

**Relaciones entre confort acústico y térmico en espacios urbanos abiertos
de la ciudad de São Paulo**

Leonardo Marques Monteiro

Profesor Asociado, USP, Brasil
leo4mm@usp.br

RESUMEN

Los problemas relacionados con el entorno urbano son diversos, entre los que podemos destacar, a nivel de experiencias sensoriales, as cuestiones térmica y acústica. El objetivo de esta investigación es determinar el impacto simultáneo de los ambientes térmicos y acústicos en la percepción térmica y sonora de usuarios de espacios urbanos abiertos. La originalidad y relevancia científica del trabajo se destaca en la medida en que las investigaciones específicas de cuantificación del confort que se relacionan simultáneamente con las variaciones urbanas en el entorno térmico y acústico en espacios abiertos son incipientes. El método utilizado es inductivo experimental, mediante levantamientos de diferentes ambientes térmicos y sonoros y variables subjetivas, sustentado en un método deductivo computacional, realizando simulaciones de modelos predictivos, mediante índices de confort. Las encuestas se realizaron con poblaciones heterogéneas en diferentes situaciones urbanas reales de la ciudad de São Paulo, cubriendo diferentes condiciones térmicas y acústicas en veinte localidades de ocho regiones diferentes en varios días representativos de verano e invierno, totalizando la aplicación de aproximadamente 6500 cuestionarios válidos. Los resultados se basan en la relación entre la temperatura equivalente percibida, el nivel de presión sonora equivalente y el porcentaje de personas en confort. Así, se establecieron rangos de intervalo de las dos primeras variables en relación a los porcentajes de la tercera, permitiendo verificar las situaciones en las que se brinda confort térmico y acústico de manera integrada en los espacios abiertos de la ciudad de São Paulo.

PALABRAS CLAVE: confort acústico, confort térmico, espacios urbanos abiertos.

INTRODUCCIÓN

Gran parte del trabajo de investigación sobre modelización teórica y verificación experimental del confort ambiental está dirigido a aplicaciones para entornos cerrados. Las condiciones ambientales internas están más controladas y sujetas a intervenciones con los habituales sistemas de acondicionamiento pasivo y activo. En los espacios abiertos, en cambio, las variables ambientales también están sujetas a condicionamientos, pero el control es sustancialmente menor, debido a la ausencia, parcial o total, de confinamiento (HÖPPE, 2002). A la especificidad de la ausencia de confinamiento ambiental, existen otros entornos externos, como las actividades realizadas y las distintas expectativas y tolerancias de los usuarios (MONTEIRO, 2018).

Considerando que la calidad de vida urbana se basa en gran medida en las características del entorno construido y su infraestructura, brindando mejores condiciones para el uso de los espacios urbanos abiertos, ya sea para las actividades diarias de tránsito o para las actividades permanentes relacionadas con el ocio, enriquece la experiencia de vida en las ciudades, aumentando las posibilidades de socialización y uso efectivo de los espacios públicos urbanos (BLAZEJCZYK, 2001).

Al mismo tiempo, la dinámica de los grandes centros urbanos ha apuntado a las ciudades como representantes de la crisis ambiental. Los problemas relacionados con el entorno urbano son variados, entre los que podemos destacar, en cuanto a experiencias sensoriales, los aspectos térmicos y acústicos. El primero tiende a aumentar en los trópicos debido a las perspectivas de futuro predichas por los escenarios de cambio climático (IPCC, 2021). Respecto al segundo, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) afirma que en la actualidad la contaminación acústica es, después de la contaminación del agua, el problema ambiental que afecta a la salud del mayor número de personas en las ciudades.

La complejidad de las cuestiones térmicas y acústicas no se limita a comprender los mecanismos fisiológicos del cuerpo humano (AUERBACH, 2007), sino que también engloba cuestiones de comportamiento subjetivas en términos de expectativa, percepción y apropiación de los entornos urbanos al aire libre, que pueden dar lugar a diferentes formas de adaptación, como afirman Monteiro y Alucci (2012). Para posibilitar oportunidades adaptativas en espacios abiertos urbanos, es necesario que estos ambientes estén diseñados para múltiples situaciones de apropiación del espacio, con soluciones arquitectónicas-paisajísticas adecuadas. Por tanto, es necesario verificar no solo las condiciones térmicas y acústicas de estos ambientes, sino también el efecto cruzado de estas variables sobre la sensación térmica y sonora y, en consecuencia, sobre la sensación de confort ambiental.

Hay una serie de trabajos centrados en la relación entre el ambiente térmico urbano y las sensaciones térmicas, y otro en las respectivas relaciones acústicas. Así, existen varios trabajos específicos que consideran el confort térmico en espacios urbanos abiertos (PICKUP E DE DEAR, 2000; NIKOLOPOULOU *et al.*, 2004; JENDRITZKY E DE DEAR, 2009; MONTEIRO AND ALLUCI, 2011; JENDRITZKY *et al.*, 2012; LAM *et al.*, 2016; KRÜEGER *et al.*, 2017; LENZHOLZER *et al.*, 2018) y muchos otros que consideran el confort acústico en esta misma tipología de espacios (PEREIRA, 2003; KANG *et al.*, 2004; YANG E KANG, 2005; IRVINE *et al.*, 2009; YU Y KANG, 2010; KANG Y ZHANG, 2010; GOZALO *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019).

Incluso se observa que algunos trabajos de mayor alcance, como los de Nikolopoulou (2004), evalúan diferentes ambientes, verificando aspectos térmicos, sonoros y lumínicos en espacios abiertos sin, sin embargo, correlacionarlos. También hay trabajos brasileños, como el de Spignardi y Monteiro (2018), que señala la relación entre las variables microclimáticas y la movilidad urbana, o el de Monteiro (2018), que verificó la influencia de algunos aspectos acústicos en la percepción térmica en espacios urbanos abiertos, explorando ambientes térmicos y acústicos a través de un modelo participativo de adquisición de respuestas (MONTEIRO *et al.*, 2017).

También hay trabajos de investigación internacionales que comienzan a perfilar relaciones más efectivas entre aspectos acústicos y térmicos. Larriva e Higueiras (2020) afirman que las personas mayores pueden estar en riesgo por estrés térmico y altos niveles de ruido en las ciudades, señalando que faltan índices térmicos y acústicos para la población anciana urbana. Indican que el confort térmico en espacios abiertos para adultos mayores en Madrid se encuentra entre 15,9 °C y 21,9 °C, apuntando a alguna relación cualitativa entre la percepción térmica y acústica de los mayores. Lau y Choi (2021) afirman que la calidad ambiental percibida tiene una influencia considerable en la percepción térmica, estando la sensación térmica asociada negativamente con la acústica. También indican que las personas se sienten más cómodas térmicamente si están satisfechas con la acústica y, por tanto, en un ambiente tranquilo, parecen demostrar una mayor tolerancia y menos sensibilidad a los problemas térmicos.

En el panorama brasileño, Valques *et al.* (2007) plantean una serie de variables relacionadas con el confort ambiental en espacios urbanos abiertos, pero tampoco las correlacionan, proponiendo un índice directamente basado en la sensación de los usuarios. Hirashima (2014) y Hirashima *et al.* (2013) analizan, a partir de datos recogidos en dos plazas de Belo Horizonte durante el verano, la respuesta de los usuarios de espacios urbanos abiertos en

relación a la percepción sonora y térmica, con base en Hirashima *et al.* (2011) y que se llevó a cabo con una propuesta relacionada con aspectos del paisaje sonoro local. Monteiro y col. (2014) y Novaes y Monteiro (2015) presentan resultados que indican que el confort peatonal se define tanto por el confort térmico como acústico, que parecen interferir en la percepción de los demás. En el caso específico de las encuestas realizadas en São Paulo, los autores afirman que el confort peatonal se caracteriza más por el ambiente térmico, siendo el confort acústico más influenciado por el confort térmico que a la inversa, indicando, principalmente, que el malestar térmico lleva al mínimo tolerancia al ruido.

Considerando la intersección de los ambientes sonoros y térmicos en la percepción del confort, estos conjuntos de obras parecen ser los primeros a nivel nacional en considerar, al mismo tiempo, las cuestiones térmicas y acústicas en los espacios urbanos abiertos. La revisión de la literatura científica, por tanto, no apuntó a otros estudios que se centraran específicamente en la interacción del confort térmico y acústico en espacios abiertos urbanos con otros aspectos relacionados con la percepción ambiental, aunque varios de los autores mencionados, trabajando en el campo de la investigaciones sobre el entorno construido, señalan la necesidad de realizar estudios al respecto.

Por otro lado, se observaron a nivel internacional estudios específicos para ambientes cerrados que alcanzan la proposición de índices, con algunos estudios que correlacionan variables de ambiente térmico y sonoro con el confort del usuario. Pellerin y Candas (2003) consideran el efecto combinado de temperatura y ruido para verificar el nivel de malestar humano. Para la realización de esta investigación se utilizó una cámara climatizada en la que se expuso a individuos al frío (14 a 19 °C) o al calor (29 a 34 °C) y diferentes condiciones de ruido (35 a 85 dB). Las conclusiones del trabajo indican que el ruido altera el confort en condiciones más cálidas. Nagano y Horikoshi (2005; 2011) proponen un nuevo índice de confort que combina condiciones ambientales de baja temperatura (cuatro valores para la temperatura de funcionamiento) y ruido del tráfico (cinco niveles sonoros), simulado en una cámara de pruebas configurada con la provisión de un pequeño escritorio. Los datos fueron tratados estadísticamente y propuestas aisladas, considerando temperaturas de operación y niveles sonoros equivalentes para la lectura del índice de confort.

A diferencia de estas investigaciones, enfocadas en ambientes cerrados y realizadas de manera de laboratorio (en cámaras específicas que simulan ambientes), esta investigación tiene como objetivo verificar la correlación entre resultados de evaluaciones térmicas y acústicas, obtenidos a través de levantamientos de campo con poblaciones heterogéneas en situaciones urbanas reales. , en la ciudad de São Paulo, desarrollando una propuesta con un corte aún no explorado adecuadamente, que engloba diferentes condiciones ambientales, térmicas y acústicas del entorno urbano.

OBJETIVO

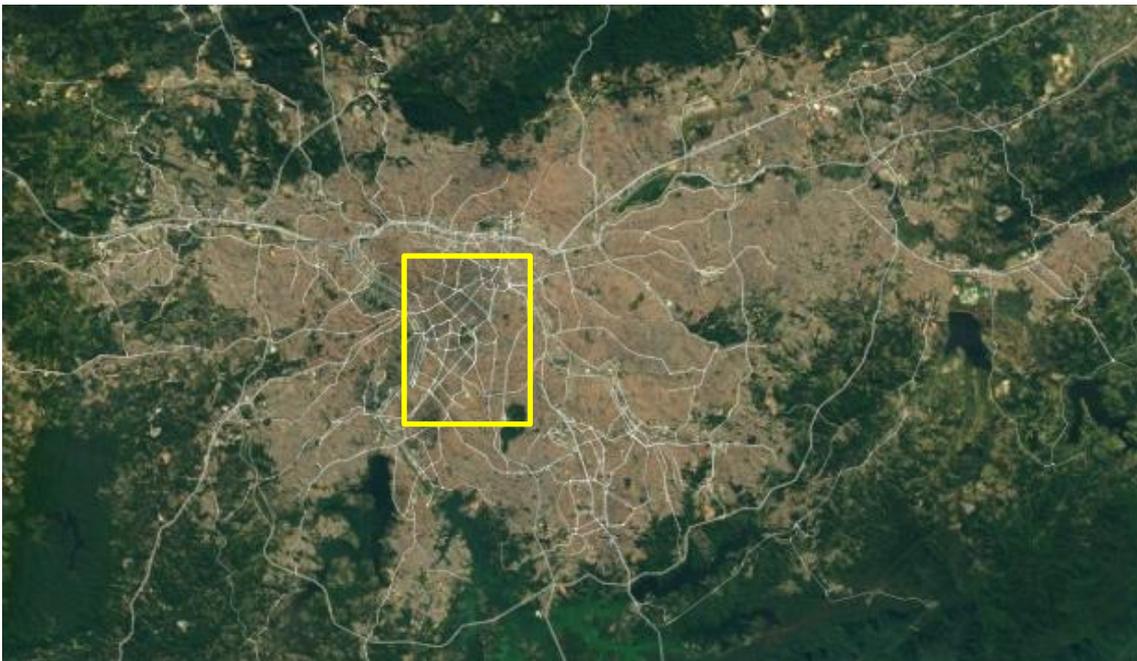
El objetivo de esta investigación es determinar el impacto simultáneo de los ambientes térmico y acústico en la percepción térmica y sonora de los usuarios de los espacios urbanos abiertos de la ciudad de São Paulo.

METODOLOGÍA

El método utilizado es inductivo experimental, mediante levantamientos de campo de las variables del entorno térmico, acústico y subjetivo, apoyado en un método deductivo computacional, con simulaciones de modelos predictivos utilizando índices de confort. Los resultados del estudio experimental y computacional subvencionan las verificaciones comparativas en términos de sensación térmica y acústica a través de un método correlativo. Las encuestas se realizaron con poblaciones heterogéneas en diferentes situaciones urbanas reales de la ciudad de São Paulo, cubriendo diferentes condiciones térmicas y acústicas en nueve localidades en diferentes días durante cinco años, totalizando la aplicación de aproximadamente 3400 cuestionarios.

La Figura 1 muestra la región metropolitana de São Paulo y, resaltada, el área donde se realizaron las encuestas. La Figura 2 muestra la ubicación de las ocho regiones que fueron encuestadas empíricamente en la ciudad de São Paulo.

Figura 1: Región Metropolitana de São Paulo con énfasis en el área de encuestas

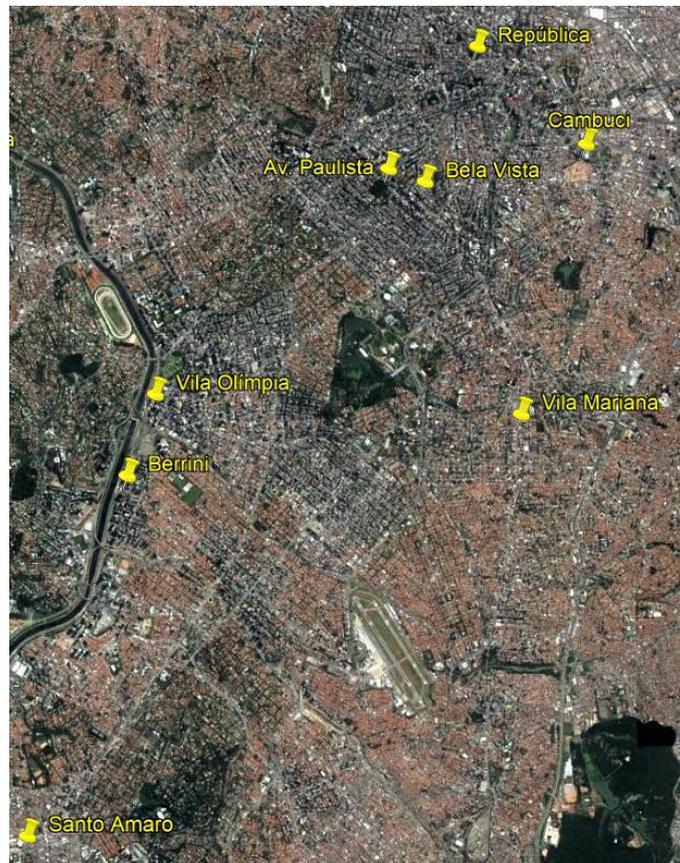


En la Tabla 1 se muestran estas mismas regiones encuestadas empíricamente, con los diferentes ambientes tipológicos encuestados en cada una, los usos predominantes y los períodos en los que se realizaron las encuestas (verano y/o invierno).

Cuadro 1: Localidades encuestadas empíricamente en la ciudad de São Paulo

región	tipología	uso predominante	encuestas
Cambuci	aceras, en dos lugares	paso	prueba
Bela Vista	aceras, en dos lugares	paso	verano
Vila Mariana	aceras, en dos lugares	paso	invierno
Vila Olímpia	aceras, en tres lugares	paso	verano e invierno
Berrini	aceras, en tres lugares	paso	verano e invierno
Santo Amaro	aceras, en tres lugares	paso	verano e invierno
Av. Paulista	aceras, en dos lugares, y patio	estancia y paso	verano e invierno
República	aceras, en dos lugares, y cuadrado	estancia y paso	verano e invierno

Figura 2: Regiones encuestadas empíricamente en la ciudad de São Paulo



Las variables ambientales consideradas en esta investigación fueron microclimáticas y acústicas, siendo: temperatura del aire (t_{ar}), humedad relativa (ur), velocidad del aire (v_{ar}), temperatura radiante media (t_{rm}) y nivel de presión sonora equivalente ($L_{Aeq, 1 \text{ min}}$).

El relevamiento de variables microclimáticas se realizó de acuerdo con la norma ISO 7726 (1998), siguiendo las recomendaciones de Monteiro y Alucci (2005). En acústica se

siguieron las recomendaciones de la norma NBR 10151, de ABNT (2000), siguiendo las recomendaciones de Hirashima *et al.* (2013).

Las mediciones acústicas se realizaron mediante lecturas de nivel de presión sonora ponderadas por filtro (A), a 1,2 m del suelo, en tiempo de respuesta rápido (rápido), utilizando un medidor de nivel de presión sonora Bruel & Kjaer 2232, Tipo I, con dispositivo de protección contra el viento. El instrumento presenta un rango de medición de 34 a 130 dB, una precisión de 0,3 dB y una resolución de 0,1 dB. A continuación, se calculó el nivel de presión sonora equivalente según la norma NBR 10151, de ABNT (2000), siguiendo la Ecuación 1.

Ecuación 1 $L_{Aeq} = 10 \log [(1/n) \sum 10^{(L_i/10)}]$

dónde:

L_{Aeq} = nivel de presión sonora equivalente, en dB (A);

L_i = nivel de presión sonora instantáneo, en dB (A);

n = número de mediciones instantáneas, con \sum de $i = 1$ a $i = n$, con $n = 60$.

Las mediciones térmicas utilizaron sensores de temperatura del aire RTD de platino, con un rango de lectura de 40 °C a +60 °C, resolución de 0,1 °C, precisión de $\pm 0,2$ °C a 20 °C, $\pm 0,4$ °C a -20 °C / 60 °C y $\pm 0,5$ a -40 °C y tiempo de respuesta de 0,15 °C / s.

Los sensores de humedad relativa son capacitivos, con un rango de lectura de 0% a 100% (sin condensación), resolución de 0,1%, precisión de $\pm 2\%$ (a 20 °C, entre 0% y 90%) y $\pm 3\%$ (a 20 °C, entre 90% y 100%), y un tiempo de respuesta de 15 segundos, a 20 °C, para un cambio del 90%.

El sensor de velocidad del viento es ultrasónico bidimensional, con un rango de lectura de 0 a 60,0 m/s, una resolución de 0,01 m/s, una precisión de $\pm 2\%$ a 12 m/s y un tiempo de respuesta de 0,25s.

El sensor de radiación solar es termopila, con un rango de funcionamiento de -40 °C a +80 °C, sensibilidad de 200 a 2800 nm, irradiancia máxima de 2000 W/m² y precisión de $\pm 2,5\%$, de 0 a 1000 W / m².

En cuanto a la temperatura radiante media, esta se estimó a partir de las medidas de temperatura del globo, utilizando globos de 10 o 17 cm de diámetro, según la encuesta, gris mate medio, con una emisividad de aproximadamente 0,9. Para determinar la temperatura del aire en el centro del globo, se utilizaron sensores tipo semiconductor, con un rango de lectura de -20 °C a +60 °C, resolución de 0,1 °C, precisión de $\pm 0,4$ °C y tasa de respuesta de tiempo de 0,1 °C/s. En cuanto al rendimiento del sistema, según ISO 7726 (1998), el tiempo de respuesta de un termómetro de globo es de 20 a 30 minutos, dependiendo de las características del globo y del medio ambiente.

A partir de la temperatura del aire y la humedad relativa, se obtiene la presión de vapor parcial. Para su cálculo se adoptaron las siguientes definiciones y consiguientes formulaciones: la humedad relativa caracteriza la cantidad de vapor de agua en el aire en relación a la cantidad máxima que se puede mantener, a una temperatura determinada; la presión parcial del vapor de agua en el aire húmedo es la presión que ejercería el vapor si solo ocupara el volumen que ocupa el aire húmedo a la misma temperatura; y la humedad absoluta caracteriza la cantidad de vapor de agua en el aire.

De esta forma, la presión parcial de vapor se determina a partir de la humedad relativa y la temperatura del aire, según las ecuaciones 2 a 6.

Ecuación 2 $ur = 100 \cdot p_v / p_{v,s}$
Ecuación 3 $p_{v,s} = 0,611 \cdot \exp [17,27 \cdot t_{ar} / (t_{ar} + 237,3)]$
Ecuación 4 $p_v = [(p_{atm} / 0,622) / \omega_{ar}] + 1$
Ecuación 5 $\omega_{ar} = m_v / m_a$
Ecuación 6 $p_v = 6,11 \cdot 10^{-3} \cdot ur \cdot \exp [17,27 \cdot t_{ar} / (t_{ar} + 237,3)]$

dónde:

ur = humedad relativa, en %;
 p_v = presión parcial de vapor de agua, en kPa;
 $p_{v,s}$ = presión de saturación del vapor de agua, en kPa;
 t_{ar} = temperatura del aire, en °C;
 p_{atm} = presión atmosférica total, en kPa;
 ω_{ar} = humedad absoluta, en kg de agua / kg de aire seco;
 m_v = masa de vapor de agua, en kg;
 m_a = masa de aire seco, en kg.

Para considerar la fluctuación de la velocidad del viento se determinó la desviación estándar de la muestra, luego se calculó la intensidad de la turbulencia (it), en porcentaje, según las ecuaciones 7 y 8.

Ecuación 7 $dp = [1 / (n-1)]^{1/2} \cdot \Sigma (v_{ar,i} - v_{ar})^2$
Ecuación 8 $it = 100 \cdot dp / v_{ar}$

dónde:

dp = desviación estándar;
 n = número de medidas instantáneas, con Σ de $i = 1$ a $i = n$;
 it = intensidad de la turbulencia, en %.

Para calcular la temperatura media radiante se realizó el balance de intercambios térmicos entre el globo y el ambiente en cuestión, considerando la temperatura del aire en el centro del globo, la temperatura del aire y la velocidad del aire en el ambiente.

Como resultado, existen las formulaciones, respectivamente para convección natural y convección forzada, presentadas en las ecuaciones 9 y 10.

Ecuación 9 $t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 + [(0,25 \cdot 10^8) / \epsilon_g] \cdot (|t_g - t_{ar}| / D)^{1/4} \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273$
Ecuación 10 $t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 + [(1,1 \cdot 10^8 \cdot v_{ar}^{0,6}) / (\epsilon_g \cdot D^{0,4})] \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273$

dónde:

t_{rm} = temperatura radiante media, en °C;
 t_g = temperatura del globo, en °C;
 ϵ_g = emisividad del globo, adimensional
 D = diámetro del globo, en m;
 v_{ar} = velocidad del aire, en m/s.

El cuestionario para sondear las respuestas acústicas subjetivas se realizó a partir de Fields *et al.* (2001), que informa el trabajo de la Comisión Internacional para los Efectos

Biológicos del Ruido y la ISO 15666 (2003), que especifica un método para medir las molestias causadas por el ruido a través de la investigación socioacústica.

Para la parte térmica, se realizó a partir de la adaptación de los cuestionarios utilizados en las encuestas empíricas de Monteiro (2008), que se basó en los principios establecidos por la norma ISO 10551 (1995), que trata específicamente del método de adquisición respuestas subjetivas relacionadas con el ambiente térmico.

Es de destacar que, en cuanto a las preguntas, se realizaron alternativamente las específicas de acústica o térmica, luego se realizó el otro conjunto de especificidades y finalmente las de caracterización personal (lugar de origen y época de residencia en São Paulo). . También se anotó el aislamiento térmico de la ropa (I_{clo}), el color predominante (claro, medio u oscuro), la edad aproximada, sexo, tipo de actividad (sentado, de pie, caminar, ejercitarse) y el tiempo de la entrevista.

La Figura 3 muestra los ítems presentes en los cuestionarios que se consideran en este trabajo.

Figura 3: Cuestionario de percepción y preferencia de sensaciones acústicas y térmicas

-
1. Ahora mismo, soy:
 cómodo incómodo
 2. Ahora mismo, en mi opinión estar en este lugar es:
 tolerable intolerable
 3. Ahora mismo, el ruido es:
 muy bajo bajo poco bajo normal poco alto alto muy alto
 4. Ahora mismo, con respecto al ruido, soy:
 cómodo incómodo
 5. Ahora mismo, preferiría que el ruido sea:
 mucho más bajo más bajo un poco más bajo sin cambia un poco más alto más alto mucho más alto
 6. Ahora mismo, con respecto al ruido, en mi opinión estar en este lugar es:
 tolerable intolerable
 7. Ahora mismo, el entorno es:
 muy frío frío poco frío neutro poco caliente caliente muy caliente
 8. Ahora mismo, con respecto al frío / calor, soy:
 cómodo incómodo
 9. Ahora mismo, preferiría que el entorno sea:
 mucho más frío más frío un poco más frío sin cambia un poco más caliente más caliente mucho más caliente
 10. Ahora mismo, con respecto al frío / calor, en mi opinión estar en este lugar es:
 tolerable intolerable
-

Los datos recopilados se trataron de la siguiente manera. Para evaluar las condiciones acústicas de los ambientes, se consideró el nivel sonoro equivalente ponderado por el filtro A (L_{Aeq}), como ya se presenta en la Ecuación 1. Para evaluar las condiciones térmicas de los ambientes, las variables relacionadas con este ambiente se consideraron juntas a través de la temperatura equivalente percibida (TEP), propuesta originalmente por Monteiro (2008), considerando específicamente los datos recolectados empíricamente en la ciudad de São Paulo, siguiendo la Ecuación 11.

Ecuación 11 $TEP = -3,777 + 0,4828 \cdot t_{ar} + 0,5172 \cdot t_{rm} + 0,0802 \cdot ur - 2,322 \cdot v_{ar}$

dónde:

TEP = temperatura equivalente percibida, en °C;

t_{ar} = temperatura del aire, en °C;

t_{rm} = temperatura radiante media, en °C;

ur = humedad relativa, en %;

v_{ar} = velocidad del aire, en m/s.

A continuación, se consideran los resultados encontrados para la percepción del ambiente acústico y térmico, realizando análisis y discusión.

RESULTADOS

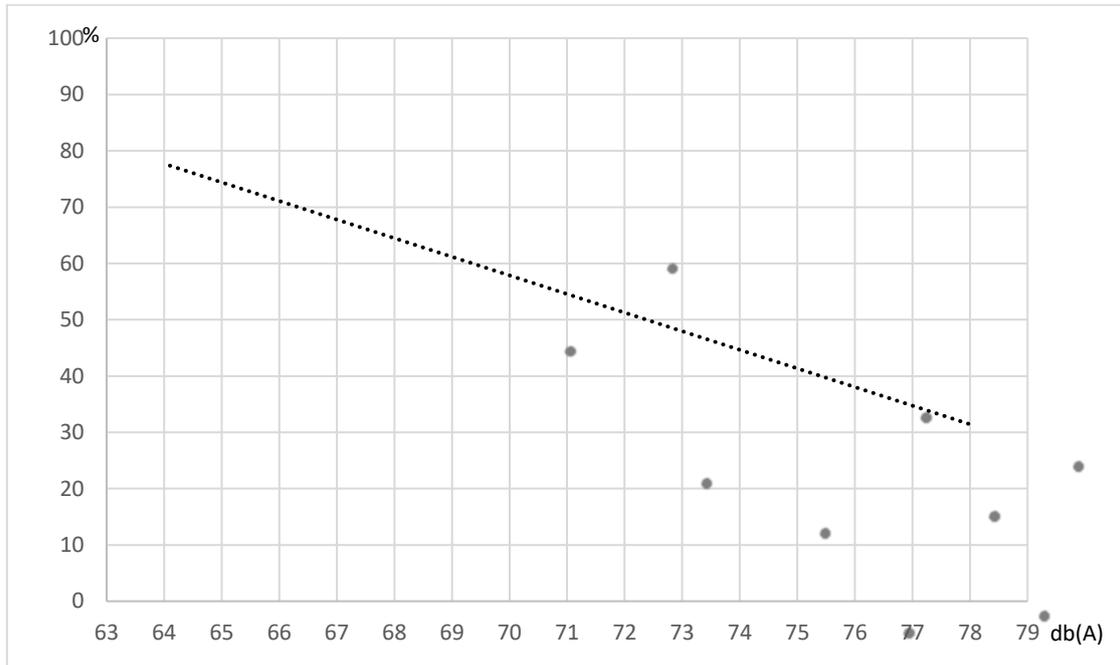
Los resultados consideraron 102 situaciones ambientales diferentes. Levantas dos localizaciones en Cambuci que se utilizaron como pre-test y se descartaron.

Se recogieron y utilizaron datos de dos localidades en Bela Vista en situación de avistamiento y otras dos en Vila Mariana en situación de invierno, cada una durante tres horas al año o jornadas largas (mañana, almuerzo y tarde), realizando 6 situaciones ambientales diferentes en cada una región. En relación a Vila Olímpia, Berrini, Santo Amaro, Av. Paulista y República, se recogieron y utilizaron datos de tres localidades para cada situación de verano e invierno tres veces durante el día (mañana, almuerzo y tarde), totalizando 18 situaciones atmosféricas diferentes en cada región.

Los horarios de mañana, almuerzo y tarde se refieren, respectivamente, a encuestas con intervalos de aproximadamente 8:00-10:00, 12:00-14:00 y 16:00-18:00. Para cada número de 102 situaciones ambientales diferentes, se aplicó un promedio de 64,41 preguntas válidas, totalizando 6.570.

La figura 4 muestra la relación entre el nivel sonoro equivalente ponderado por el filtro A (L_{Aeq}) y el porcentaje de personas que declararon estar en confort acústico.

Figura 4: Nivel de sonido equivalente, en dB (A), y personas en confort acústico, en%



La línea de tendencia que se muestra en la Figura 4 se puede representar mediante la Ecuación 12.

Ecuación 12 $\%CA = -3,305 L_{Aeq} + 289,22$

con $r^2 = 0,37$; $p < 0,05$

dónde:

$\%CA$ = número de personas en confort acústico, en %;

L_{Aeq} = nivel de sonido equivalente, en db(A);

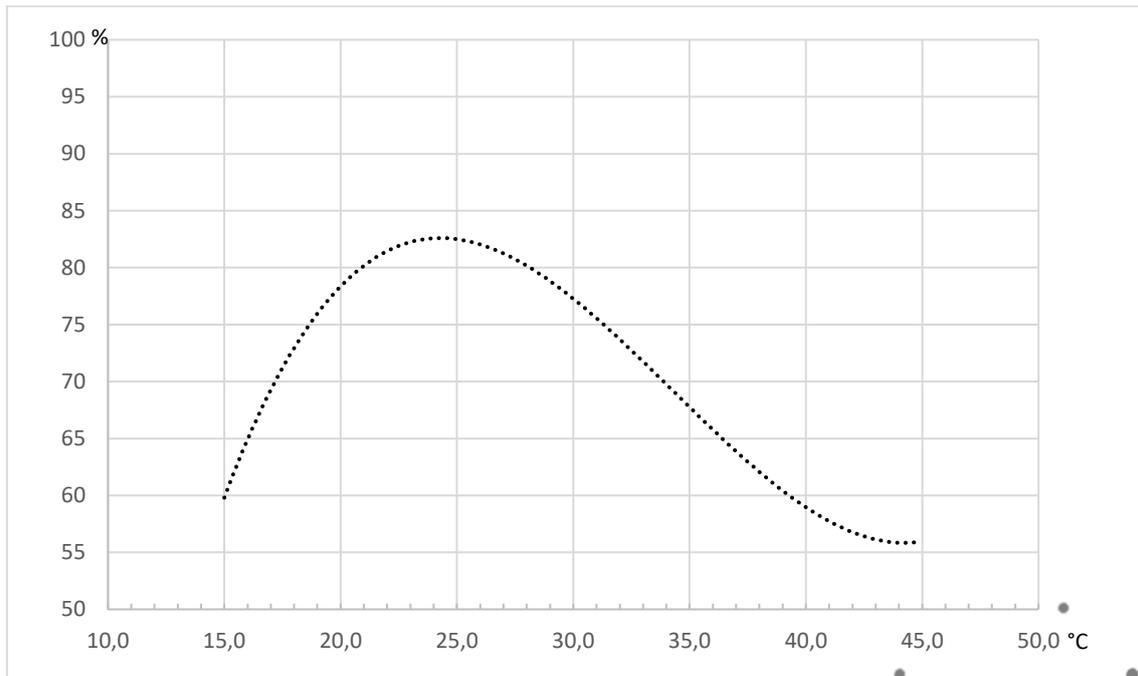
Verificando, en la Figura 4, los diferentes niveles de presión sonora equivalente, se observa que la variación porcentual de personas en confort acústico para niveles sonoros cercanos es considerable. Es de destacar que las encuestas consideraron únicamente valores de nivel sonoro entre aproximadamente 64 y 78 dB (A), niveles que se encuentran comúnmente en espacios urbanos abiertos en lugares con vitalidad urbana en la ciudad de São Paulo. De todos modos, aunque se necesitan estudios con un rango de valores más amplio, se pueden hacer algunas consideraciones sobre la tendencia encontrada, que presenta una correlación lineal significativa baja entre la muestra de situaciones ambientales y los porcentajes de personas en confort acústico en cada situación.

Se observa que por encima de 66 dB (A) ya hay menos del 70% de personas en confort acústico, aunque claramente muchas situaciones observadas con niveles de ruido más elevados han proporcionado porcentajes de confort acústico superiores, especialmente entre 80 y 90% hasta situaciones con niveles de 70 db (A). También se comprueba que a partir de 78 db (A), menos del 30% de las personas se encuentran en confort acústico. Aquí se observa que a partir

de los 73 db (A) ya se encuentran situaciones en las que menos del 30% de las personas se encuentran en confort acústico, sin embargo alrededor de este nivel sonoro también hay ocurrencias entre el 60 y el 70%.

La Figura 5 muestra la relación entre la temperatura equivalente percibida (TEP), calculada a partir de las variables microclimáticas encuestadas empíricamente, y el porcentaje de personas que informaron estar en confort térmico.

Figura 5: Temperatura equivalente percibida (TEP), en °C, y personas en confort térmico, en %



La línea de tendencia que se muestra en la Figura 5 se puede representar mediante la Ecuación 13.

Ecuación 13 $\%CT = 0,0067 TEP^3 - 0,6915 TEP^2 + 21,69 TEP - 132,64$

con $r^2 = 0,75$; $p < 0,05$

dónde:

$\%CT$ = quantidade de pessoas em conforto térmico, em %;

TEP = temperatura equivalente percebida, em °C;

Se observa, en la Figura 5, que la tendencia encontrada para los ambientes térmicos presenta correlación polinomial de tercer grado significativa media / alta. Observando los valores de TEP, se puede apreciar que entre 21° C y 28° C hay una tendencia a tener más del 80% de personas en confort térmico. Es de destacar que entre el rango más restringido de 23 °C y 25 °C existen situaciones específicas en las que se dan varias ocurrencias de más del 85% de personas en confort térmico.

La línea de tendencia muestra que no existe una distribución normal en la muestra utilizada, posiblemente explicado por el hecho de que situaciones ambientales más frías en la ciudad de São Paulo no causan el mismo malestar que situaciones ambientales más cálidas. Se observa que para valores de TEP por debajo de 15 °C, existe una tendencia a tener menos del 60% de personas en confort térmico. El mismo porcentaje se encuentra para valores superiores a 39 °C. También se observa que a partir de 44 °C se tiende a mantener aproximadamente al 55% de las personas en confort térmico. A partir de estas observaciones, se desprende que, del rango de mayor neutralidad, la tolerancia al frío es menor, disminuyendo el porcentaje de personas en confort más rápido que en los casos de calor, en los que hay una decadencia más leve, es decir, con mayor tolerancia a situaciones de calor.

Como se observa comparativamente, el confort térmico considerado en función de la TEP asume una pequeña variación de valores, con fluctuaciones menores que en el caso del confort acústico, indicando una desviación estándar baja y un índice de correlación alto, como ya se verificó. El confort acústico considerado en función de L_{Aeq} , en cambio, presenta mayores variaciones, indicando una mayor desviación estándar y una baja correlación, como también se verificó.

Así, se puede afirmar que las variables ambientales térmicas, consideradas en conjunto a través del TEP, determinan cuantitativamente mejor la predicción del confort térmico en comparación con el nivel de presión sonora en la predicción del confort acústico. Es decir, se puede plantear la posibilidad de que el confort térmico esté menos influido por otras condiciones ambientales, mientras que el confort acústico parece estar más influido por otras condiciones o incluso por condiciones ambientales acústicas, de carácter cualitativo.

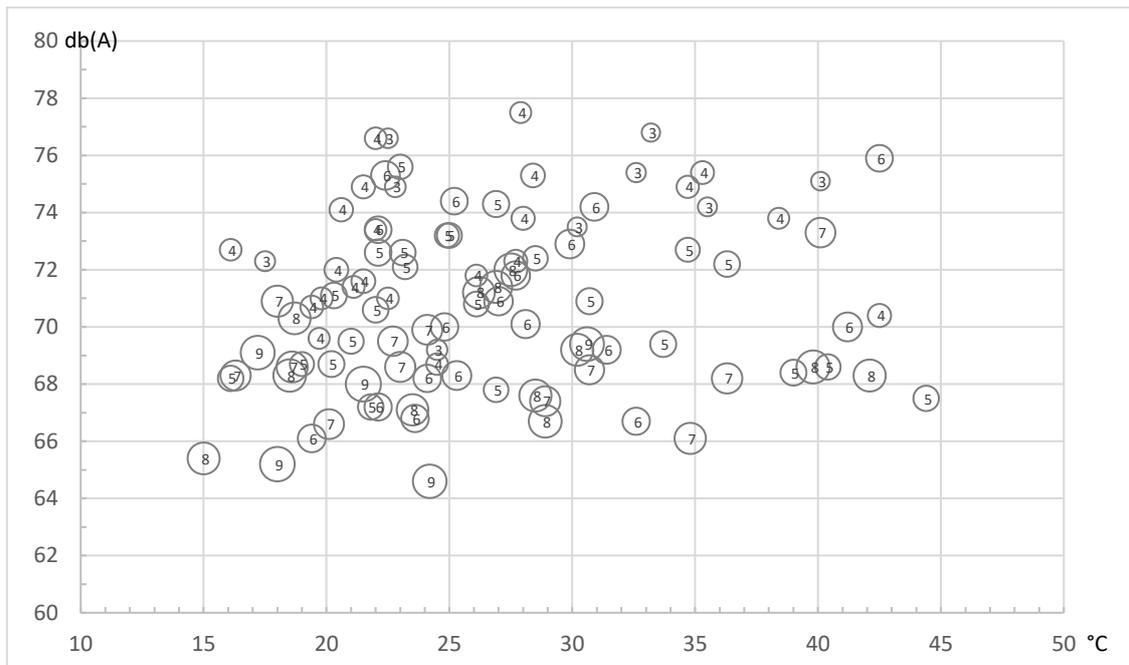
Esta investigación incluso planteó, a través del cuestionario subjetivo, qué sonidos se consideraron agradables o desagradables, pero no se encontraron correlaciones significativas, probablemente porque los pocos sonidos agradables mencionados no contribuyeron significativamente a los niveles de presión sonora obtenidos. Así, se entiende que posiblemente las variaciones en los porcentajes de personas en confort acústico en las encuestas en cuestión se deban a la propia naturaleza del sonido incómodo, que puede llevar a distintos grados de insatisfacción, cuestión que no fue planteada por esta investigación, o a variables ambientales no acústicas. De todos modos, para situaciones en general, se cree que la gran variabilidad posiblemente se pueda explicar por el hecho de que el nivel sonoro no es suficiente para identificar la incomodidad acústica, siendo necesaria una calificación sonora adecuada para obtener mejores correlaciones.

A continuación, se verificará la influencia cruzada del ambiente acústico y térmico en el confort de las personas, considerando las relaciones conjuntas de TEP y L_{Aeq} con los porcentajes de personas que declararon estar en confort térmico, acústico y ambiental.

Las figuras 6 a 8 muestran el nivel de presión sonora (L_{Aeq}) en función de la temperatura equivalente percibida (TEP). Las diversas combinaciones de situaciones ambientales acústicas y térmicas planteadas pueden, por tanto, ser determinadas por la dispersión de los puntos encontrados y el número de personas en confort se determina por el radio del círculo centrado en cada punto, con radios mayores indicando mayor número. Es de destacar que la distribución en los tres casos es la misma, lo que varía es el número de personas según el criterio adoptado.

Los números en cada círculo apuntan al número de personas, de 10, que se sentirían cómodas en esa situación termoacústica. Así, la escala de 0 a 10 da la magnitud de confort, donde 0 equivale a 0% de personas en confort y 10 equivale a 100%. La Figura 6 trae los valores para el confort acústico, la Figura 7, para el confort térmico, y la Figura 8, para el confort con el medio ambiente en su conjunto.

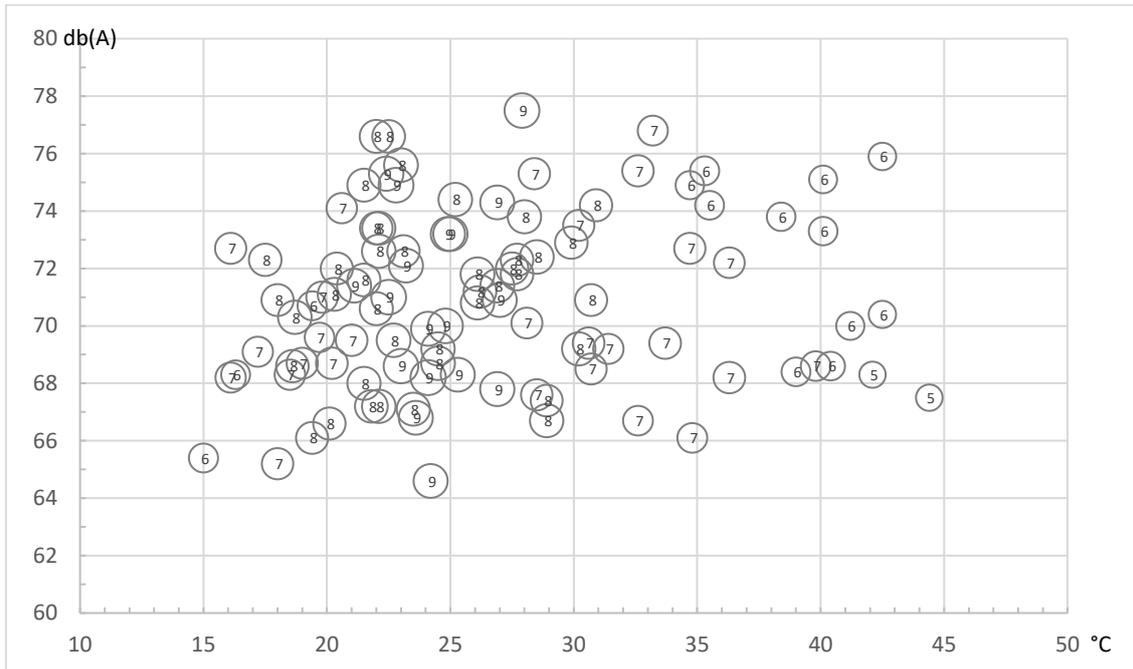
Figura 6: L_{Aeq} , en dB(A), en función de TEP, en °C; personas en confort acústico/10



Observando la Figura 6, que muestra el porcentaje de personas en confort acústico para las distintas situaciones termoacústicas planteadas, se puede apreciar que, en general, los porcentajes más altos se encuentran no solo en valores más bajos de nivel de presión sonora equivalente, sino también principalmente a valores más bajos de la temperatura equivalente percibida. Se puede inferir que posiblemente valores más altos de TEP conduzcan a una tolerancia más baja con niveles de sonido más altos. Esta pregunta debe ser verificada con más cuidado, pero si se confirma, podría indicar la posibilidad de interferencia de la percepción del ambiente térmico en la percepción del ambiente acústico. En este trabajo no fue posible establecer una correlación en este sentido, dado que, como se observa en relación a la Figura 4, existe una gran dispersión de puntos en el caso del ambiente acústico.

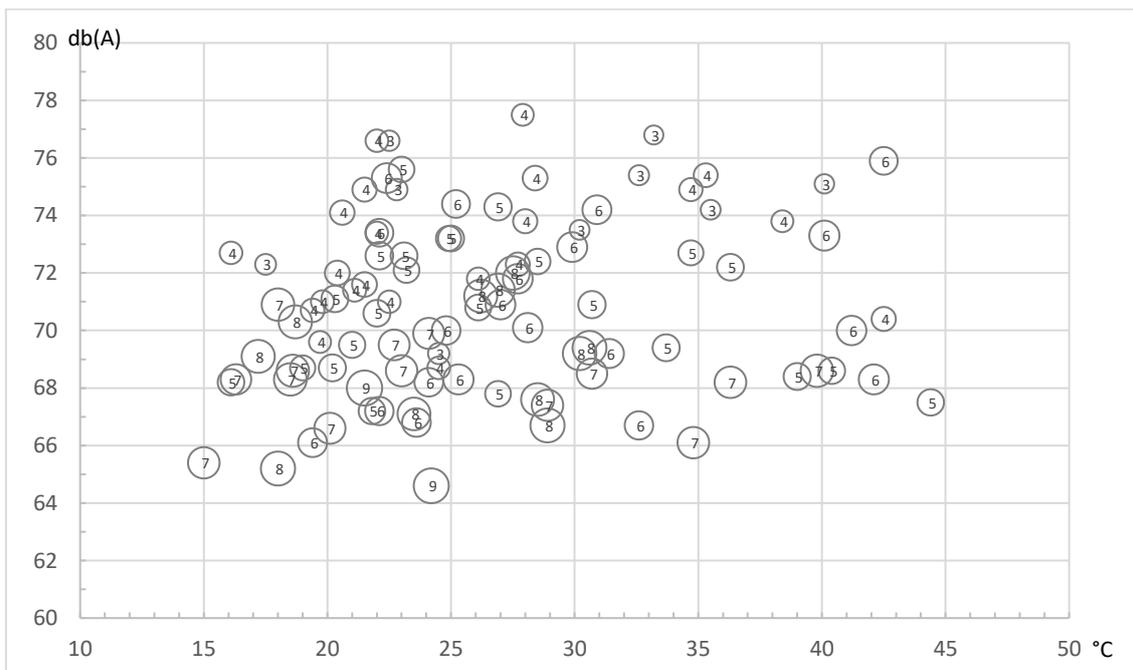
En la figura 7 se muestra el porcentaje de personas en confort térmico, para las mismas situaciones termoacústicas planteadas, donde se observa que valores más altos de niveles de presión sonora no parecen impactar el porcentaje de personas en confort térmico, como se puede apreciar en los resultados del confort térmico en la distribución de las situaciones elevadas. Así, aparentemente se puede decir que la percepción del ambiente acústico no interfiere significativamente con la percepción del ambiente térmico.

Figura 7: L_{Aeq} , en dB(A), en función de TEP, en ° C; personas en confort térmico/10



Para reconsiderar conjuntamente las observaciones realizadas en relación a las Figuras 6 y 7, la Figura 8 trae nuevamente el nivel de presión sonora en función de la temperatura equivalente percibida, pero mostrando ahora el porcentaje de personas simultáneamente en confort acústico y térmico, considerando así, dentro de los límites de esta investigación, el confort con el ambiente en su conjunto.

Figura 8: L_{Aeq} , en dB (A), en función de TEP, en ° C; personas en confort/10



Se puede observar, en la Figura 8, que cuando los valores de temperatura equivalente percibida son más altos, existe una tendencia generalizada a disminuir el número de personas en confort ambiental en su conjunto. Los valores más altos del nivel de presión sonora equivalente conducen a porcentajes más bajos de personas en el confort ambiental, pero no tan marcadamente. Así, es evidente que el ambiente térmico acaba teniendo un mayor peso en la percepción del confort ambiental en su conjunto que el ambiente acústico, mostrando este último una tendencia de porcentajes de confort acústico considerablemente inferiores a la que en relación a la tendencia de porcentajes de confort térmico, como se ve en las Figuras 4 y 5.

El confort acústico parece, por tanto, sufrir una mayor influencia del confort térmico, pero principalmente en relación a situaciones más cálidas, no verificando la misma magnitud en situaciones más frías. Al mismo tiempo entre 21 ° C y 28 ° C, una gama con más del 80% de personas en confort térmico, se tiende a tener también confort acústico. No ocurre lo mismo a la inversa, ya que al observar niveles sonoros por debajo de 68 dB (A), que proporcionan al 70% de las personas en confort acústico, no hay influencia aparente en el número de personas en confort térmico. Por tanto, el impacto del confort acústico sobre el confort térmico parece no ser relevante. Cualitativamente, este hecho quizás pueda explicarse por el carácter conformista que asume una parte significativa de la población paulista ante el intenso ruido urbano, considerándolo como algo inherente e integral a su vida cotidiana en los espacios urbanos abiertos.

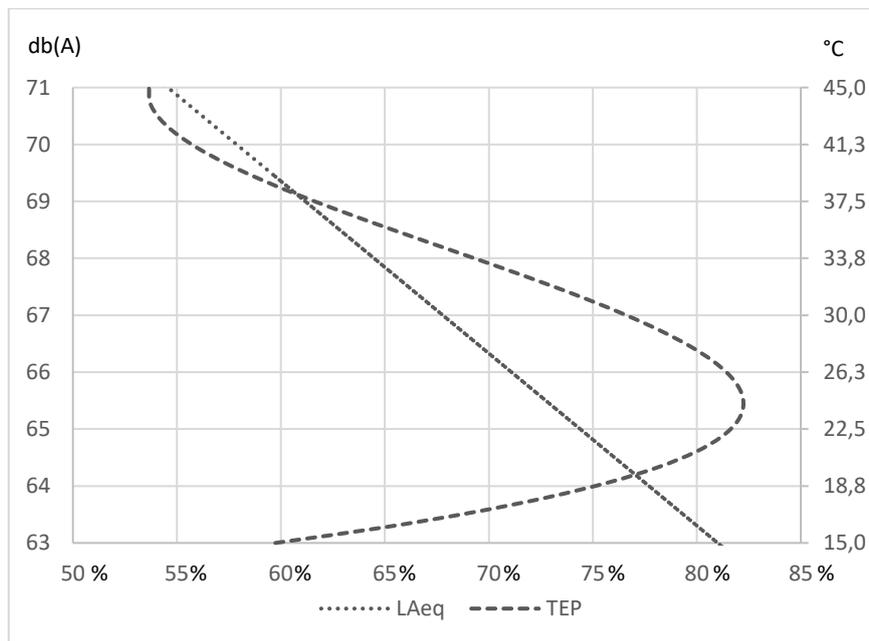
Finalmente, se presenta un resumen de los resultados en la Tabla 1 y Figura 9. En esta tabla se presenta un resumen de los valores de temperatura equivalente percibida (TEP) y nivel de presión sonora equivalente (L_{Aeq}) que indican los porcentajes de personas simultáneamente en confort térmico y acústico, obtenido a partir de las ecuaciones 12 y 13. Así, las relaciones se establecieron en términos de rangos de intervalo de las dos primeras variables en relación a los porcentajes de la tercera variable, de manera que las situaciones de confort termoacústico puedan ser verificadas de forma integrada.

Tabla 1: Intervalos de TEP y L_{Aeq} para el número de personas en confort, en %

TEP	L_{Aeq}	confort
15,0 ~ 17,0 °C	≤ 69 db(A)	≥ 60%
17,0 ~ 21,0 °C	≤ 66 db(A)	≥ 70%
21,0 ~ 28,0 °C	≤ 63 db(A)	≥ 80%
28,0 ~ 33,5 °C	≤ 66 db(A)	≥ 70%
33,5 ~ 38,5 °C	≤ 69 db(A)	≥ 60%
38,5 ~ 45,0 °C	≤ 72 db(A)	≥ 50%

La Figura 9 presenta los datos de la Tabla 1 permitiendo la lectura de los valores de temperatura percibida equivalente (TEP) y nivel de presión sonora equivalente (L_{Aeq}) para cualquier porcentaje de personas simultáneamente en confort térmico y acústico.

Figura 9: LAeq en dB (A) y TEP en ° C, en función del porcentaje de personas en confort



En resumen, en la Tabla 1 y Figura 9, se muestran los valores de TEP y L_{Aeq} , que brindan diferentes porcentajes de personas en comodidad, resumiendo los resultados encontrados para los espacios urbanos abiertos en la ciudad de São Paulo, debido al cambio conjunto en los valores de estas variables.

CONCLUSIÓN

Esta investigación tuvo como objetivo determinar el impacto simultáneo de los ambientes térmico y acústico en la percepción térmica y sonora de los usuarios de los espacios urbanos abiertos de la ciudad de São Paulo.

Se verificaron las relaciones entre el nivel sonoro equivalente y el porcentaje de personas en confort acústico y entre la temperatura percibida equivalente y el porcentaje de personas en confort térmico, generando dos ecuaciones predictivas basadas en las tendencias observadas. La correlación para el ambiente térmico fue considerablemente más alta que para el ambiente acústico. Se observó que, en términos de tendencia, los porcentajes de confort acústico son menores (35 ~ 75%) que los de confort térmico (55 ~ 82%). Los resultados muestran una mayor tolerancia a las situaciones ambientales cálidas que a las frías. También apuntan a una mayor influencia del confort térmico sobre la acústica que de la acústica sobre la térmica. Esto es especialmente cierto en situaciones ambientales más cálidas, cuando experimenta más incomodidad acústica incluso con niveles de sonido más bajos. Los mejores resultados, en términos de confort termoacústico, apuntan a situaciones ambientales con, simultáneamente,

un rango de temperatura equivalente percibido de 21 a 28 °C y un nivel de sonido equivalente de menos de 63 db(A), proporcionando más del 80% de personas en confort.

Como se puede observar, fue posible determinar el impacto simultáneo de los ambientes térmico y acústico en la percepción térmica y sonora, permitiendo indicar, en base a los resultados encontrados, los valores de temperatura equivalente percibida y nivel sonoro equivalente para mejor condiciones de confort para los usuarios de los espacios urbanos abiertos de la ciudad de São Paulo.

AGRADECIMENTOS

Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por el apoyo financiero a la investigación y la beca de productividad investigadora. A todos los investigadores del Laboratorio de Confort Ambiental y Eficiencia Energética (LABAUT) del Departamento de Tecnología de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo (FAUUSP) que participaron en las encuestas empíricas.

REFERENCIAS

AUERBACH, P. S. Thermoregulation: Important modifications of thermoregulatory responses. In: **Wilderness Medicine**. 5th ed. Philadelphia: Mosby Elsevier, 2007.

BAQUERO, M. T.; HIGUERAS, E. L. Health risk for older adults in Madrid, by outdoor thermal and acoustic comfort. **Urban Climate**, 34, 2020, 100724.

BLAZEJCZYK, K. Assessment of recreational potential of bioclimate based on the human heat balance. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON CLIMATE, TOURISM AND RECREATION, 1, 2001, Halkidiki, Greece. **Proceedings...** Halkidiki, International Society of Biometeorology, p. 133-152, 2001.

FIELDS, J. M.; DE JONG, R. G.; GJESTLAND, T.; FLINDELL, I. H.; JOB, R. S.; KURRA, S.; LERCHER, P.; VALLET, M.; YANO, T.; GUSKI, R.; FELSCHER-SUHR, U.; SCHUMER, R. Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. **Journal of Sound and Vibration**, 242, 4, p. 641-679, 2001.

GOZALO, G.R. ; MIGUEL, J. ; MORILLAS, B.; MONTES, D.; ATANASIO P. Relationships among satisfaction, noise perception, and use of urban green spaces. **Science of the Total Environment**, 624, 2018, pp. 438-450.

HIRASHIMA, S. **Percepção sonora e térmica e avaliação de conforto em espaços urbanos abertos do município de Belo Horizonte - MG, Brasil**. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2014.

HIRASHIMA, S.; ALUCCI, M. P.; MONTEIRO, L. M. Percepção sonora e térmica em espaços urbanos abertos do município de Belo Horizonte - MG. In: ENCAC/ELACAC 2013 - XII ENCONTRO NACIONAL / VIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2013.

HIRASHIMA, S.; ASSIS, E. S.; FERREIRA, D. G. Calibração do índice de conforto térmico temperatura equivalente fisiológica (PET) para espaços abertos do município de Belo Horizonte, MG. In: XI ENCONTRO NACIONAL / VII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Búzios, 2011.

HÖPPE, P. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. **Energy and Building**, 34, 6, 2002, pp. 661-665.

IPCC (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021

IRVINE, K.N. ; DEVINE-WRIGHT, P. ; PAYNE, S.R. ; FULLER, R.A.; PAINTER, B.; GASTON, K.J. Green space, soundscape and urban sustainability: an interdisciplinary, empirical study. **Local Environment**, 14, 2009, pp. 155-172.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). ISO 10551. **Ergonomics of the thermal environment: assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales**. Geneva: ISO, 1995.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). ISO 15666. **Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys**. Geneva: ISO, 2003.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). ISO 7726. **Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities**. Geneva: ISO, 1998.

JENDRITZKY, G.; DE DEAR, R. Adaptation and Thermal Environment. In: EBI, K. L.; BURTON, I.; MCGREGOR, G. (eds). **Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change**. Springer, 2009.

JENDRITZKY, G.; DE DEAR, R.; HAVENITH, G. UTCI - why another thermal index? **International Journal of Biometeorology**, 56, 3, p. 421-428, 2012.

KANG, J.; ZHANG, M. Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces. **Building and Environment**, 45, 1, p. 150-157, 2010.

KANG, J; YANG, W.; ZHANG, M. Sound environment and acoustic comfort in urban spaces. In: NIKOLOPOULOU; M. **Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach**. Atenas: CRES, 2004.

KRÜGER, E.L.; TAMURA, C.A.; BRÖDE, P.; SCHWEIKER, M.; WAGNER, A. Short- and long-term acclimatization in outdoor spaces: exposure time, seasonal and heatwave adaptation effects. **Building and Environment**, 116, 2017, pp. 17-29.

LAM, C.; LOUGHNAN, M.; TAPPER, N. Visitors' perception of thermal comfort during extreme heat events at the Royal Botanic Garden, Melbourne. **International Journal of Biometeorology**, 62, 2016, pp. 97-112.

LAU, K. K.; CHOI, C. Y. The influence of perceived aesthetic and acoustic quality on outdoor thermal comfort in urban environment. **Building and Environment**, 206, 2021, 108333.

LENZHOLZER, S.; KLEMM, W.; VASILIKOU, C. Qualitative methods to explore thermo-spatial perception in outdoor urban spaces. **Urban Climate**, 23, 2018, pp. 231-249.

LIU, J.; WANG, Y.; ZIMMER, C.; KANG, J.; YU, T. Factors associated with soundscape experiences in urban green spaces : a case study in Rostock, Germany. **Urban Forestry & Urban Greening**, 37, 2019, pp. 135-146

MONTEIRO, L. M. **Conforto térmico em espaços urbanos abertos: verificações modelares como aportes à exploração de abordagens**. 520p. Tese (Livre-Docência). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos**. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, SP, 2008.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Modelo adaptativo de conforto para avaliação in loco de espaços urbanos abertos. **Ambiente Construído** (Online), 12, p. 61-79, 2012.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Procedimentos para quantificação de variáveis para análise termofisiológica em espaços abertos. In: VIII ENCONTRO NACIONAL / IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. **Anais... ANTAC**, 2005.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Proposal of an outdoor thermal comfort index: empirical verification in the subtropical climate. In: PLEA 2011 - THE 27TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2011, Louvain-la-Neuve. **Proceedings.... Louvain-la-Neuve: PLEA**, 2011. 1. p. 462.

MONTEIRO, L. M.; NOVAES, G.; IWAI, D. N. Avaliação empírico-preditiva em espaços urbanos: correlações entre sensação térmica e sonora. In: ENTAC 2014 - XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2014, Maceió. **Anais... Maceió: ANTAC**, 2014.

MONTEIRO, L. M.; OKAMOTO, J.; PRATA-SHIMOMURA, A. P. Assessment of outdoor comfort conditions based on the application of a participative model in open urban spaces. In: SSUC SYMPOSIUM, São Paulo, 2017. **Proceedings... São Paulo**, 2017.

NAGANO, K.; HORIKOSHI, T. Development of outdoor thermal index indicating universal and separate effects on human thermal comfort. **International Journal of Biometeorology**, 55, 2, p. 19-227, 2011.

NAGANO, K.; HORIKOSHI, T. New comfort index during combined conditions of moderate low ambient temperature and traffic noise. **Energy and Buildings**, 37, p. 287-294, 2005.

NIKOLOPOULOU, M. (org). **Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach**. Atenas: CRES, 2004.

NIKOLOPOULOU, M.; LYKOUDIS S.; KIKIRA, M. Thermal comfort models for open urban spaces. In: NIKOLOPOULOU, M. **Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach**. CRES, 2004.

NOVAES, G.; MONTEIRO, L. M. Estresse e conforto urbano em São Paulo. In: XIII ENCONTRO NACIONAL / IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015, Campinas. **Anais...** Campinas, 2015.

PELLERIN, N.; CANDAS, V. Combined effects of temperature and noise on human discomfort. **Physiology & Behavior**, 78, p. 99-106, 2003.

PEREIRA, M. Percepção Sonora no espaço público: indicadores de tolerância ao ruído na cidade do Rio de Janeiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC- COTEDI, Curitiba, 2003, **Anais...** Curitiba, ENCAC 2003.

PICKUP, J.; DE DEAR, R. An outdoor thermal comfort index (OUT-SET*). Part I: the model and its assumptions. In: DE DEAR, R.; KALMA, J.; OKE, T.; AULICIEMS, A. (eds). **Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium**. Geneva, WMO/WCASP, 50, p. 279-283, 2000.

SPIGNARDI, M. C. M.; MONTEIRO, L. M. A influência das variáveis microclimáticas na decisão pelo uso da bicicleta em centros urbanos: uma revisão bibliográfica. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, no prelo, 2018.

VALQUES, I.; LISOT, A.; TAMANINI, C.; SOARES, P. O estresse urbano no conforto ambiental. In: VIII ENCONTRO NACIONAL / V ENCONTRO LATINO-AMERICANO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, Ouro Preto. **Anais...** ANTAC, Ouro Preto, 2007.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). **Environmental Noise Guidelines for the European Region**. 2018. Disponível em: <https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf>. Acesso em 31/03/21.

YANG, W.; KANG J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces. **Applied Acoustics**, 66, p. 211-229, 2005.

YU, L.; KANG, J. Factors influencing the sound preference in urban open spaces. **Applied Acoustics**, 71, 7, p. 622-633, 2010.