

ANÁLISIS DE CONFORT TÉRMICO EN ESCUELAS DEL MILENIO. CASO: QUITO Y BABAHOYO

¹Gabriela Ledesma Hidalgo, ²Rosa Rivera Lara

¹Newcastle University, Newcastle Upon Tyne – Reino Unido, mgabriela_ledesmah@hotmail.com

²Newcastle University, Newcastle Upon Tyne – Reino Unido, arqrivera86@gmail.com

Recepción / *Received*: 23, 04, 2018

Aceptación / *Accepted*: 27, 06, 2018

Publicado / *Published*: 30, 06, 2018

Resumen

Ecuador carece de normativas de confort térmico en edificaciones, por lo que el diseño arquitectónico no responde a características climáticas. El programa Escuelas del Milenio utiliza una infraestructura prototipo en pos de optimizar el tiempo de construcción y disminuir costos sin consideración a la variación climática.

El presente estudio utiliza encuestas para determinar las condiciones ideales térmicas en las aulas y busca evaluar el impacto de técnicas de arquitectura pasiva, para garantizar el confort térmico en la edificación. Las encuestas mostraron que los niveles de confort térmico varían de los estándares internacionales y pueden ser influenciados por otros parámetros independientes a la calidad del espacio. Se seleccionaron dos escuelas: Quito y Babahoyo (Sierra y Costa), como casos de estudio para la realización de encuestas y el monitoreo de las condiciones ambientales. Se utilizó la simulación dinámica para evaluar el desempeño térmico de las edificaciones y evaluar el impacto en confort térmico de los principales factores arquitectónico de la envolvente. Los edificios prototipo logran un confort térmico del 70% en Quito y del 64% en Babahoyo; utilizando parámetros óptimos de diseño arquitectónico estos valores se pueden elevar al 95% y 80% respectivamente.

Palabras claves: confort térmico, votos térmicos, temperatura óptima, envolvente, escuelas

Abstract

Ecuador lacks thermal comfort standards causing building's design to disregard the environment and local climate. The Millennium Schools program (UEM) adopted a prototype design for the ease of optimizing construction time and lowering costs but disregarding the three variations of climatic regions in the country.

This study uses subjective surveys to determine the desired conditions in classrooms and aims to evaluate the impact of passive architecture design techniques on thermal comfort. The surveys interestingly showed that perceptions of thermal comfort differ from published international standards and can be influenced by other perceptions regarding the space quality. Two UEMs located in Babahoyo and Quito, Coast and Andean region respectively, were selected for conducting the surveys and monitoring indoor conditions to validate a simulation model. Building dynamic simulation modelling is used to test the thermal performance and the impact of the envelope design on thermal comfort. The prototype buildings are capable of maintaining thermal comfort conditions on an average 70% in Quito, and 64% in Babahoyo of occupancy hours respectively. Using optimum architectural parameters, thermal comfort can increase to 95% in Quito and 80% in Babahoyo.

Keywords: Adaptive comfort; thermal votes, optimum temperature, envelope, educational buildings.

Introducción

El confort térmico se define como “el estado mental que expresa la satisfacción con el entorno” (ASHRAE, 2013); esta definición involucra parámetros sociales, psicológicos y físicos. El confort térmico en aulas debe ser evaluado cuidadosamente debido a la alta densidad de ocupación, el impacto negativo sobre el rendimiento académico y la oportunidad limitada que tienen los niños para adaptarse a las condiciones ambientales (Humphreys, 1977).

El Gobierno ecuatoriano emprendió la construcción y rehabilitación de edificios escolares de acuerdo a las características de su zona de influencia¹ (Ministerio de Educación, 2018). El programa Escuelas del Milenio utiliza una infraestructura prototipo replicada en todo el país; los diseños prototipos fueron utilizados en proyectos gubernamentales para optimizar los tiempos de construcción, generar menos desperdicios y disminuir costos de construcción (Ministerio de Educación, 2014).

El Ministerio de Educación generó una normativa para la construcción de Escuelas de Milenio en la cual no se hace referencia al confort térmico de los alumnos ni a la variación climática que implica el replicar la infraestructura en todo el país (Torres, 2015). Simultáneamente, la norma ecuatoriana de construcción considera un rango térmico aceptable de 18 a 24°C, en concordancia con la normativa estadounidense Ashrae; sin embargo, debido a la diversidad de pisos climáticos en el Ecuador se debe utilizar el “confort térmico adaptativo” para el establecimiento de los rangos térmicos. Ecuador tiene tres regiones naturales con características climáticas propias, las regiones Costa y Amazonía tienen una temperatura promedio de 25°C y humedad del 90%, mientras que la Sierra tiene una temperatura de 16°C y humedad del 75% (Cedeño & Donoso, 2010).

Dado que en Ecuador no existen estudios de rangos de confort ni normativas sobre el rendimiento térmico de los edificios, este estudio busca establecer la temperatura de confort en aulas para las regiones Costa y Sierra y; evaluar el desempeño térmico de las edificaciones construidas y la posibilidad de mejoramiento térmico utilizando estrategias de diseño pasivo (sin utilizar sistemas mecánicos para controlar el ambiente interior). Los objetivos de este estudio son:

- Investigar la aceptación y preferencias térmicas de los estudiantes dentro de las aulas.
- Determinar los límites del confort térmico, temperatura neutral y temperatura preferida.
- Evaluar la eficiencia de estrategias de diseño pasivo para mejorar las condiciones térmicas de las aulas.

Metodología

Los estudios de confort térmico en aulas han sido realizados desde dos metodologías: 1) estudios objetivos de voto medio estimado y porcentaje de personas insatisfechas (PMV/PPD); y 2) encuestas subjetivas basadas en votos de sensación térmica (TSV) y votos de preferencias térmicas (TPV) (Zomorodian, et al., 2016) (Nyuk & Shan Shan, 2003) (Teli, et al., 2014). La mayoría de estudios recomiendan utilizar ambas metodologías para comparar los resultados de las predicciones (PMV/PPD) con los de las mediciones en sitio (TSV y TPV).

¹ <https://educacion.gob.ec/caracteristicas/>
http://www.expreso.ec/historico/locales-antisismicos-y-funcionales-ICGR_6164910

Se seleccionaron dos Escuelas del Milenio; una en Quito (Sierra) y en Babahoyo (Costa), como casos de estudio para la realización de encuestas y el monitoreo de las condiciones ambientales interiores (ver sección Mediciones en campo). Las temperaturas medidas en sitio sirvieron para validar el modelo de simulación dinámica del edificio realizado en el software IESve. La simulación dinámica fue utilizada para evaluar el desempeño térmico y la eficiencia de las estrategias de diseño pasivo.

Ambas escuelas tienen la misma infraestructura y reciben un promedio de 2100 alumnos; la figura 1 muestra la implantación de ambas escuelas. El diseño arquitectónico está basado en un módulo de aula que se puede replicar y extender para recibir las demás funciones. El módulo de aula tiene capacidad para 35 alumnos con un área de 1,63m² por estudiante (Ministerio de Educación, 2014).

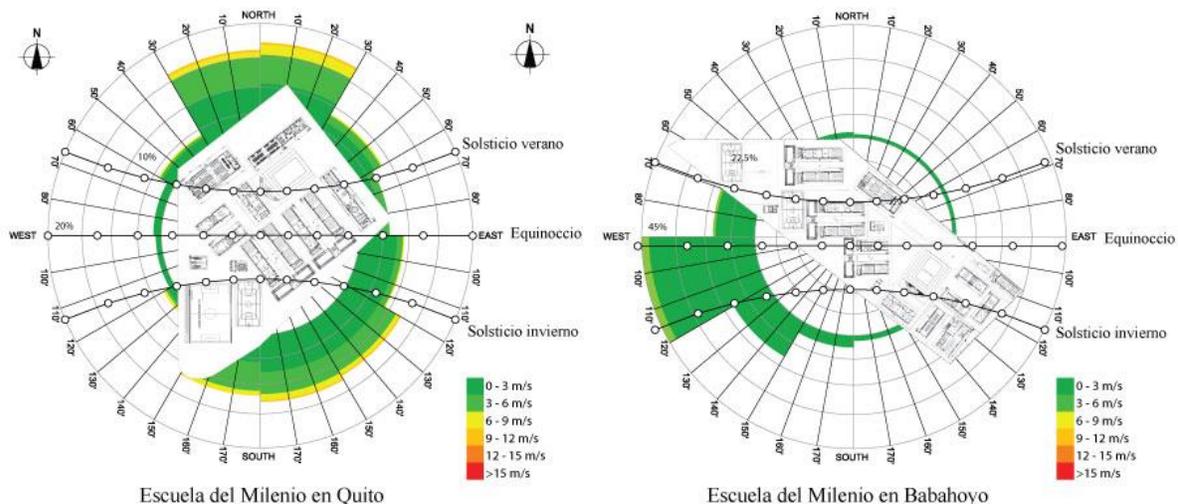


Figura 1. Implantación de las escuelas y parámetros ambientales de viento y asoleamiento. Fuente: IESve Simulation.

Las escuelas se conforman de bloques de edificios independientes para cada función, el bloque de aulas cuenta con 12 clases distribuidas en 2 pisos alrededor de un patio central cubierto. La figura 2 muestra la planta del aula, identificando la posición del equipo de monitoreo y la planta del bloque de aulas, identificando las aulas que fueron monitoreadas. Las ventanas son modulares con un índice de vano (WWR) del 34% en la fachada exterior y 15% en la interior. El edificio tiene un índice de superficie a volumen (S/V) de 0,27 y un índice de infiltración de 5,7 ach (cambios de aire por hora).

Mediciones de campo. - Se realizaron un total de 83 encuestas en Quito en tres aulas durante el 21 de junio de 2016. En Babahoyo se realizaron 210 encuestas entre los días 22 de junio y 6 de julio en siete aulas diferentes. La encuesta cuenta con diez preguntas divididas en tres categorías; la primera sección recolecta información demográfica, la segunda sección recolecta la percepción y preferencias térmicas; y, la tercera sección se refiere al desempeño académico y concentración de los estudiantes (ver figura 3). Se utilizaron dos escalas para medir la sensación térmica: Escala Ashrae y Escala Bedford; para la preferencia térmica se utilizó la escala McIntyre; la aceptabilidad se midió a través de votos directos, y la satisfacción general se midió en una escala de 7 puntos.

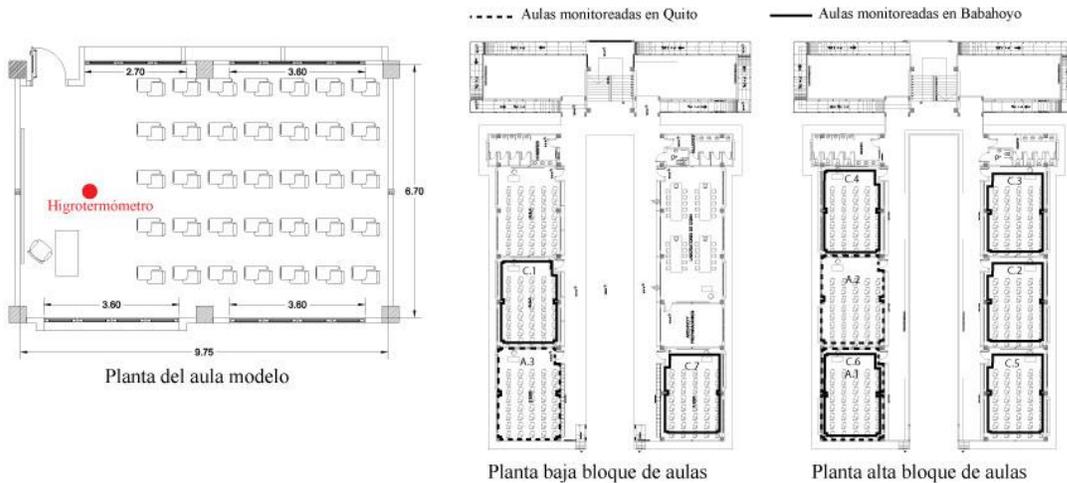


Figura 2. Planta del aula modelo y bloque de 12 aulas. Fuente: Normas técnicas y estándares de infraestructura – Ministerio de Educación.

1. **Cómo calificarías la temperatura en el aula en este momento**

 Muy fría	Fría	Poco fría	Neutral	Poco caliente	Caliente	Muy caliente 

2. **Te sientes cómodo con la temperatura en el aula**

 Frio extremo	Muy frío	Confortable pero frío	Confortable	Confortable pero cálido	Muy cálido	Cálido extremo 

3. **Te gustaría que la temperatura fuera**

Más fría	Ningún Cambio	Más cálida

4. **Te parece aceptable la temperatura de la clase**

Aceptable	No aceptable

5. **Cómo calificarías la velocidad del aire en el aula**

 Muy estático	Estático	Poco estático	Normal	Brisa ligera	Ventoso	Muy ventoso 

6. **Cómo calificarías la humedad en el aula**

Muy Seco	Seco	Poco seco	Normal	Poco húmedo	Húmedo	Muy húmedo

7. **En este momento estás utilizando el saco o chaleco del uniforme**

Si	No

8. **Qué actividad física estabas realizando hace media hora**

Sentado	Caminando	Corriendo	Jugando

9. **Cómo calificarías el nivel de luz natural en el aula**

Muy oscuro	Obscuro	Normal	Brillante	Muy brillante

10. **Te sientes cómodo con las condiciones ambientales dentro del aula (temperatura, humedad, viento e iluminación)**

 Muy descontento	Descontento	Poco descontento	Neutral	Poco satisfecho	Satisfecho	Muy satisfecho 

Figura 3. Modelo de Encuesta. Fuente: El autor.

Análisis de datos.- Se utilizaron los votos térmicos de los estudiantes² y la temperatura medida en sitio, para establecer los rangos de confort térmico y las temperaturas neutral y preferida. Estos valores se contrastaron con los métodos empíricos (1) PMV/PPD descrito en Ashrae 55 y (2) método adaptativo descrito en EN-15251. El método PMV/PPD predice el valor medio de los votos de sensación térmica (MTSV) en un rango de -3 (frío) a +3 (caliente). El método adaptativo depende de la temperatura ambiental promedio para determinar los límites del confort.

El modelo virtual de la Escuela del Milenio fue creado usando IES Virtual Environment y validado de acuerdo a la Guía 14 de Ashrae. La calibración del modelo virtual se realizó en función de la temperatura del aire medida cada media hora dentro de las aulas. El modelo para Quito predice la temperatura con una exactitud de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ y el modelo de Babahoyo de $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$.

IESve utiliza la transmitancia térmica (valor U) de los elementos constructivos, el patrón de ocupación, el rango metabólico y el valor de aislamiento de la vestimenta, para calcular el confort térmico de los ocupantes de una edificación. La tabla 1 muestra la transmitancia térmica de los elementos constructivos. El rango metabólico para estudiantes fue determinado por Teli (Teli, Jentsch, & James, 2014), en un valor de 1,2 MET; el aislamiento de la vestimenta se calculó de acuerdo al uniforme escolar siendo de 0,9 CLO en Quito y 0,6 CLO en Babahoyo.

Tabla 1. Transmitancia térmica de los elementos constructivos. Fuente: El Autor. Elaborado en IESve.

Elementos	Materiales	Valor U (W/m²k)
Paredes exteriores	Enlucido y pintura Bloque alivianado Enlucido y pintura	1,83
Paredes interiores	Enlucido y pintura Bloque alivianado Enlucido y pintura	1,57
Entrepisos	Cerámica y masillado Concreto reforzado Cielo falso de gypsum	1,03
Contrapisos	Piedra bola Membrana impermeabilizante Concreto reforzado Cerámica y masillado	1,28
Techo	Impermeabilización y masillado Concreto reforzado Cielo falso de gypsum	1,07
Ventanas exteriores	Vidrio claro	5,59
Ventanas interiores	Vidrio claro	3,78

Modelo PMV/PPD.- Este método fue desarrollado por Fanger en la década de los sesenta, para predecir la sensación térmica de un grupo de personas. Su cálculo necesita seis variables: temperatura del aire, temperatura radiante media, humedad relativa, velocidad del aire, aislamiento de la vestimenta y rango metabólico. La temperatura del aire y la humedad fueron medidas en cada aula al principio y fin de las encuestas.

² Votos térmicos: es el voto emitido por una persona con respecto a una situación dada en una escala de sensación térmica de 7 niveles: frío, fresco, ligeramente fresco, neutro, ligeramente calurosos, caluroso y muy caluroso; basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano.

Se utilizó la herramienta “CBE Thermal Comfort” para calcular los índices PMV y PPD; esta herramienta fue desarrollada por el Berkeley’s Center como una interfaz gráfica para la predicción del confort térmico de acuerdo al modelo Ashrae. La tabla 2 muestra el cálculo del PMV y PPD para ambas escuelas. En Quito el PMV fue de -0,6 (ligeramente frío) y el PPD de 13,7%, el cual está ligeramente fuera de los límites de confort (10% de insatisfacción). En Babahoyo el PMV y PPD son +2,04 (cálido) y 72,7% de insatisfacción.

Tabla 2. Cálculo del PMV y PPD. Fuente: El autor. Elaborado en CBE Thermal Comfort Tool.

Escuela del Milenio Quito						Escuela del Milenio Babahoyo					
Aula	°C	Hum	MTSV	PMV	PPD	Aula	°C	Hum	MTSV	PMV	PPD
A.1	17,3	68,0	-1,0	-0,8	18,0	C.5	28,4	77	-0,2	1,5	49,0
A.2	17,7	61,0	-0,7	-0,7	17,0	C.6	28,8	74	0,0	1,4	47,0
A.3	20,3	51,0	-0,4	-0,2	6,0	C.7	29,8	74	0,7	1,8	68,0
Promedio			-0,7	-0,6	13,7	C.1	30,0	73	0,4	1,7	61,0
						C.4	32,5	57	0,6	2,6	94,0
						C.2	33,0	53	0,9	2,5	91,0
						C.3	34,5	51	1,0	2,9	99,0
						Promedio			0,5	2,0	72,7

Al comparar estos índices con los votos de sensación térmica de los alumnos se determinó que existe una sobrestimación del PMV de 0,12 en Quito y de 1,5 en la Costa, debido a que los alumnos tienen una mayor climatización con su ambiente, dado que las variaciones de temperatura en esta región son menores a las variaciones en la Sierra.

Modelo adaptativo.- El confort adaptativo fue calculado usando CBE para generar gráficos en concordancia con la normativa EN-15251; esta normativa define tres límites para el confort: 90, 80 y 65% de aceptabilidad. Debido a que los alumnos no tienen control sobre los parámetros ambientales en las aulas, las condiciones ambientales deben cumplir con el 90% de aceptabilidad.

La figura 4 muestra las gráficas de confort adaptativo para Quito y Babahoyo ploteadas contra las temperaturas medidas en cada aula. El rango de confort definido es de 22 a 26°C para Quito y de 25,5 a 30,3°C para Babahoyo. En Quito las temperaturas son siempre inferiores al rango de confort, mientras que en Babahoyo las temperaturas son confortables durante las horas de la mañana. El método adaptativo difiere significativamente del método PMV/PPD, ilustrando la capacidad de adaptación del ser humano con su ambiente.

Votos de sensación térmica.- Se utilizaron las escalas Bedford y Ashrae para evaluar los votos de sensación térmica. Pese a que Ashrae es la escala más utilizada, la escala Bedford es más precisa ya que relaciona la sensación térmica con el sentimiento de confort. La figura 5 muestra los votos térmicos en cada aula; la línea gruesa representa el voto promedio, los cuadros el rango mayoritario de votos y las líneas verticales el rango total de los votos. Todos los resultados mostrados son realizados en base a la tabulación de encuestas y la aplicación de fórmulas de cálculo estadístico.

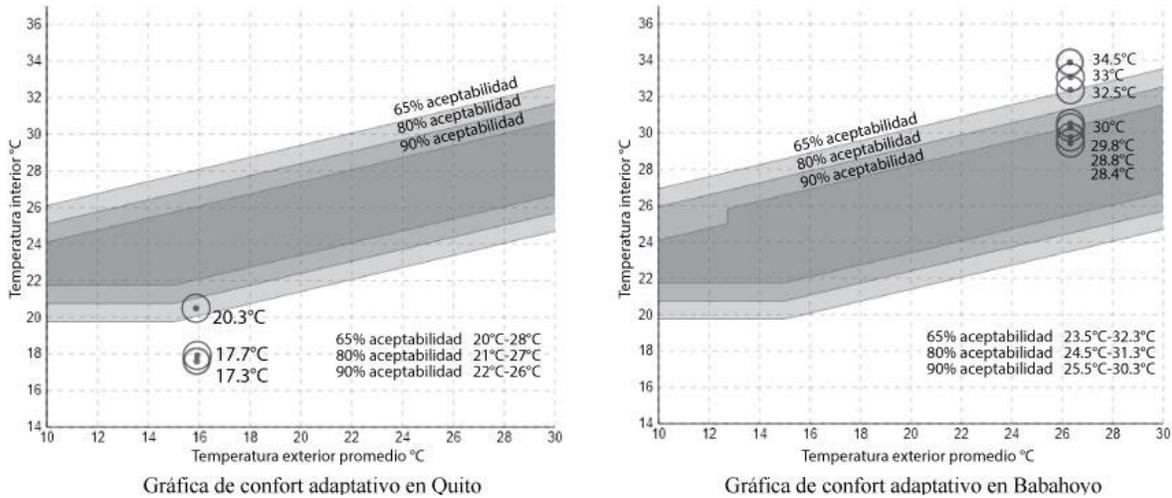


Figura 4. Confort adaptativo en Quito y Babahoyo. Fuente: El autor. Elaborado en CBE Thermal Tool.

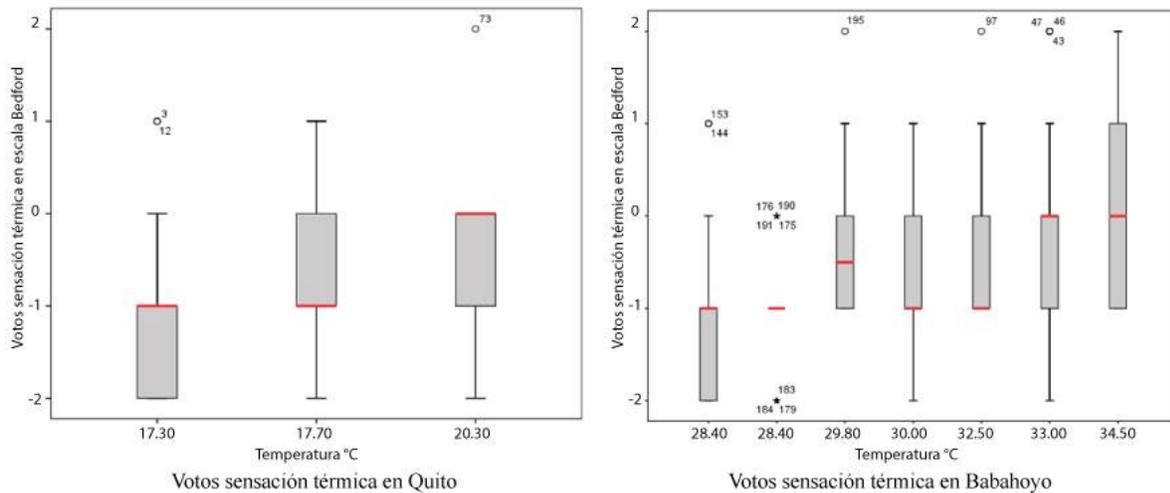


Figura 5. Votos de sensación térmica en la escala Bedford. Fuente: El autor. Elaborado en SPSS.

El voto térmico promedio (MTSV) en Quito fue de -1,28 (frío) en la escala ASHRAE y de -0,63 (frío aceptable) en la escala Bedford. En Babahoyo los valores fueron de 0,67 (ligeramente cálido) y 0,44 (confortablemente cálido). Esto demuestra que las personas aceptan como confortables sensaciones térmicas diferentes.

Temperatura neutral.- Las temperaturas neutrales se calcularon utilizando regresiones lineales de la media de los votos de sensación térmica y de la temperatura interior. Se utilizó la comparación estadística Anova para analizar si la variación en los votos térmicos era atribuida a la temperatura. Las pruebas estadísticas de homogeneidad de varianza dieron resultados de $p > 0,05$, por lo que se determinó que la temperatura si afecta significativamente los votos de los estudiantes.

Las ecuaciones resultantes entre los votos térmicos y las temperaturas son:

$$MTSV = 0,1626Ta - 3,7032$$

Ecuación 1. Regresión lineal entre TSV y temperatura en Quito.

$$MTSV = 0,1626Ta - 4,5496$$

Ecuación 2. Regresión lineal entre TSV y temperatura en Babahoyo.

La temperatura neutral es aquella en la que el MTSV es igual a cero. Resolviendo las ecuaciones se obtiene una temperatura neutral de 22,30°C en Quito y 27,9°C en Babahoyo. La figura 6 muestra las regresiones lineales para ambas ciudades.

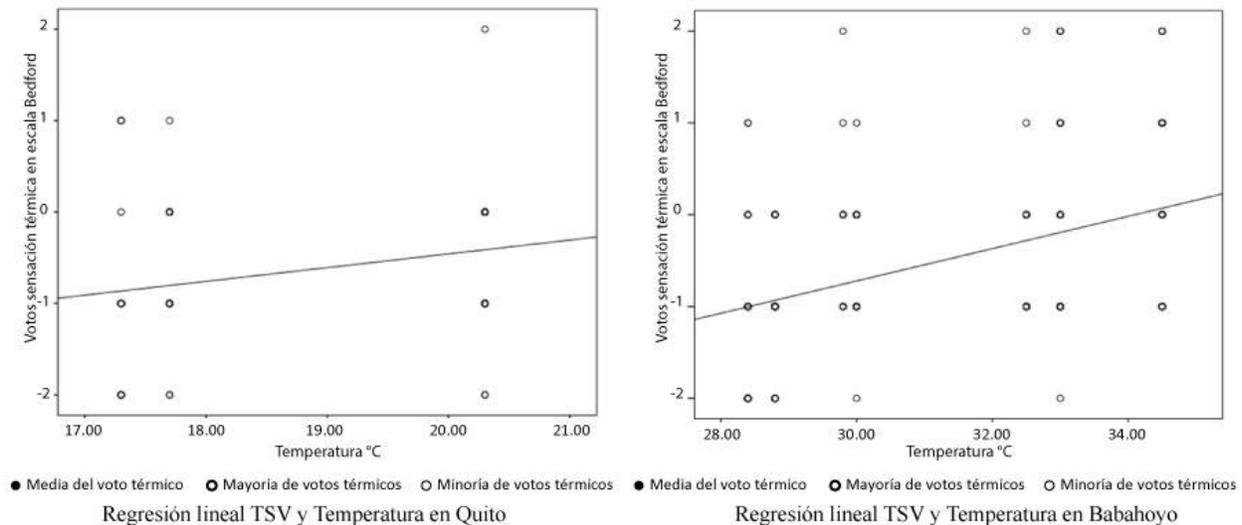


Figura 6. Cálculo de temperatura neutral. Fuente: El autor. Elaborado en SPSS.

Rango de confort térmico.- Los rangos térmicos se calcularon relacionando la aceptabilidad térmica con la temperatura interior. Los votos térmicos en el rango -1 a +1 fueron usados como referencia de aceptabilidad térmica.

En Quito se calculó el rango de confort mediante la ecuación 1, resolviendo para valores de MTSV $\pm 0,5$, equivalentes al 90% de aceptabilidad. El rango de confort es de 19,7°C a 25,8°C. Este rango es superior al establecido por (Olgyay & De Irisarri, 1968) para los climas tropicales fríos de Colombia (18°C a 23,5°C).

En Babahoyo el rango de confort fue calculado usando una ecuación cuadrática entre el porcentaje de aceptabilidad y la temperatura interior (Ecuación 3). El rango de confort al resolver la ecuación cuadrática para el 90% de aceptabilidad. El rango definido es de 25,4°C a 32,2°C; este es superior al calculado para las áreas tropicales de Colombia (24 a 28°C) y demuestra un mayor grado de adaptación a las condiciones ambientales.

$$Aceptabilidad = -1,4689T^2 + 90,05T - 1279,6$$

Ecuación 3. Cálculo de aceptabilidad térmica en Babahoyo.

Temperatura preferida.- Zomorodian (Zomorodian, et al., 2016) determinó que la temperatura preferida en aulas difiere de la temperatura neutral en un promedio de 1,5 a 4°C. La temperatura preferida se obtiene usando dos regresiones Probit, relacionando la cantidad de alumnos que prefieren temperaturas más cálidas y los que prefieren temperaturas más frías a la temperatura interior.

El punto de encuentro entre ambas regresiones representa la temperatura preferida; en Quito esta se determinó en 22,7°C igual a la temperatura neutral; y, en Babahoyo se determinó en 24,4°C, 3,5°C inferior a la temperatura neutral. Las regresiones están representadas en la figura

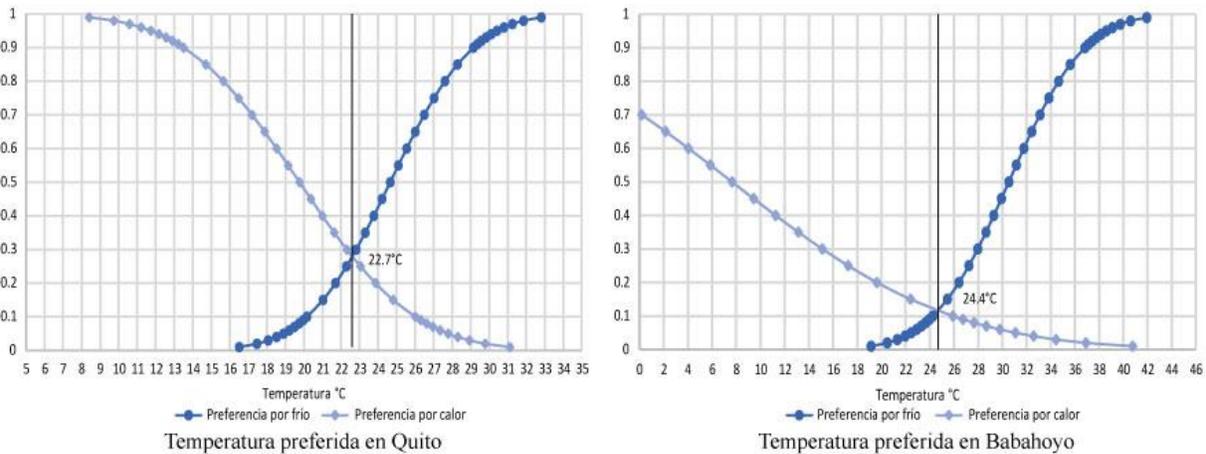


Figura 7. Temperatura preferida. Fuente: El autor. Elaborado en SPSS.

Adaptación psicológica y de comportamiento.- La sensación térmica y las preferencias varían, ya que una persona puede sentirse cómoda con su estado térmico e igual preferir un cambio en él. En Quito el 65,8% de los alumnos prefieren temperaturas más cálidas y en Babahoyo el 59,23% prefiere temperaturas más frías. En Quito, al incrementarse la temperatura disminuye proporcionalmente la cantidad de personas que prefieren temperaturas cálidas. En Babahoyo, pese a que el mismo patrón se repite, existen variaciones ligeras en las preferencias de acuerdo al nivel de actividad física de los alumnos (ver figura 8).

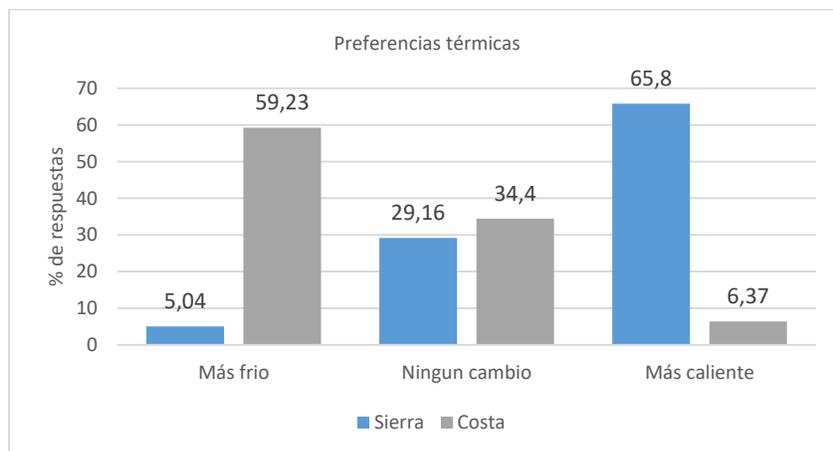


Figura 8. Preferencias térmicas. Fuente: El autor. Elaborado en SPSS.

En Quito los alumnos tienen una mejor adaptación a las condiciones térmicas, ya que el nivel de vestimenta (CLO) disminuye al incrementar la temperatura. En Babahoyo, sin embargo, no existe una clara relación entre el nivel de vestimenta y la temperatura, lo que demuestra que los alumnos de esta región son menos propensos a adaptarse al ambiente.

Resultados: Parámetros arquitectónicos e influencia en confort térmico

Los modelos de simulación dinámica de las Escuelas del Milenio fueron evaluados en función del número de horas en confort térmico durante el horario de clases. En Quito la escuela tiene un 70,6% de horas en confort térmico (19,7—25,8°C), mientras que en Babahoyo se alcanzó un 67,8% de horas en confort (25,4-32,2°C).

En Babahoyo, debido a las altas temperaturas ambientales, cada aula está equipada con dos ventiladores de techo de 65W; si se eliminan los ventiladores el porcentaje de horas en confort baja a 63,8%. Dado que el objeto de este estudio es investigar la eficiencia de las estrategias pasivas, todas las comparaciones serán contra el desempeño de las aulas sin ventiladores.

Zomorodian (Zomorodian & Nasrollahi, 2013) determinó que los principales parámetros arquitectónicos que influyen en el confort térmico son: índice de infiltración, índice de vanos, orientación, materiales de la envolvente, dispositivos de control solar e índice de superficie/volumen.

Índice de infiltración.- la infiltración se define como el paso descontrolado de aire a través de la envolvente del edificio por aberturas no previstas. La hermeticidad depende de la calidad de la construcción, los materiales utilizados y el tipo de puertas y ventanas. Ecuador no tiene ninguna regulación referente a la hermeticidad de los edificios, y, por lo tanto se convierte en la mayor ruta de pérdida del calor.

Se hicieron simulaciones con índices de infiltración entre 0,5 y 7 ach (intercambios de aire por hora) para determinar el valor más eficiente para lograr el confort térmico. En Quito, la infiltración es la mayor causa de ambientes fríos. Al incrementar la hermeticidad de la envolvente a 0,5 ach, el porcentaje de horas en confort aumenta a 94,1%; resultados similares fueron obtenidos en escuelas de Irán y Chile (Zomorodian & Nasrollahi, 2013) (Trebilcock, 2014).

En climas cálidos, una mayor infiltración permite la transferencia del calor hacia el exterior enfriando los espacios interiores. Sin embargo, si la temperatura exterior es mayor al límite de confort térmico, un aumento en la infiltración incrementa la temperatura interior. En Babahoyo se determinó 4,0 ach como el índice óptimo. La figura 9 muestra los resultados de las simulaciones con los distintos índices de infiltración.

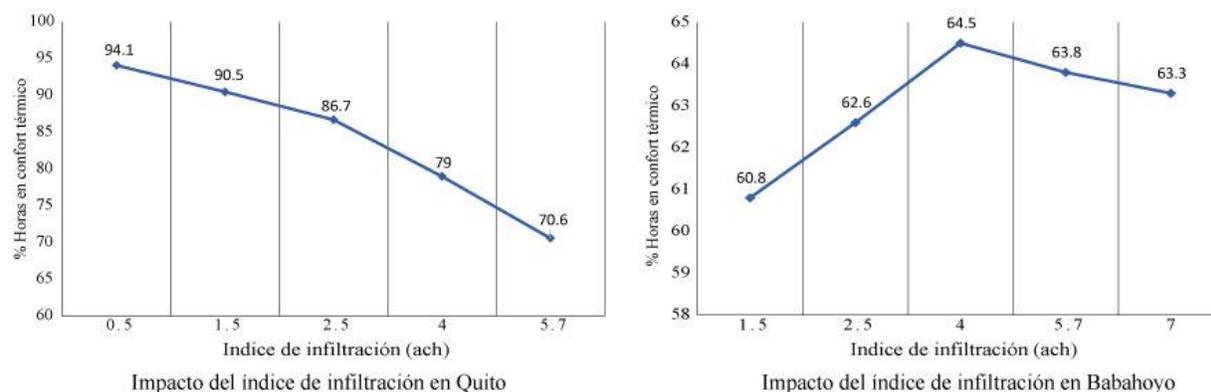


Figura 9. Impacto del índice de infiltración en confort térmico. Fuente: El autor. Elaborado en IESve.

Índice de superficie / volumen (S/V).- En climas templados el índice S/V no tiene un impacto significativo en el confort térmico y, dado que el índice cumple con el estándar NTE INEN 2506 para Ecuador, no se realizó una variación en el volumen del edificio para la ciudad de Quito.

En climas cálidos el índice S/V debe ser elevado para tener mayores superficies en contacto con el ambiente. Esta variación fue probada en bloques de un solo piso con 3 aulas (0,5 S/V) y edificios de dos pisos con 6 aulas (0,39 S/V). El mejor resultado se obtiene con un índice S/V de 0,5 incrementando un 1,7% de horas en confort térmico. Sin embargo, al generar un patio sombreado en la geometría actual del edificio, el confort aumenta en 3,5%.

Orientación.- La orientación del edificio es primordial para lograr la climatización pasiva de los espacios. La orientación se relaciona directamente al confort térmico debido a la posición de las ventanas, la radiación solar en las superficies externas y la influencia del viento.

La orientación óptima fue evaluada para los puntos cardinales y ordinales, obteniendo como resultado para Quito una orientación óptima Norte-Sur con el patio abierto hacia el sur, permitiendo el ingreso de la mayor cantidad de radiación solar. En Babahoyo la mejor orientación consiste en oponer la longitud del edificio a los vientos predominantes. El viento sudoccidental enfría las aulas logrando un 69,2% de horas en confort térmico. La figura 10 muestra las simulaciones en las ocho direcciones y la orientación óptima.

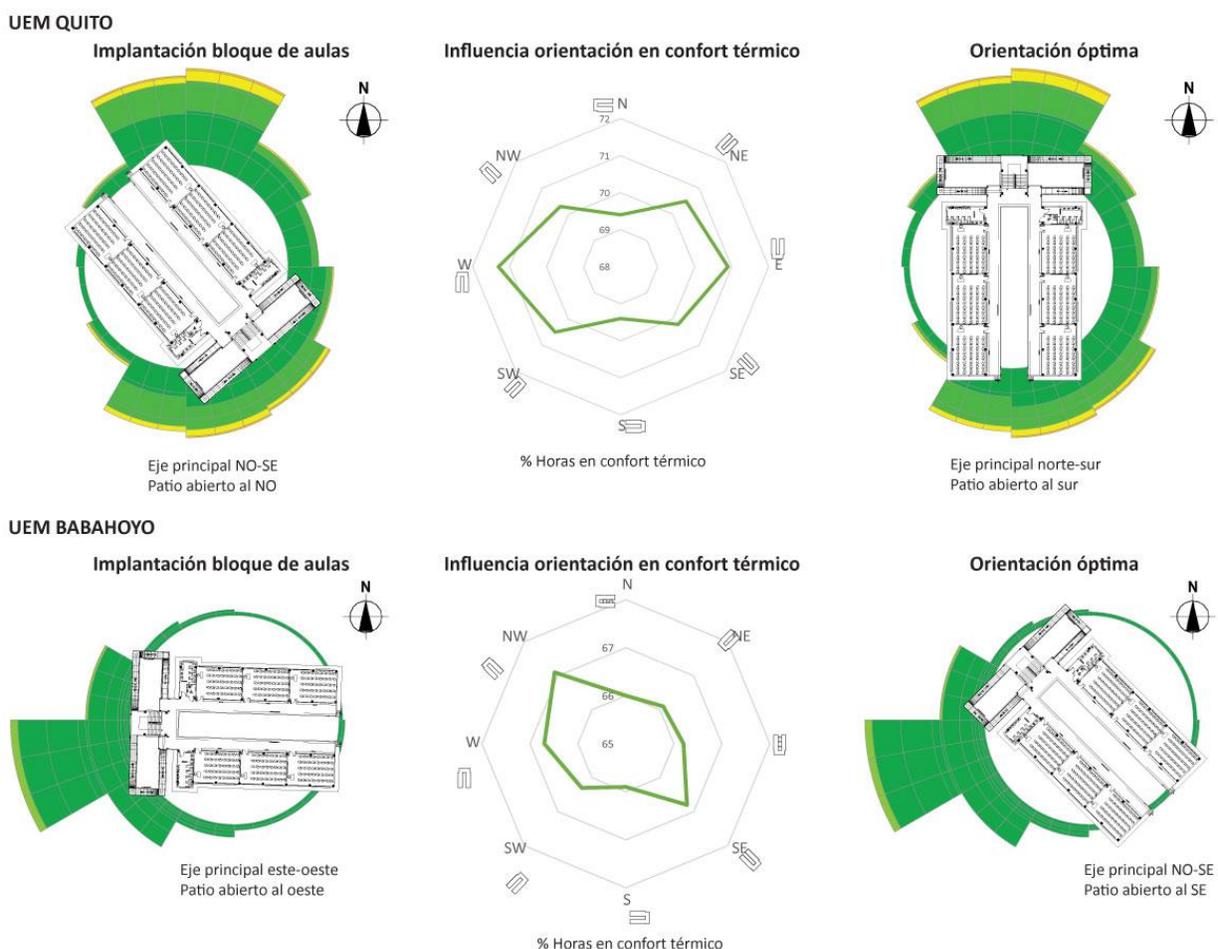


Figura 10. Impacto de la orientación en el confort térmico. Fuente: El autor. Elaborado en IESve.

Índice de vanos (WWR).- Las ventanas son los elementos térmicos más débiles en cualquier construcción, permiten el ingreso de la radiación solar, proveen ventilación natural y son las principales fuentes de infiltración. En las escuelas, debido a la alta densidad, el índice de vanos debe ser alto y lograr un balance entre ganancias solares, ventilación y luz natural.

El diseño prototipo tiene un WWR exterior de 34% e interior de 15%. Para determinar el índice óptimo de vanos se consideró el porcentaje de horas en confort térmico y el factor de luz solar, el cual no puede descender del 2% en cada aula.

En Quito el confort térmico aumenta proporcionalmente con el área de ventanas. Un índice de 65% en ventanas exteriores y 15% en interiores se estimó como óptimo. Al incrementar el área de ventanas el factor de luz solar subió un promedio de 1,7 puntos, por lo que se debe considerar el uso de elementos de sombra para controlar el ingreso de luz. En Babahoyo los índices óptimos son 26% en fachadas exteriores y 15% en interiores. Al disminuir el área de ventanas de 34 a 26% el confort térmico incrementa 1,9 puntos. La figura 11 muestra el impacto del índice de vanos en el confort térmico.

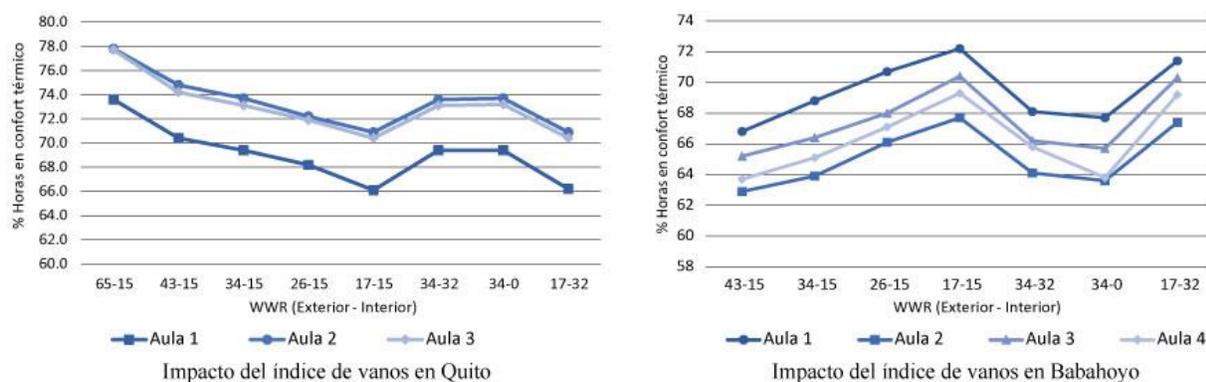


Figura 11. Impacto del índice de vanos en el confort térmico. Fuente: El autor. Elaborado en IESve.

Materiales de la envolvente.- Las fluctuaciones de temperatura interior dependen de la masa térmica y la densidad de los materiales. El comportamiento térmico de las escuelas fue simulado utilizando diferentes materiales, densidades y grosores de elementos; adicionalmente se evaluó el impacto de utilizar aislamiento con poliuretano de 100mm.

En Quito los mejores resultados se obtuvieron utilizando bloques de concreto de mediana densidad con espesor de 300mm. Al aislar las fachadas norte y sur el confort térmico incrementa solo un 0,6%, pero si el aislamiento se aplica en todas las superficies exteriores el confort incrementa 1,8%.

En climas cálidos la estrategia pasiva más eficiente es incrementar la masa térmica a 677kg/m^2 mejorando el confort en 4,3%; utilizando techos ventilados para prevenir la absorción del calor a través de las losas el confort incrementa 1,2% y al generar sombra en el patio central se logra una mejoría del 2,5%. Aislar el edificio no es recomendado ya que aumenta la hermeticidad. La Tabla 3 muestra las variaciones en confort térmico al utilizar diferentes envolventes.

Control solar.- La radiación solar que ingresa a través de las ventanas es la principal causa de sobrecalentamiento. Las celosías son efectivas para controlar la temperatura interior bloqueando la radiación solar directa y controlando el nivel de luz natural.

El modelo prototipo de las escuelas incluye elementos tipo caja de 20 cm de espesor alrededor de las ventanas para proveer sombra al espacio interior. Las simulaciones fueron

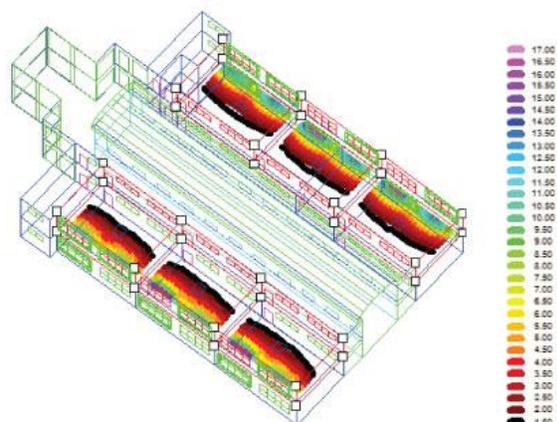
hechas utilizando los índices óptimos de vanos para cada escuela (65 y 15% para Quito; 26 y 15% para Babahoyo).

Tabla 3. Impacto de los materiales de envolvente en confort térmico. Fuente: El autor. Elaborado en IESve.

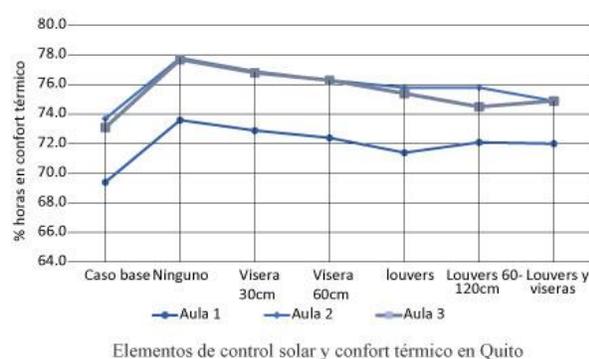
Materiales	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ²)	Horas en confort	
			Quito	Babahoyo
Bloques de concreto liviano	150	175	70,6	66,0
Bloques de concreto pesados	200	327	70,8	69,0
Bloques de concreto pesados	300	467	71,3	68,7
Ladrillo	200	431	70,4	69,2
Ladrillo	300	624	70,8	69,7
Hormigón	300	677	70,2	70,0
Paneles de madera	150	29	-	62,8
Aislamiento en fachadas principales	100		71,2	66,6
Aislamiento en todas las paredes	100		72,4	68,5
Techo ventilado	150		71,1	67,2
Aislamiento en todas las superficies exteriores	100		72,6	68,8

Las estrategias simuladas fueron: louvers horizontales (100x50mm), viseras de diferentes anchos y combinaciones de ambos. La figura 12 muestra las simulaciones iniciales de factor de luz solar y el impacto en el confort térmico con las diferentes estrategias de control solar.

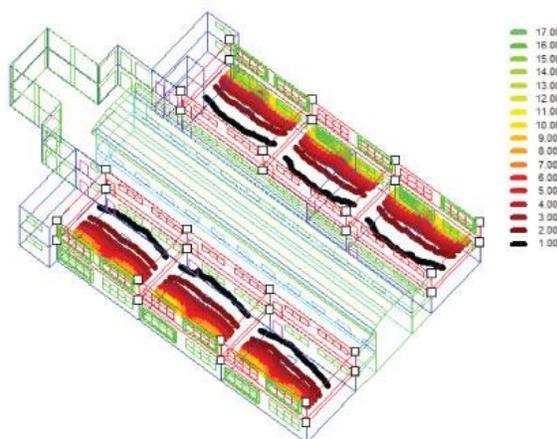
Factor de luz solar en Quito



Impacto de sistemas de control solar en Quito



Factor de luz solar en Babahoyo



Impacto de sistemas de control solar en Babahoyo

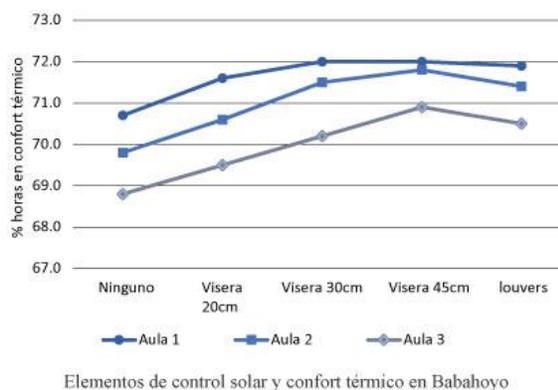


Figura 12. Impacto del control solar en el confort térmico. Fuente: El autor. Elaborado en IESve.

En Quito lo óptimo es utilizar viseras de 30 cm de profundidad combinadas con louvers horizontales en un alto de 120 cm desde el dintel de la ventana. El confort térmico mejora 3,5% y el factor de luz solar disminuye a 2,2. El factor de luz solar fue calculado anualmente utilizando IESve, con condiciones de cielo despejado y una iluminancia horizontal de 43000 lux. Las aulas deben tener por normativa un factor de luz uniforme de 2 puntos, las simulaciones de la escuela prototipo dieron valores de 3,11 en Quito y 3,29 en Babahoyo.

En Babahoyo la estrategia más efectiva son viseras de 30 cm en la planta baja y 45 cm en la planta alta; esto mejora el confort térmico 1% y controla el ingreso de luz solar logrando un factor de luz solar de 2,1

Conclusiones y recomendaciones

Las mediciones en campo reflejaron temperaturas interiores de 17,3 a 20,3°C en Quito y de 28,4 a 34,5°C en Babahoyo; estas fluctúan de acuerdo a la temperatura exterior debido a la falta de aislamiento en las edificaciones. Los alumnos tienen oportunidades limitadas de adaptarse a las sensaciones térmicas, por ejemplo, al estar obligados a utilizar el uniforme escolar, la única adaptación que pueden realizar es ponerse o quitarse el saco. Las encuestas demostraron que las acciones adaptativas se encuentran subdesarrolladas, ya que alumnos que prefieren incrementos en la temperatura no estaban utilizando el saco del uniforme. Es por esto la importancia de garantizar los niveles de confort adecuados en aulas.

Las temperaturas medidas en sitio y los votos térmicos de los alumnos sirvieron para calcular los rangos térmicos de confort y las temperaturas óptimas dentro de las aulas. Se utilizaron los índices PMV/PPD para predecir el confort de los estudiantes. En Quito la predicción térmica (PMV) fue de -0,60 (ligeramente frío) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) es de 13,7%. En Babahoyo los valores son de +2,0 (cálido) y 72,7% respectivamente. Las predicciones sobreestiman la sensación térmica de los estudiantes debido a que el índice PMV/PPD no considera la climatización del ser humano a su ambiente. Los votos térmicos de los estudiantes dieron valores promedios de -0,63 para Quito y +0,44 para Babahoyo.

De manera similar el cálculo del confort adaptativo en concordancia con el estándar EN-15251 dio rangos de confort de 22 a 26°C para Quito y 25,5 a 30,3°C en Babahoyo. Las temperaturas medidas en las aulas en Quito están por debajo del límite inferior de confort, sugiriendo que los estudiantes están siempre inconformes con la temperatura; en Babahoyo, sin embargo, las temperaturas están dentro del confort durante la mañana y solo superan los límites superiores al medio día.

Ambos métodos empíricos sobrestiman las sensaciones térmicas. El método más preciso para establecer los rangos de confort térmico es el análisis estadístico de los votos térmicos de los estudiantes, ya que reflejan parámetros físicos y psicológicos incluyendo la climatización al ambiente local. En ambas escuelas los votos térmicos reflejaron una aceptación del 87,8% a las condiciones interiores en las aulas; sin embargo este valor no refleja las preferencias ni expectativas de los alumnos.

Sobre la base de la simulación dinámica se demostró que la infraestructura construida logra garantizar un confort térmico del 70% en Quito y 64% en Babahoyo; estos valores podrían incrementar a 95 y 80% respectivamente, utilizando los parámetros arquitectónicos evaluados en este estudio. En climas tropicales fríos (Quito) el principal parámetro para controlar la temperatura interior es la hermeticidad de la envolvente; al aumentar la hermeticidad se disminuye el intercambio del aire con el exterior conservando la temperatura interior. En climas

tropicales cálidos (Babahoyo) al aumentar la ventilación permite expulsar el aire cálido del interior; sin embargo, si la temperatura exterior supera el límite de confort la ventilación se vuelve perjudicial.

Parámetros arquitectónicos óptimos sugeridos.- Con los valores óptimos obtenidos previamente para cada parámetro arquitectónico se construyeron dos escenarios integrales, uno para cada situación climática. Las estrategias y los valores utilizados se detallan en la tabla 4. Con la aplicación de estas estrategias se logra un incremento en el confort térmico en Quito del 24,6% y del 16,8% en Babahoyo. Adicionalmente en ambos escenarios se logra un control del factor luz día a 2,25 en todas las aulas.

En Quito, al tener un clima cálido-templado, el principal parámetro para mejorar el confort es la hermeticidad del edificio. Adicionalmente, al incrementar el tamaño de las ventanas y orientar el edificio para recibir la mayor radiación solar los espacios se calientan de manera pasiva.

Para escuelas en climas cálidos, basándose exclusivamente en el índice S/V, lo óptimo es utilizar edificios de una sola planta orientando las fachadas hacia la dirección predominante del viento. Esta variación en el diseño permite un aumento del confort térmico de 14,6%. Sin embargo, al generar un patio central sombreado y exponer las fachadas principales a los vientos predominantes, se obtuvieron mejores resultados. En climas cálidos la ventilación natural es el principal factor para controlar la temperatura interior, al permitir al edificio ventilarse durante la noche se expulsa todo el calor retenido durante la mañana.

Tabla 4. Escenarios integrales. Fuente: El autor. Elaborado en IESve.

Parámetros arquitectónicos	Escenario Quito	Escenario Babahoyo
Indice de infiltración (ach)	0,5	4,0
Orientación eje principal	N-S	NO-SE
Indice de vanos fachada exterior (%)	65	26
Indice de vanos fachada interior (%)	15	15
Área operable de ventanas exteriores (%)	30	90
Área operable de ventanas interiores (%)	50	90
Densidad envolvente (kg/m ²)	467	677
Aislamiento exterior (mm)	100	NO
Control solar	Louver Viseras 30cm	Viseras 30cm PB Viseras 45cm PA
Patio interior	Abierto	Cubierto y sombreado
Ventilación nocturna		On °T>25°C
Techo ventilado		Construcción en doble capa
% confort térmico	95,2%	80,6%

Referencias

- Ashrae. (2013). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: Ashrae.
- Cedeño, J. & Donoso, M. (2010). *Atlas pluviométrico del Ecuador*. Guayaquil: Unesco.
- Astorga, A. (2012). *Unidades Educativas del Milenio: entre la escuela monumental y un nuevo modelo*. (1ª. ed). Quito: Contrato Social por la Educación. Consultado el 16 de junio, 2018.

- Recuperado de:
<http://contratosocialecuador.org/images/publicaciones/informes/unidadeseducativasdelmilenio.pdf>
- CITEC UBB (2011). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. Chile: Universidad del Bío-Bío.
- Ecuador Inmediato. (2016). *Las escuelas del milenio a debate*. Consultado el 6 de junio de 2018. Recuperado de:
http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=2818810718.
- Fundación 1000 Hojas. (2016). *Los desafortunados errores técnicos y políticos de la Escuela del Milenio de Pedernales*. [Versión electrónica] Consultado el 16 de junio de 2018. Recuperado de:
<http://milhojas.is/612403-los-desafortunados-errores-tecnicos-y-politicos-de-la-escuela-del-milenio-de-pedernales.html>.
- Humphreys, M. A. (1977). "A Study of the Thermal Comfort of Primary School Children in Summer". *Building and Environment*, (12), (pp. 231-239).
- Ministerio de Educación. (2014). *Normas técnicas y estándares de infraestructura educativa*. (1ª. ed.). Quito: s.n.
- Ministerio de Educación. (2018). *Ministerio de Educación*. Consultado el 16 de junio de 2018. Recuperado de: <https://educacion.gob.ec/caracteristicas/>.
- Nyuk, H. W. & Shan Shan, K. (2003). *Thermal Comfort in Classrooms in the Tropics*. *Energy and Buildings*, (85), (pp. 321-328).
- Olgay, V. & De Irisarri, E. (1968). *Clima y arquitectura en Colombia*, (1ª. ed.). Cali: Carvajal y Cia.
- Teli, D., Jentsch, M. & James, P. (2014). "The Role of a Building's Thermal Properties on Pupil's Thermal Comfort in Junior School Classrooms As Determined in Field Studies". *Building and Environment*.
- Torres, R. M. (2015). *Proyecto arquitectónico sin proyecto pedagógico: visita a una Unidad Educativa del Milenio, Ecuador*. s.n. [Versión electrónica] Consultado el 16 de junio de 2018. Recuperado de: <http://otra-educacion.blogspot.com/2012/01/proyecto-arquitectonico-versus-proyecto.html>
- Torres, R. M. (2017). *Elefantes blancos: La estafa social de las escuelas del milenio Ecuador*. Consultado el 16 de junio de 2018. Recuperado de: <http://otra-educacion.blogspot.com/2017/03/elefantes-blancos-la-estafa-social-de-las-UEM.html>
- Trebilcock, M. (2014). *Thermal Comfort and Energy Efficiency in School Buildings*. Nottingham: The university of Nottingham.
- Zahiri, S., Altan & Hasim. (2016). "The Effect of Passive Design Strategies on Thermal Performance of Female Secondary School Buildings during Warm Season". *A Hot And Dry Climate. Frontiers in Built Environment*, 2(3).
- Zomorodian, Z. & Nasrollahi, F. (2013). "Architectural Design Optimization of School Buildings for Reduction of Energy Demand in Hot and Dry Climates of Iran". *Internation Journal of Architectural Engineering and Urban Planning*, 23(1), (pp. 41-50).
- Zomorodian, Z.; Tahsildoost, M. & Hafezi, M. (2016). "Thermal Comfort in Educational Buildings: A Review Article". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (59), (pp. 895-906).