloque de concreto con cámara de aire interior
Porcentaje de vidrio en fachada principal (%)	24	Ambas fachadas tienen aberturas hacia el exterior o la galería
Porcentaje de vidrio en fachada galería (%)	24	
Conductividad del panel de vidrio fachada(W/m.K)	0.9	Vidrio doble
Espesor (m)	0.003	
Transmitancia solar	0.837	
Transmitancia luminica	0.89	
Transmitancia (U) de elementos de cubierta (W/m²C):	1.19	Espesor (m) (Metal=0.0008; aislamiento=0.025; metal=0.0008). Conductividad (λ) (metal=45.2; aislamiento=0.3; metal=45.2)
DESCRIPCION	VALORES	EXPLICACION
Transmitancia (U) de elementos de entrepiso (W/m²C):	2.03	Espesor (m) (Losa concreto=:0,10; lamina panel yeso=0,019). Conductividad (λ) (Losa concreto=0,53; lamina panel yeso=0,16). Resistencia (R) cámara de aire= 0,18.
Conductividad de muros interiores (W/m.C)	0.53	Concreto: espesor (m)=0.10; conductividad (λ)=0.53
Conductividad carpinterías semi-interiores (W(m.C)	45.2	Metal: espesor (m)=0.0008; conductividad (λ)=45.2
Ganancias internas por usuarios (W/m²)	2.15	Usuarios del aula en condiciones de actividad con poco movimiento
Ratio de ocupación	Laborables	7:00 a 08.00; 0.1, a 12:00; 0.2, a 23.00; 0.7, a 24.00; 1
	Festivos y fines de	00.000 a 24.00; 1
Ventilación natural (RXH)	12 RXH	12 Renovaciones Por Hora (RXH) en horario de uso, y 20% permanente ejemplificando la ventilación constante por persianas.
Nivel de actividad (met)	Según estándar	Nivel de actividad en reposo
Aislamiento por vestimenta (clo)	Según estándar	Liviana para la condición de verano

Tabla 1: Parámetros utilizados en la simulación térmica del edificio

Una vez desarrollado el modelo y evaluada su situación de base, se plantean las estrategias de diseño en función de las recomendaciones de normas, y otras que permiten el complemento de las anteriores.

Estrategias de diseño para el mejoramiento de aulas basadas en la norma NTC 4595

Las alternativas de diseño aplicadas al caso base se muestran en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a la 4, resaltando en fondo gris las características que cambian en cada variación. Estas se basan en las recomendaciones de la norma y se organizan por grupos. El grupo 1 corresponde a diferentes áreas de ventanas en relación con el área de la planta: 1/5 y 1/9, propuestas por la norma en su versión primera y segunda versión respectivamente. En el grupo 2, están las protecciones solares horizontales y verticales, aplicadas al caso base, si bien la norma no especifica el tipo y número de protecciones, se analizan estas dos como alternativas básicas (Tabla 2).

COMPONENTES	CASO BASE	GRUPO 1		GRUPO 2	
Denominación de la medida	1. VENTANA 1/6 CASO BASE (VE 1/6 CB)	1. VENTANA (VE 1/5)	1. VENTANA (VE 1/9)	2. PROTECCION HORIZONTAL (HO)	2. PROTECCION VERTICAL (VE)
Orientación fachada principal	Sur	Sur			
Cubierta exterior	Superficie metálica +25mm aislamiento +superficie metálica	Superficie Metálica+25mm aislamiento + superficie metálica			
Losa entrepiso	100 mm concreto ligero	100mm concreto ligero			
Muros	200 mm bloque concreto	200mm bloque concreto			
Ventanas (proporción en relación con respecto al área del salón)	10.6 m ² (relación de 1/6)	12.8 m ² (relación 1/5)	7 m ² (relación 1/5)	10.6 m ² (relación de 1/6)	

Tabla 2: Grupo 1 y 2, alternativas basadas en áreas de ventanas y elementos de protección solar.

En grupo 3 presentado en la tabla 3, están las variantes en los materiales que constituyen la envolvente del aula: i. por un lado para los muros con las alternativas de la norma: bloque de concreto (en el caso base) y ladrillo, como también se compara en este trabajo el desempeño del panel yeso + cámara de aire + panel; ii. Por el otro la cubierta, constituida por una teja metálica tipo sándwich con poliuretano en el centro; y una losa de hormigón (la cual no es considerada por la norma como adecuada para el clima de Cali por tener un factor de ganancia solar de 9.1%); ambas situaciones si simulan con cielo raso con cámara de aire y sin cielo raso (en el caso base).

COMPONENTES	GRUPO 3				
Denominación de la medida	3. MURO LADRILLO (MU LA)	3. MURO PANEL YESO+AIRE+ PANEL (MU (PA+A+PA))	3. CUBIERTA CONCRETO SIN CIELO RASO (CU CON SIN)	3. CUBIERTA CO CON CIELO RASO (CU CON CON)	3. CUBIERTA (ME+AISL+ME) CON CIELO RASO (CU (ME+AIS+ME) CON)
Orientación fachada principal	Sur				
Cubierta exterior	Superficie Metálica+25mm aislamiento + superficie metálica		Losa en concreto sin cielorraso	Losa en concreto con cámara de aire y 19mm panel yeso	(Superficie Metálica+25mm aislamiento + superficie metálica) con cámara de aire y 19mm panel yeso
Losa entrepiso	100mm concreto ligero				
Muros	Muro ladrillo cerámico de 100mm de espesor	19mm panel yeso + cámara de aire+ 19 mm lamina panel yeso	200mm bloque concreto		
Ventanas	10.6 m ² (relación de 1/6 respecto al área del salón)				

Tabla 3: Variantes en los materiales que constituyen la envolvente del aula

En el cuarto y último grupo están las alternativas de orientación de la fachada principal del aula respecto al caso base. La norma recomienda orientación de las fachadas hacia el norte y sur, sin embargo, admite una variación hasta de 10°. Con el fin de validar dichas recomendaciones, se verifica el comportamiento de la exposición de la fachada con ángulos mayores como 20°, 45° y hasta 90°, los cuales no serían adecuados para la norma (tabla 4).

COMPONENTES	GRUPO 4					
Denominación de la medida	4. ROTACION 10° OESTE (10° O)	4. ROTACION 10° ESTE (10° E)	4. ROTACION 20° OESTE (20° O)	4. ROTACION 20° ESTE (20° E)	4. ROTACION 45° OESTE (45° O)	4. ROTACION 90° OESTE (90° O)
Orientación fachada principal	10° al Oeste	10° al Este	20° al oeste	20° al este	45° al oeste	90° al oeste
Cubierta exterior	Superficie Metalica+25mm aislamiento + superficie metálica					
Losa entepiso	100mm concreto ligero					
Muros	200mm bloque concreto					
Ventanas	10.6 m ² (relación de 1/6 respecto al área del salón)					

Tabla 4: Alternativas de orientación del aula

RESULTADOS

La temperatura exterior promedio anual simulada fue de 23.2°C. Las temperaturas máximas promedio alcanzan los 29.2°C en los meses de Julio y agosto, y las mínimas promedio bajan hasta 18.3°C en enero. En cuanto a la temperatura interior, el modelo simulado y la situación medida presentan una correlación alta ($R^2 = 0.75$) como se presenta en la Figura 5. El modelo se ajusta principalmente a partir de la ventilación natural, hasta 12 renovaciones por hora (RPH), en coherencia con la relevancia dada a la ventilación natural en los diseños de las aulas en una ciudad del trópico como Cali. La temperatura promedio tanto del modelo medido, como al interior del aula en agosto es de 27°C.

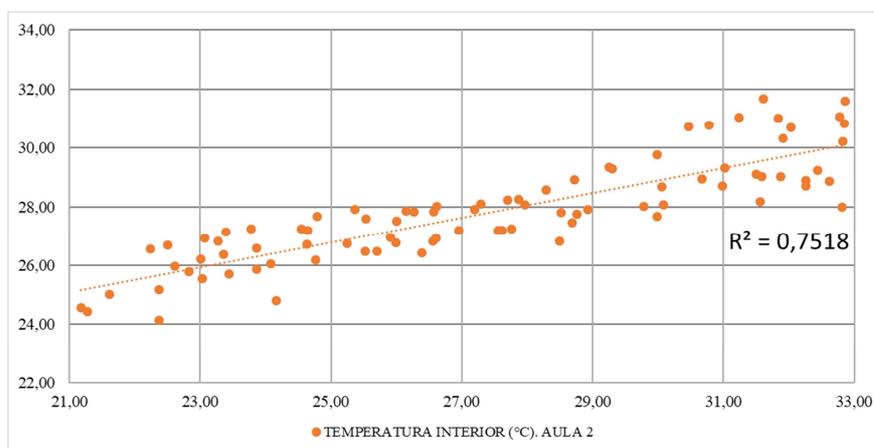


Figura 5: Correlación entre la temperatura (°C) medida al interior del aula en agosto (eje x) y la temperatura interior simulada (eje Y). Fuente: elaboración propia

Análisis de las temperaturas promedio en la situación de base y bajo la aplicación de estrategias de mejoramiento

En la Figura 6: Comparación de T_o promedio anual en las estrategias de diseño se pueden observar los resultados de las temperaturas operativas (T_o) promedio al año alcanzadas en el aula, tanto en el caso base como incorporando las alternativas de diseño recomendadas en la norma y enunciadas en Tabla 2. En el caso base la T_o promedio interior resultante fue de 26.5°C. En general y en forma anual, las medidas no generan significativos cambios en la T_o , lo que podría deberse a la falta de

exigencia en los aislamientos recomendados por la Norma. Las máximas T_o promedio fueron de 27°C en la cubierta en losa de concreto sin cielorraso (medida 3. CU CON SIN) y 26.9°C con la presencia cielorraso con cámara de aire (3.CU CON CO), este mismo valor se presenta en la rotación de la fachada a 90° hacia el oeste. El caso base muestra un promedio de T_o adecuado, situación mejorada solo con el grupo 2. HOR, modelo con elementos de protección horizontal (26.3°C); y 2. VER, modelo con los elementos de protección verticales con 26.4°C .

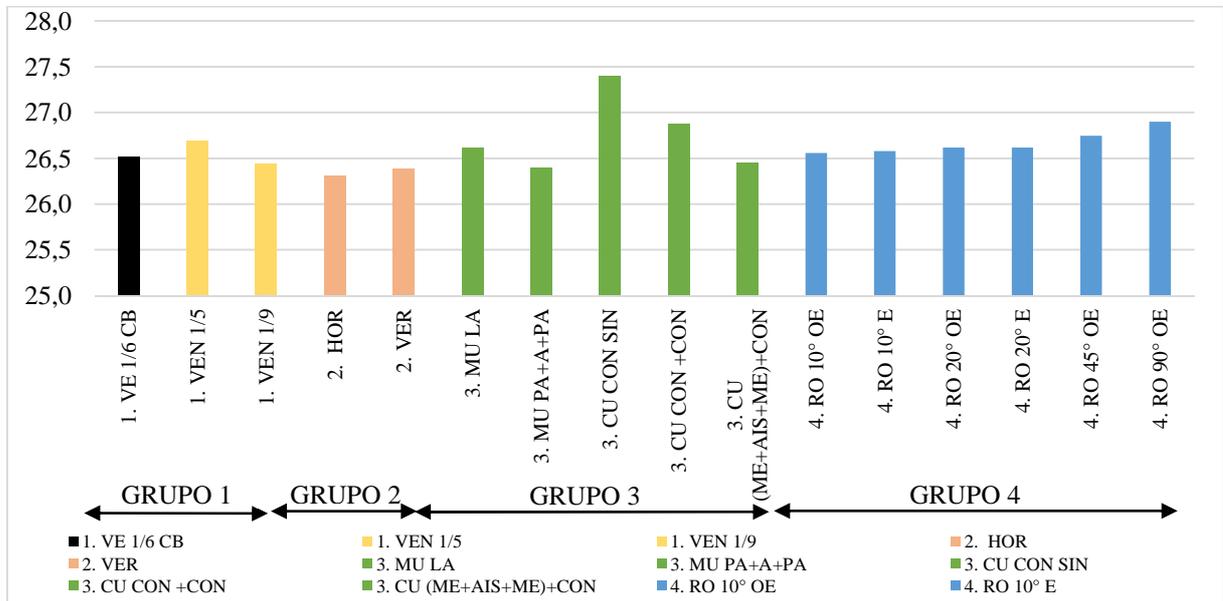


Figura 6: Comparación de T_o promedio anual en las estrategias de diseño

Una vez analizado el comportamiento térmico de las aulas aplicando las medidas en forma general, se procede a analizar las condiciones resultantes de acuerdo al confort bajo modelo adaptativo.

Análisis de confort bajo el modelo adaptativo

De acuerdo a la elaboración del modelo de confort adaptativo, el rango de temperaturas se encuentra entre 21.5°C y 28.5°C (ASHRAE, 2017). En las siguientes figuras se muestra el desempeño del caso base (línea color negro) con cada grupo de alternativas, para una mejor visualización. En la Figura se observa que la proporción 1/5 de ventana presenta temperaturas un poco más elevadas que el resto de las variaciones, sin embargo este incremento, no excede el rango de confort. En cuanto a las protecciones horizontales y verticales, logran disminuir las temperaturas en 0.5°C , especialmente en los meses de octubre a enero.

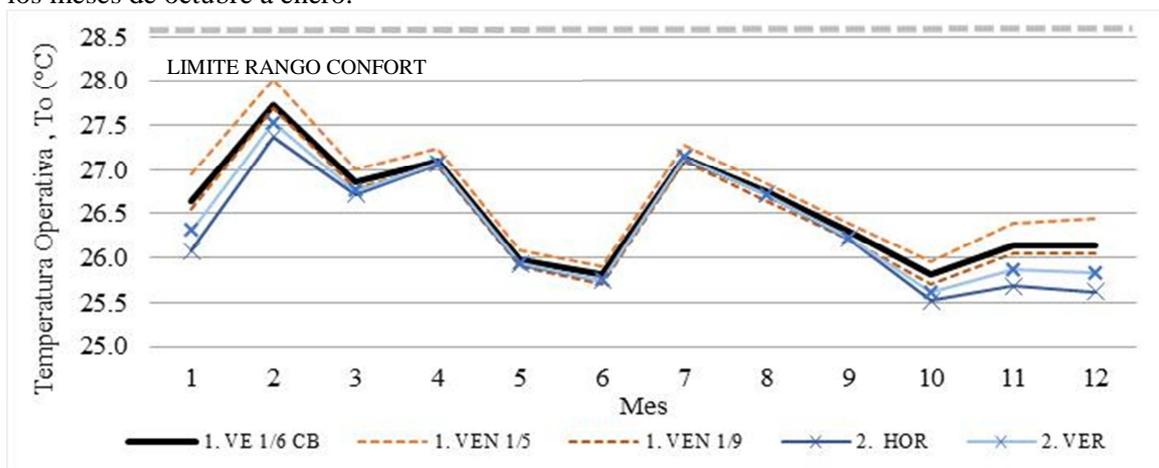


Figura 7: Temperatura operativa promedio mensual alcanzada en el aula a partir de las estrategias de diseño de los GRUPOS 1 y 2 Nota: Las estrategias son para el GRUPO 1: 1. VE 1/6 CB=ventana 1/6 CASO BASE; 1. VE 1/5=ventana 1/5; 1. VEN 1/9: ventana 1/9. GRUPO 2: 2. HO= Ventana con protección horizontal; 2. VER=ventana con protección vertical. Fuente: elaboración propia

La figura 8 presenta como el comportamiento del caso base simulado, es bastante favorable en comparación con las variaciones realizadas, resultando similar, o con temperaturas ligeramente más bajas, los modelos con la cubierta tipo sándwich con cielorraso (3. CU (ME+AISL+ME) CON y 3. Muro en panel yeso con cámara de aire (3.MU PA+A+PA). En cuanto al desempeño de la envolvente en ladrillo, se observa como presenta un comportamiento similar al del caso base en bloque de concreto. Por último, las variaciones con peor desempeño son las de la cubierta en concreto, con y sin cielorraso, las cuales son permitidas por la norma con acabado en color claro y reflectivo.

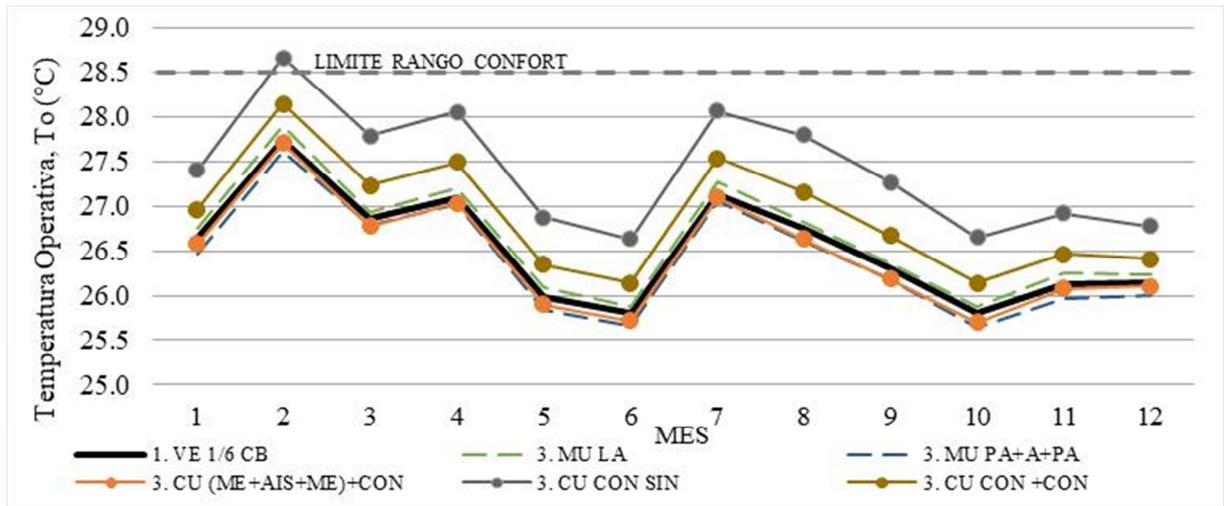


Figura 8: Temperatura operativa promedio mensual alcanzada en el aula a partir de las estrategias de diseño del GRUPO 3. Nota: **GRUPO 3:** 3.MU LA=muro en ladrillo; 3.MU (PA+A+PA): Muro Panel yeso + aislamiento +panel yeso; 3. CU CO SIN: Cubierta concreto sin cielo raso; 3. CU CO CON: Cubierta concreto con cielo raso con cámara de aire; 3. CU (ME+AISL+ME) CON: Cubierta metálica con aislamiento con cielo raso con cámara de aire. Fuente: elaboración propia.

En el último grupo de variaciones, el de las rotaciones, en la figura 9 se presentan las rotaciones admitidas por la norma (hasta 10°) y el resto, propuesto en este trabajo con fines de verificación. Como se puede observar las rotaciones hacia el este y oeste hasta 20° presentan desempeño térmico similar. Caso contrario a ángulos mayores como el de 45° y 90°, los cuales incrementan en 0.5°C y hasta 1°C la To al interior.

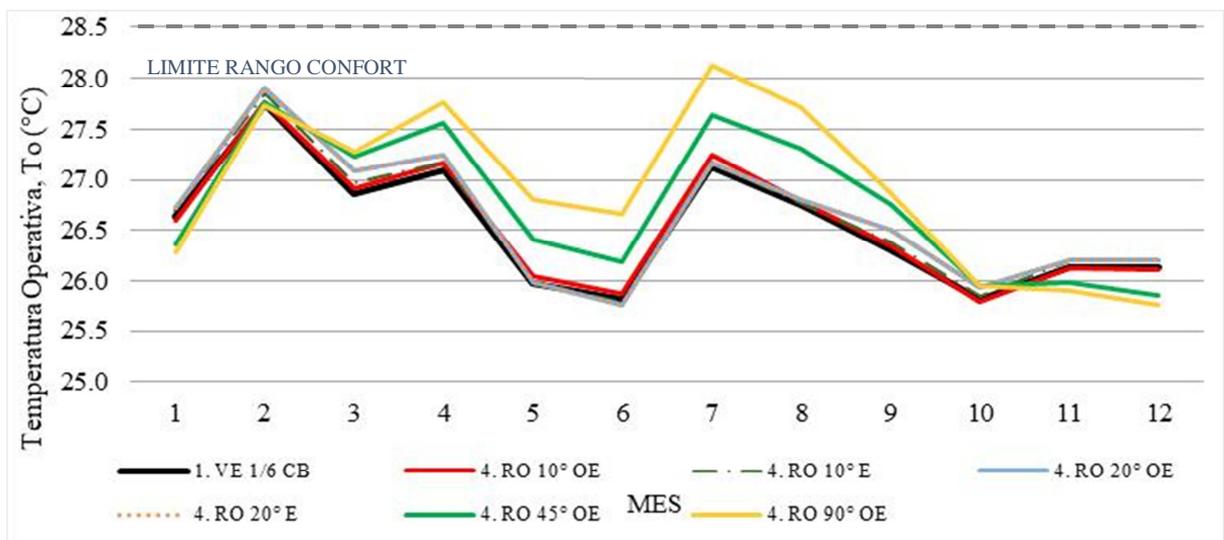


Figura 9: Temperatura operativa promedio mensual alcanzada en el aula a partir de las estrategias de diseño del GRUPO 4. Nota: **GRUPO 4:** 4.10°O= orientación de 10°oeste; 4.10°E=orientación de 10° este; 4. 20°O= rotación de 20° al oeste; 4. 20° E= rotación de 20° al este; 4. 45° O=rotación 45° Oeste; 4.90°O=rotación 90° Oeste. Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta los avances alcanzados hasta el momento en la evaluación de las estrategias arquitectónicas, morfológicas, y de diseño, estipuladas en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595, que tiene como fin alcanzar la comodidad ambiental en escuelas. Para ello se seleccionó una escuela de construcción oficial de la ciudad de Cali, Colombia, y se desarrolló un modelo de simulación térmica de la misma, centrándose en el análisis del espacio prioritario de la misma, el aula. El modelo base buscó representar de la manera más fehaciente el edificio, en base a un conocimiento previo del mismo y de la realización de auditorías térmico energéticas y socio-ambientales. Por otro lado, el análisis se centró en el modelo de confort adaptativo, propio para el clima de Cali, basándose en el ANSI/ASHRAE Standard 55 (2017), a partir de los cuales se evaluaron las estrategias arquitectónicas aplicadas en el aula base.

En cuanto a los resultados de las temperaturas operativas alcanzadas a partir de la aplicación de estrategias se pudo concluir que:

- i. Presentó mejor desempeño la alternativa con mayor masa térmica como el bloque de concreto, y el muro en panel yeso con cámara de aire, frente al ladrillo. Si bien la norma privilegia el uso del bloque de concreto, las diferencias con respecto al ladrillo no son muy distantes.
- ii. En esa misma línea, presentan mejor desempeño la cubierta tipo sándwich con y sin cámara de aire, frente a cubiertas másicas como la losa de concreto macizo, aun cuando presente cámara de aire.
- iii. Con relación al área de vidriados, se concluyó que a pesar que funciona mejor térmicamente una menor área de ventana (con una relación de área ventana vs área de piso en planta de 1/9), que mayor área de ventana (relación 1/5), la diferencia no es muy marcada. En cuanto a las protecciones hacia el norte y sur, estas logran bajar entre 0.5°C y 1°C.
- iv. Con relación a la orientación del edificio, las orientaciones norte y sur, presentan un desempeño similar a rotaciones leves de 10°C permitidas por la norma. Cuando el ángulo de exposición es mayor en 20°, los resultados son similares. Las diferencias de 1°C se presentan en fachadas expuestas a 45°C° y 90°C hacia el oeste.

Las estrategias de diseño recomendadas por la (NTC) 4595, resultaron dentro del amplio rango de confort bajo el modelo adaptativo. Sin embargo, a partir del análisis anterior, la norma podría realizar las siguientes revisiones:

- v. Revisar las diferentes dimensiones de las ventanas, las cuales presentan un desempeño similar en las proporciones propuestas.
- vi. Profundizar en el estudio y caracterización de los elementos de protección solar, los cuales logran disminuciones en la T_o ; sin embargo, hacia el norte y sur, no hay una disminución amplia en las temperaturas internas, sin embargo, este tema no se puede revisar aisladamente del confort visual y el riesgo de no proteger fachadas y sufrir el disconfort por deslumbramiento o brillo.
- vii. Avanzar en la caracterización térmica de la envolvente que permita una mayor exploración y combinación de materiales por parte de los diseñadores.
- viii. Revisar los ángulos de exposición de la fachada, los cuales pueden ser mayores, al propuesto por la norma, sin recurrir a incrementos en la temperatura operativa.

Se considera importante complementar estudios como el propuesto **con** la validación del modelo analítico en el contexto tropical. También, continuar estudios como el presentado, permiten validar no solo los rangos propuestos por las normas nacionales y las internacionales, sino, la pertinencia de las estrategias de diseño propuestas por las mismas.

REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 55-. (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Big Ladder Software LLC. (n.d.). Engineering Reference — EnergyPlus 8.0.

- ICONTEC. (2004). Norma Técnica Colombiana NTC 5316. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- Kwok, A. (1997). Thermal comfort in naturally-ventilated and air-conditioned classrooms in the tropics.
- Montoya, O., Y San Juan, G. (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).
- Nicol, F., Humphreys, M., y Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Routledge.
- NTC, N. T. C. (2006). 4595. *Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares*.
- Standard, A. (2017). Standard 55–2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *Ashrae: Atlanta, GA, USA*.
- Tablada, A., de la Peña, A., y De Troyer, F. (2005). Thermal comfort of naturally ventilated buildings in warm-humid climates: field survey. *Environmental Sustainability. The Challenge of Awareness in Developing Societies. Proceedings of Passive Low Energy Architecture (PLEA), Beirut*, (November), 191–196. Retrieved from <http://www.arquitecturatropical.org/EDITORIAL/documents/Thermal Comfort of Naturally Ven.pdf>
- Zapata Rueda, C., Viegas, G., San Juan, G., & Et all. (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.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to carry out an evaluation of thermal comfort in a classroom in Cali, Colombia, based on the application of passive bioclimatic strategies. The school was built following the parameters of the Colombian Technical Standard (NTC) 4595. And determine the relevance as a normative document that regulates the design and construction of educational establishments in the country. The methodology develops: i. Thermal simulation models of the prototypical classroom in the EnergyPlus 8.7, in the basic state, and after the application of 15 design strategies; and, ii. The evaluation of thermal comfort under adaptive model (ASHRAE 55), after applying these strategies. It was concluded that all the strategies were within the comfort range, however, some strategies that could be included and others modified were identified, in order to achieve a better thermal performance.

Key words: adaptive comfort, school classrooms, tropical climate, design strategies, thermal simulation.