

Arte Rupestre: Una Perspectiva Desde Los Paisajes Sonoros

PACS: 43.50.Rq, 43.58.Vb, 43.66.-x

Moreno Iglesias, Diego¹; Álvarez-Morales, Lidia¹; Santos da Rosa, Neemias^{1,2}; Díaz-Andreu, Margarita^{1,2,3}

¹. Departament de Història i Arqueologia, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, 08001 Barcelona, Spain;

². Institut d'Arqueologia, Universitat de Barcelona, 08001 Barcelona, Spain

³. ICREA (Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats), Passeig de Lluís Companys 23, 08010 Barcelona, Spain.

diegomoreno@ub.edu; lidiaalvarez@ub.edu; n.santosdarosa@ub.edu; m.diaz-andreu@ub.edu

Palabras Clave: Paisajes sonoros, Arqueoacústica, Evaluación ambiental, Arte rupestre

ABSTRACT.

Intangible cultural heritage is an emerging research line directly relate to the study of soundscapes. Through its methods it is possible to apply a perceptual, subjective approach, to find parameters and relationships that may not have been previously considered in an archaeological context. In this sense, this communication focuses on the archaeoacoustic studies undertaken in the framework of the interdisciplinary ERC Artsoundscapes project (ref. 787842). The project aims to investigate the relationship between the presence of rock art and the acoustics of the shelters and landscapes where they are found. The case study presented in this work is based on the analysis of third order ambisonic recordings and impulse responses obtained in open-air rock art shelters located in the areas of Kamberg and Giant's Castle (South Africa). In addition to traditional room acoustics measurements, a calculation of psychoacoustic parameters was also performed according to the ISO-12913 standard. and include loudness, sharpness, roughness and fluctuation strength. In this article, we explore the methodology and level-calibration procedure. The results obtained point to high values of sharpness due to the presence of water and good spatiality, reproducibility and scalability allowing reproduction in audio systems with up to 16 channels used in laboratory environments.

RESUMEN.

El patrimonio cultural inmaterial es un tema de creciente interés académico que está teniendo un efecto directo en el estudio del paisaje sonoro. Usando un enfoque perceptual y subjetivo, es posible encontrar parámetros y relaciones que pueden no haber sido consideradas previamente en un contexto arqueológico. La investigación que sustenta esta comunicación forma parte de la disciplina de la arqueoacústica y se ha llevado a cabo en el marco del proyecto interdisciplinar ERC Artsoundscapes (ref. 787842), cuyo objetivo es estudiar la relación entre emplazamientos de arte rupestre y la acústica de sus paisajes. Concretamente, este trabajo se basa en grabaciones ambisónicas de tercer orden junto con respuestas de impulso registradas recientemente en abrigos naturales en el área de Kamberg y Giant's Castle (Sudáfrica). Además de las mediciones de acústica de salas tradicionales, se realiza un cálculo de parámetros psicoacústicos siguiendo el estándar ISO 12913, incluyendo sonoridad, nitidez, aspereza y fuerza de fluctuación. En esta comunicación, se explora la metodología y el procedimiento de calibración de nivel. Los resultados apuntan a unos valores altos de nitidez por la presencia de agua y a una buena espacialidad, reproducibilidad y escalabilidad al poder emplearse sistemas de hasta 16 canales en laboratorios.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de paisaje sonoro, que tiene origen en el trabajo de R. Murray Schafer y el equipo de *World Soundscape Project* en la segunda mitad del siglo XX [1-2], toma forma en los estándares internacionales ISO 12913: 1, 2 y 3, publicados en los años 2014, 2018 y 2019 [3-5]. Se describe un paisaje sonoro como un constructo perceptual del fenómeno físico “ambiente sonoro”, es decir, como éste es percibido, experimentado y/o entendido por una persona o grupo de personas, en un contexto socio-cultural determinado [3]. Es por lo tanto una rama de estudio intrínsecamente interdisciplinar. Este enfoque no fue solamente un paso hacia adelante en el campo de la acústica ambiental, sino que su interés académico y aplicabilidad se han visto incrementados exponencialmente en los últimos años en sectores tan dispares como la salud, la cultura, la preservación y conservación de patrimonio, la planificación urbanística, la economía y la arqueología [6].

Situándonos en un contexto arqueológico, la incorporación de la acústica resulta ser un complemento ideal a las técnicas tradicionales a la hora de generar nuevas hipótesis sobre sociedades pasadas bajo una lente perceptual [7]. En este sentido, las herramientas y perspectivas de análisis que ofrece el paisaje sonoro como concepto tienen un gran potencial en este campo, habiéndose empleado tanto de manera teórica para explorar y reconstruir el entorno acústico de diversos periodos históricos [8-9], como de manera práctica para investigar el contexto arqueológico, cultural, visual y sónico en el que se desarrollaba la vida en el pasado [10], o bien en un contexto espiritual, patrimonial y de comunicación [11-12].

El proyecto ERC Artsoundscapes¹, en el que se enmarca esta comunicación, es uno de los ejemplos de este nuevo paradigma en investigación arqueoacústica. Su objetivo es investigar la relevancia del espacio y sus propiedades acústicas como factor determinante en la localización de emplazamientos arqueológicos con arte rupestre en diversas partes del mundo. Para ello, emplea descriptores físicos como el tiempo de reverberación, o la claridad sonora para analizar la acústica de los sitios arqueológicos estudiados [13], o incluso herramientas derivadas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) [14], mientras trata de explorar las experiencias sensoriales de las sociedades prehistóricas a la hora de producir música y entrar en estados alterados de consciencia. Esta segunda línea de investigación se centra en el estudio neurológico y perceptual de los estímulos sonoros asociados a estos espacios mediante la realización de tests de escucha en un entorno controlado de laboratorio.

En este trabajo se propone un procedimiento de calibración de nivel de audio ambisónico asociado a un sistema de reproducción multicanal, que permite la reproducción fidedigna de las grabaciones ambisónicas del entorno sonoro de abrigos naturales con arte rupestre. Para ello, se ha llevado a cabo un experimento en un entorno de escucha controlado, que ha proporcionado una serie de parámetros físicos y psicoacústicos de referencia, que no solo sirven para determinar la validez del procedimiento de calibración de reproducción del audio ambisónico, sino que serán a su vez utilizados para valorar la percepción del paisaje sonoro en los sitios estudiados. La utilización de audio ambisónico viene motivado por ser el formato que ofrece mayor resolución espacial y posibilidades de decodificación frente a sistemas de reproducción binaurales, estéreo o basados en arrays [15].

Con todo ello, el objetivo final es evaluar lo que se conoce en psicología visual como “validez ecológica”, que adaptado al mundo de la percepción auditiva [16-17] representa el grado en el que un ambiente sonoro reproducido en una sala de escucha se asemeja al del emplazamiento real. Se pretende que, una vez validada la metodología, se pueda aplicar tanto en futuros trabajos como a conjuntos de datos tomados anteriormente por el proyecto, permitiendo expandir el análisis arqueoacústico llevado a cabo hasta ahora, añadiendo para ello los parámetros psicoacústicos como una variable adicional a considerar.

¹Para más información consultar la web del proyecto: <https://www.ub.edu/artsoundscapes/> (Acceso 29/09/2022)

2. METODOLOGÍA

El estudio del ambiente sonoro de los sitios de arte rupestre seleccionados sigue una metodología que puede dividirse en 4 fases, expuestas en la figura 1. En primer lugar, se selecciona la muestra en base a criterios arqueológicos y técnicos, previo estudio documental y etnográfico. A continuación, se lleva a cabo la fase experimental, que consiste en la toma de medidas acústicas (principalmente respuestas al impulso, RI) y el registro de grabaciones sonoras en cada uno de los sitios previamente seleccionados. Más adelante, se procesan los datos registrados in situ desde la perspectiva de “acústica de salas” y del paisaje sonoro. Además de para el análisis del paisaje sonoro, los parámetros psicoacústicos calculados a partir de las grabaciones registradas in-situ servirán de base para la calibración del audio en laboratorio. De esta forma, la comparativa de estos dos subconjuntos de datos (valores in-situ vs valores laboratorio) determinará la validez de la herramienta de cálculo de parámetros psicoacústicos para un uso futuro.

2.1. Muestra de estudio

El conjunto de audios y datos acústicos utilizados como base para la fase de calibración fueron recolectados durante el trabajo de campo desarrollado en Sudáfrica por el proyecto Artsoundscapes en abril y mayo de 2022. La campaña completa involucró la visita y registro de datos en un total de 31 abrigos rocosos, 28 con arte rupestre y 3 no decorados, ubicados en las zonas de Kamberg y Giant’s Castle (Cordillera del Drakensberg, Sudáfrica).

Los abrigos que forman la muestra de exhiben figuras humanas y animales pintadas con notables detalles anatómicos y un elevado nivel técnico, a través de las cuales se han representado complejas escenas relacionadas con diferentes dimensiones de la vida cotidiana y espiritual del pueblo San. Algunos de los sitios analizados, como Lonyana y Barnes I, por ejemplo, exhiben impresionantes composiciones que parecen representar danzas en las que participan un gran número de personas y rituales asociados con prácticas que se han descrito como chamánicas [18]. La cronología exacta de las imágenes es difícil de determinar, pero algunos estudios proponen que estas deben haber sido producidas a lo largo de los últimos tres milenios [19-20]. En cuanto a la morfología de los abrigos estudiados, estos son por lo general superficies rocosas convexas con una pequeña plataforma ubicadas en lo alto de laderas, por lo que ofrecen un alto grado de visibilidad de los valles, colinas y montañas que componen el paisaje del Drakensberg. En las proximidades de los paneles pintados, es común encontrar vegetación en forma de arbustos y desprendimientos rocosos como se puede observar en la figura 2.

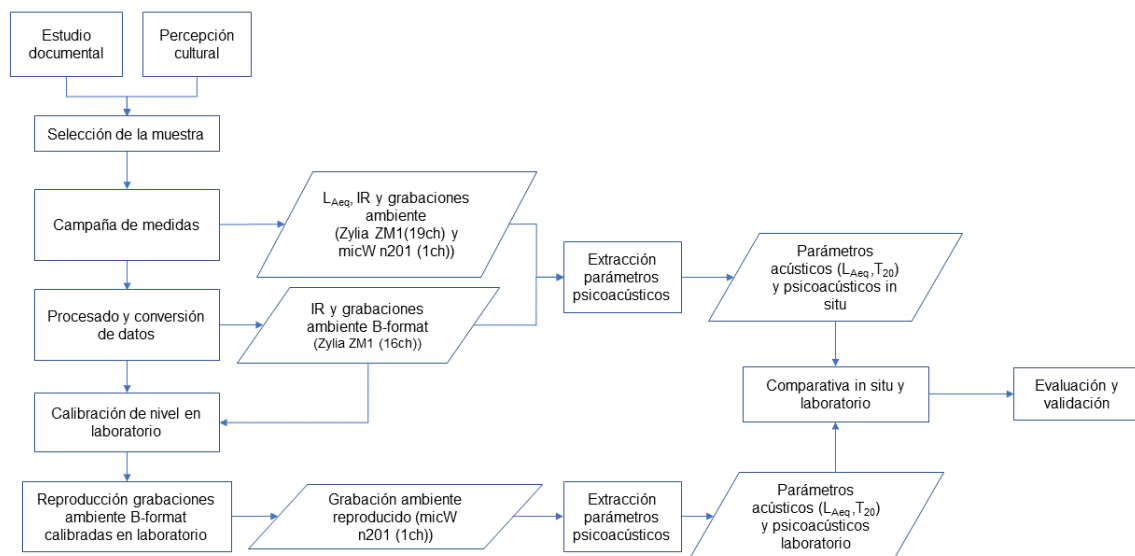


Figura 1 - Diagrama de flujo de la metodología empleada



Figura 2 - Vista panorámica del paisaje (arriba); panel pintado y motivos rupestres (abajo) de uno de los tres abrigo seleccionados: Bamboo Hollow III. Fotos tomadas por Neemias Santos da Rosa.

Para este trabajo se han seleccionado tres de los 31 sitios estudiados, atendiendo principalmente a un criterio de representatividad de ambientes sonoros en lo que a niveles de ruido y taxonomía de fuentes sonoras se refiere y utilizando concepto de *soundscape ecology* [21]. Los nombres de estas localizaciones según el registro arqueológico actual, son los siguientes: Bamboo Hollow III (Giant's Castle), Sandra Shelter (Kamberg) y Wilcox Shelter (Giant's Castle). De acuerdo a la taxonomía de fuentes sonoras propuesta por la norma ISO 12913-2 [4], se puede describir el ambiente sonoro de estos abrigos como un ambiente sonoro de exterior, de entorno salvaje, con fuentes de ruido naturales de viento, fauna silvestre y agua. De estas, la última es la más predominante, omnipresente en forma de gotas de agua, ríos o cascadas en las proximidades de todos los abrigos visitados. No se consideran en este trabajo las fuentes generadas por humanos. En cuanto al nivel sonoro equivalente de sonido ambiental, se registraron: Bamboo Hollow III (LAeq: 42.1 dB), Sandra Shelter (LAeq: 51.44 dB) y Wilcox Shelter (LAeq: 59.64 dB).

2.2. Adquisición de datos

El proceso de registro de datos in situ siguió un enfoque doble: por un lado, para analizar la acústica de los sitios desde la perspectiva de acústica de salas, se obtuvieron un conjunto representativo de repuestas al impulso (RI); por otro, para analizarlos desde un punto de vista de acústica ambiental, se realizaron grabaciones de ruido de fondo y nivel sonoro equivalente. La finalidad de ambas es la de explorar cómo la morfología del abrigo y su entorno afectan a la propagación del sonido, y como el conjunto de fuentes sonoras es percibido por el oído humano. A continuación, se comenta en detalle el proceso seguido.

En cada uno de los tres abrigos incluidos en el estudio se registraron RI en diferentes combinaciones de posiciones de fuente y receptor, seleccionadas atendiendo a la morfología de cada espacio y los posibles usos que se les atribuyen, usando el método de la respuesta al impulso integrada definido en la norma ISO 3382-1 [22] y siguiendo una metodología similar a la empleada en sitios del mismo tipo [13]. Como fuente sonora se utilizó un altavoz omnidireccional IAG DD4 con su respectivo amplificador APG4, y como receptores un micrófono omnidireccional micW n201 conectado a una interfaz Zoom F4, y un micrófono esférico ambisónico de tercer orden Zylia ZM-1. Las medidas fueron tomadas con un equipo portátil Dell, mediante la utilización de las herramientas software EASERA 1.2 y Plogue Bidule, respectivamente. En la fase de procesado se analizaron las RI y se calcularon los correspondientes parámetros acústicos. En



Figura 3 - Registro de la RI monoaural en Wilcox Shelter, S01R02 (izquierda;) y Sandra Shelter, S02R01 (derecha). Fotos tomadas por Neemias Santos da Rosa.

este trabajo se utiliza el tiempo de reverberación, T_{20} , para ofrecer una idea general de las características físicas del espacio.

En la figura 3 se muestran las configuraciones de medida en dos de los abrigos seleccionados.

También se grabaron extractos de duración variable del ambiente sonoro en cada sitio, utilizando el micrófono omnidireccional junto con un calibrador (94dB SPL 1kHz) y el micrófono ambisónico de tercer orden, este último sin referencia de calibración debido a la ausencia de adaptadores para este formato. En ambos casos fueron registrados haciendo uso de las estaciones de trabajo de audio digital (DAW) Audacity y Plogue Bidule respectivamente.

Adicionalmente se llevó a cabo un registro del nivel equivalente ponderado A (LAeq) del sonido ambiente durante un minuto y medio y se obtuvieron las curvas de evaluación del ruido NR con la herramienta “virtual Sound Pressure Level Meter” implementada en el software de análisis acústico ARTA, utilizando de nuevo el micrófono omnidireccional con referencia de calibración (94dB SPL 1kHz).

Por lo tanto, los datos finales en bruto utilizados para la validación del procedimiento propuesto de calibración en laboratorio de las grabaciones ambisónicas y extracción de parámetros psicoacústicos serán: un fichero de audio de 19 canales y un fichero monoaural calibrado in-situ del ambiente sonoro de cada sitio (ambos en formato .wav), asociados a un valor de tiempo de reverberación extraído de las correspondientes RI, junto con un nivel equivalente de referencia que será usado a la hora de reproducir el ambiente sonoro en el laboratorio (ver figura 1).

2.3. Análisis del ambiente sonoro: Parámetros base

Para el proceso de descripción del paisaje sonoro y la validación de la calibración de la reproducción del ambiente sonoro en el laboratorio se han empleado cuatro de los parámetros definidos en el anexo B de la norma ISO 12913-2 como descriptores del entorno acústico [4] : sonoridad, nitidez, aspereza y fuerza de fluctuación. Junto con el nivel equivalente y el tiempo de reverberación ya mencionados, estos parámetros permiten una caracterización completa del espacio estudiado combinando indicadores físicos y perceptivos.

La sonoridad (*loudness*), describe la intensidad de un sonido teniendo en cuenta algunos efectos presentes en el oído humano tales como enmascaramientos, ponderaciones en frecuencia y bandas críticas, por lo que se corresponde mejor con la percepción de volumen que el nivel de presión sonora. En cuanto a su definición, un sonio (son) se corresponde con la sonoridad que provoca un tono puro de 1 kHz de 40 dB de nivel de presión sonora, y es por esto que también existe la escala de fonios (*phon*) para el Nivel de Sonoridad o *Loudness level*. Esta segunda escala indica el nivel de presión sonora de un tono de 1 kHz que suena igual de fuerte que el sonido medido [23]. Equiparándose al nivel continuo equivalente, Zwicker presenta diversos ejemplos de cómo se infraestima la sensación de nivel sonoro y la relativa facilidad de predecir los valores mediante evaluaciones subjetivas [24]. La nitidez (*sharpness*) representa la sensación

al variar la energía de una señal en altas frecuencias, por lo que es un indicador del contenido de alta frecuencia de un estímulo dado. Se define en *acum*, correspondiéndose el valor de 1 con un ruido de banda estrecha de anchura una banda crítica alrededor de 1 kHz a un nivel de 60 dB [24]. De manera general, en la naturaleza, lugares con flujos de agua como fuentes, ríos o cantos de pájaro tendrán valores altos de este parámetro [25]. Los dos últimos parámetros cuantifican el grado de molestia al producirse modulaciones superiores (aspereza o *roughness*) o inferiores (fluctuación o *fluctuation strength*) a 20 Hz. En el caso de aspereza, su unidad de medida es el *asper*, que se corresponde con la medida que se obtiene en un tono de 60 dB a 1 kHz modulada al 100% en amplitud, concretamente a una frecuencia de 70 Hz, mientras que la fluctuación se mide en *vacil*, teniendo la misma referencia que la aspereza exceptuando su frecuencia de modulación que es de 4 Hz [24].

Finalmente cabe destacar que, debido a su relativa novedad de utilización desde la aparición de las normas ISO 12913, es bastante común su uso en términos relativos y comparativos [25], añadiéndose a ello la diversidad de maneras en las que se pueden calcular dependiendo del estándar de referencia, software empleado, fuente en cuestión y tipo de análisis posterior [26].

2.4. Reproducción calibrada en laboratorio

La sala de reproducción utilizada es el laboratorio de psicoacústica Immpalab² situado en la facultad de psicología de la Universitat de Barcelona. Diseñado para el proyecto Artsoundscapes, este espacio dispone de un sistema de reproducción multicanal de 16 altavoces turbosound TCI52-T-WH, conectados mediante una interfaz virtual Dante Virtual Soundcard, en una configuración esférica alrededor de un asiento de referencia. La sala ha sido diseñada para garantizar el grado de aislamiento y acondicionamiento necesarios para poder utilizarse en los test de escucha sin interferir de forma significativa en la experiencia auditiva del oyente, ofreciendo un tiempo de reverberación objetivo en el rango 0.29-0.32 s.

Las señales originales del ambiente sonoro registradas con el micrófono de 19 canales, se convierten al formato de intercambio ambiX (ACN+SN3D) de 16 canales mediante la aplicación software proporcionada por el fabricante³. Por otro lado, el enrutamiento de la señal de audio hacia los canales de reproducción de la sala de escucha se lleva a cabo con el plugin decodificador AllRADecoder, desarrollado por el Instituto de Música Electrónica y Acústica de Graz (IEM)⁴. Todo el procesado se realiza en tiempo real en Plogue Bidule desde el ordenador de la sala de control en el exterior del laboratorio. En orden, se emplea un selector de audio, el plugin conversor de A-Format a B-Format Ambix, el decodificador con la información espacial de la sala y por último un control de ganancia de reproducción.

El método propuesto para realizar el ajuste controlado del nivel de reproducción de las grabaciones ambisónicas de los ambientes sonoros sin referencia de calibración registrados en la campaña de medidas consiste en una equiparación del nivel equivalente medido in situ con micrófono calibrado y el registrado en el laboratorio con ese mismo micrófono. Siguiendo el método utilizado en estudios similares [17], [27], [28], la equiparación se consigue mediante el ajuste de ganancia de reproducción de la señal de audio espacial grabada in situ. Para ello, se coloca el micrófono omnidireccional n201 en el centro de la sala de reproducción, a una altura de 1,3 metros y se monitorea el nivel equivalente que muestra la opción "*integrating SPL meter*" de ARTA durante un minuto y medio. De esta manera, se replica exactamente el procedimiento seguido en el abrigo durante el trabajo de campo. En caso de existir una diferencia de más de 1 dB entre el nivel registrado in situ y el nivel registrado en el laboratorio, se ajusta la ganancia de reproducción y se repite el proceso hasta obtener el nivel deseado. Teniendo en cuenta que se requiere partir de un fichero de audio con referencia de calibración en ambos casos para que los valores numéricos de los parámetros extraídos sean correctos, se hace necesario realizar una grabación con el micrófono omnidireccional en el propio laboratorio. Para ello, se mantiene el micrófono en la misma posición que en el ajuste de nivel de reproducción y se registra mediante Audacity la totalidad del audio ambisónico en una pista monoaural, acoplado el calibrador acústico (94 dB SPL 1 kHz) una vez cesa la reproducción. De esta manera, se consigue

² Consultar: <https://www.ub.edu/artsoundscapes/immpalab-immersive-psychoacoustic-laboratory/> (Acceso 29/09/2022)

³ Plugin disponible en: <https://www.zylia.co/zylia-ambisonics-converter.html> (Acceso 29/09/2022)

⁴ Suite disponible en <https://plugins.iem.at/> (Acceso 29/09/2022)

transformar la señal ambisónica original sin referencia de calibración en una señal monoaural calibrada con las características de direccionalidad y nivel sonoro que replican las registradas in-situ.

2.4. Extracción de resultados

Aunque existen numerosas herramientas software capaces de calcular parámetros psicoacústicos se ha escogido trabajar con la Audio Toolbox de MatlaB en su versión R2022a y su conjunto de funciones definidas para “*Measurements and Spatial Audio: Loudness*”⁵ por su facilidad de uso y fiabilidad de resultados, ya que están basadas en los métodos recomendados por los estándares ISO 532-1 y 2, DIN 45692 y sus propias definiciones psicoacústicas originales [24], [29-31]. Se ha programado un script en MatlaB que extrae los parámetros de los dos audios, previa selección de los mismos y sus correspondientes referencias de calibración. Cada uno de estos parámetros se calcula en forma de matriz, pues las señales de origen son variables en el tiempo. Debido a esto se opta por utilizar suma cúbica, valores medios y percentiles, tal como establece el estándar ISO 12913 en su parte 2 [4].

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

A la hora de analizar los resultados numéricos, es más adecuado llevar a cabo un enfoque comparativo entre los sitios, pues estos valores dependen en gran medida del método de cálculo empleado [29-31]. Como ya se ha comentado, sus definiciones se basan en este mismo enfoque, por lo que obtener un valor absoluto representativo resulta ser una tarea compleja y se suele optar por emplear métodos estadísticos y de análisis de conglomerados [25], [32]. Por este motivo, se han utilizado los métodos de cálculo por defecto excepto en la nitidez donde se usa el método Aures con fines comparativos al aparecer en los estudios citados [11], [25], [32].

La tabla 1 muestra los valores de los parámetros psicoacústicos obtenidos en los 3 sitios seleccionados, junto al valor de nivel equivalente y el valor del tiempo de reverberación medio T_{20} de las respuestas al impulso registradas en cada sitio. Los tres abrigos presentan un tiempo de reverberación muy bajo debido a la ausencia de reflexiones al ser localizaciones en abierto, por lo que se pueden considerar ambientes secos, que favorecen la inteligibilidad y definición en la transmisión del mensaje hablado. Podemos ver que los parámetros relativos a sonoridad presentan una relación directa con el nivel equivalente, es decir, un aumento del nivel sonoro se corresponde con mayor sonoridad. El valor similar del percentil N5 con respecto a la media de sonoridad, nos indica poca variabilidad en el ambiente sonoro tanto en B. Hollow III como en Wilcox Shelter, pero no así en Sandra Shelter, donde la irregularidad de la caída de gotas de agua justifica mayores diferencias entre estos dos parámetros. Por otro lado, la nitidez y aspereza de los distintos ambientes es concurrente con las fuentes sonoras presentes: Sandra Shelter es precisamente el abrigo que mayor cantidad de ruido de alta frecuencia presenta en forma de filtraciones y goteo de agua sobre rocas y pequeños charcos; mientras que Wilcox Shelter tiene una rugosidad mayor debido al constante ruido de agua y ráfagas de viento presentes durante las grabaciones, lo que hace que se pueda considerar un ambiente más variable. Si establecemos una comparativa con otros estudios [11], [25], y teniendo en cuenta que el software y algoritmos utilizados son diferentes, vemos que en Sandra Shelter y Wilcox Shelter se obtienen valores de nitidez similares a los reportados en estudios previos para fuentes y ríos (2-3 acum), mientras que para sonoridad y aspereza se obtienen valores bastante más bajos de los habituales (2-4 asper). Además, cabe mencionar que en Sandra Shelter se obtienen valores de fluctuación significativamente más elevados que los típicos obtenidos en otros entornos naturales (0.005-0.01 vacil), lo que puede deberse a la no continuidad en el sonido del flujo de agua. A este respecto, estudios previos han demostrado que las personas tienden (al menos hoy en día) a preferir sonidos naturales que tienen valores de fuerza de fluctuación bajos como agua o viento, o de alta fluctuación, pero baja sonoridad en caso del canto de pájaros [25].

Si atendemos a la valoración comparativa entre los parámetros asociados a los ambientes sonoros in-situ y los reproducidos en laboratorio, cabe destacar que un ajuste preciso del nivel

⁵ https://es.mathworks.com/help/audio/measurements-and-spatial-audio.html?s_tid=CRUX_lftnav (Acceso 29/09/2022)

equivalente produce, en general, buenos resultados en cuanto a la reproducción de las características psicoacústicas de los entornos, encontrándose diferencias absolutas presumiblemente bajas entre los parámetros calculados a partir de cada uno de ellos. Atendiendo a los resultados relativos a la sonoridad y rugosidad encontramos diferencias pequeñas y en el mismo orden de magnitud con relación a los valores absolutos obtenidos en los 3 abrigos. Para la nitidez, las diferencias se dan en mayor medida en Sandra Shelter y Wilcox Shelter, pudiendo considerarse más relevantes. Por último, en el caso de la fluctuación, de nuevo se ocasionan mayores diferencias en Sandra Shelter. Lamentablemente, no existe actualmente ninguna métrica oficial en el ámbito de paisajes sonoros y ruido ambiental sobre mínimas diferencias perceptibles (JND) que permita evaluar la relevancia de dichas diferencias. Algunos estudios basados en ruido industrial sugieren un valor de JND de 0,4-0,8 sones para sonoridad, de 0,03-0,08 acum para nitidez, de 0,03-0,04 asper para rugosidad y de 0,01-0,012 para fluctuación [33], [34]. Sin embargo, estos resultados no se consideran de aplicación en el estudio de paisaje sonoro en sitios de arte rupestre, ya que no solo dependen del nivel de reproducción del sonido, sino que además el tipo de fuente considerado en los estudios que establecen estos valores de JND dista mucho de las fuentes presentes en los paisajes sonoros estudiados en este trabajo.

En conjunto, estos resultados sugieren posibles pérdidas de componentes frecuenciales de alta frecuencia en la señal, que de manera general se replicarán en los demás abrigos medidos en mayor o menor medida. En general, se asume que todas las diferencias comentadas se deben al proceso de conversión, decodificación y grabación del audio empleado, donde inevitablemente se produce cierta pérdida de información. Teniendo todo esto presente, se puede afirmar que se consigue un ajuste razonable en los parámetros seleccionados con el método de calibración de nivel de reproducción empleado.

Tabla 1. Resultados de los parámetros psicoacústicos de los ambientes registrados in-situ y reproducidos en laboratorio, junto a la diferencia absoluta obtenida entre ambos (Dif. Abs.).

Abrigo	T _{20m} (s)	Origen sonido	L _{Aeq} [dBA]	Loudness [son]	Loudness Lvl. [fon]	N5 [son]	Sharp. [acum]	Rough. [asper]	Fluct. [vacil]
B. Hollow III	0.25	In situ	42,10	2,79	54,80	2,98	1.340	0,448	0.0029
		Lab	42,41	3,40	57,67	3,94	1.251	0,413	0.0055
		Dif. Abs.	0,31	0,61	2,87	0,96	0.089	0,035	0.0026
Sandra Shelter	0.21	In situ	51,44	6,77	67,60	7,73	2.888	0,578	0.0769
		Lab	50,95	7,84	69,71	9,18	2.426	0,556	0.1375
		Dif. Abs.	0,49	1,07	2,11	1,45	0.462	0,022	0.0606
Wilcox Shelter	0.17	In situ	59,64	13,32	77,36	13,95	2.315	0,700	0.0016
		Lab	59,01	12,09	75,95	12,67	1.948	0,624	0.0090
		Dif. Abs.	0,63	1,23	1,41	1,28	0.367	0,076	0.0074

4. CONCLUSIONES

Este trabajo realiza una evaluación objetiva del ambiente acústico y sonoro de sitios de arte rupestre siguiendo una metodología basada en el análisis de señales registradas in situ. El propósito de utilizar un conjunto de índices acústicos objetivos que definan las características del paisaje sonoro encontrados en los abrigos es detectar diferencias entre sitios similares y valorar así la posible implicación del paisaje sonoro en la localización de emplazamientos arqueológicos de arte rupestre en diversas partes del mundo. Además de esta evaluación descriptiva, el trabajo aporta, arqueológicamente hablando, información de base para investigar la percepción, sensibilidad y preferencias sónicas del pueblo San, y lo diferente que podrían ser estos conceptos comparados con los criterios acústicos actualmente empleados en sociedades occidentales. Para poder realizar dicho estudio y evaluar la relación cognitiva entre las sociedades prehistóricas y su entorno, se debería incluir la colección completa de sonidos relevantes culturalmente asociados a cada lugar y periodo de tiempo determinados, como por ejemplo sonidos producidos por los humanos, ya fuese con sus voces, instrumentos o artefactos, y no solo los sonidos naturales presentes en el entorno. Este enfoque se abordará en futuros trabajos. Además, con el objetivo de desarrollar un procedimiento de calibración de nivel de audio ambisónico para extraer parámetros psicoacústicos como descriptores perceptuales del

ambiente sonoro de emplazamientos arqueológicos, se ha desarrollado una metodología de reproducción y validación en un entorno de escucha controlado. Esta primera versión emplea tanto parámetros físicos como psicoacústicos para asegurar la validez ecológica del audio reproducido, es decir, conseguir la mayor similitud posible entre el ambiente reproducido en laboratorio con el registrado in situ. Los resultados obtenidos para los tres sitios de arte rupestre incluidos en este estudio preliminar son positivos atendiendo a criterios comparativos de diferencias absolutas, siendo los valores obtenidos acordes a la taxonomía de fuentes sonoras presentes en los casos de estudio. La validación de esta metodología preliminar abre la puerta a realizar un análisis estadístico más detallado del conjunto de datos obtenidos en los 31 sitios estudiados en las zonas de Kamberg y Giant's Castle en Sudáfrica al completo, pudiendo replicar la metodología con carácter retroactivo a otros sitios de arte rupestre estudiados anteriormente en el proyecto Artsoundscapes, utilizando únicamente el nivel equivalente como referencia.

Se seguirá trabajando en esta línea para tratar de perfeccionar la precisión e inmersión del sistema de reproducción, por ejemplo, incluyendo la utilización de tecnología de grabación binaural, y se valorará la variabilidad de los resultados haciendo uso de otros métodos y algoritmos de cálculo de parámetros psicoacústicos. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de realizar un estudio sobre diferencias perceptibles de los parámetros calculados en entornos naturales, lo cual nos ayudaría a cuantificar y valorar la relevancia de las diferencias encontradas para cada parámetro entre los sitios de arte rupestre.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del proyecto ERC Advanced Grant Artsoundscapes "The sound of special places: exploring rock art soundscapes and the sacred" (EC Grant Agreement 787842), cuya investigadora principal es Margarita Díaz-Andreu.

Nuestro sincero agradecimiento al museo Kwa-Zulu Natal, la Dra. Ghilraen Laue, Chih-Jen Hung, Richard Duma y Raphael Mnikahti por su ayuda, participación y por su labor de guías locales durante el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- [1] Schafer, R. M. *The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*. 1993.
- [2] Truax, B. *Acoustic Ecology and the World Soundscape Project*. Springer, 2019.
- [3] International Organization for Standardization, ISO TC 43/SC 1/WG 54, 12913-1 Acoustics – Soundscape –Part 1: Definition and conceptual framework, (2013).
- [4] International Organization for Standardization, ISO/TS 12913-2:2018. Acoustics – Soundscape – Part 2: Data collection and reporting requirements.
- [5] International Organization for Standardization, ISO/TS 12913-3:2019. Acoustics – Soundscape – Part 3: Data analysis.
- [6] Kang, J. Soundscape: *Progress in the past 50 years and challenges in the next 50 years*, in INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2021.
- [7] Weinzierl, S. and Lepa, S. On the epistemic potential of virtual realities for the historical sciences. A methodological framework. *Augmented Reality*. 2017, pp. 61-80.
- [8] Pancer, N. The silencing of the world: Early medieval soundscapes and a new aural culture. *Annales.Histoire, Sciences Sociales-English Edition*. vol. 72(3), 2017, pp. 411-450.
- [9] Ortoleva, J. Making Sense of Landscape: A New Study of Sound Propagation between Tarquinian Funerary and Habitation Settings. *Etruscan and Italic Studies*. 2022.
- [10] Till, R. Sound archaeology: terminology, Palaeolithic cave art and the soundscape. *World Archaeology*. vol. 46(3), 2014, pp. 292-304.
- [11] Zhang, D. et al. Sounds and sound preferences in Han Buddhist temples. *Build. Environ*. vol. 142. 2018, pp. 58-69.

- [12] Constantinidis, D. The interconnectivity of cultural sites: Sights and sounds across a landscape. *Bar International Series*. vol. 1227. 2004, pp. 258-262.
- [13] Díaz-Andreu, M. et al. The Soundscapes of the Lower Chuya River Area, Russian Altai: Ethnographic Sources, Indigenous Ontologies and the Archaeoacoustics of Rock Art Sites. *Journal of Archaeological Method and Theory*. 2022, pp. 1-28.
- [14] Atiénzar, G. G. et al. La modelización del paisaje: iconografía y percepciones visual y sonora en el arte rupestre macrosquemático. *Virtual Archaeology Review*. 2022.
- [15] Hong, J. Y. et al Spatial audio for soundscape design: Recording and reproduction. *Applied Sciences*. vol. 7(6), 2017, pp. 627.
- [16] Guastavino, C. et al. Ecological validity of soundscape reproduction. *Acta Acustica United with Acustica*. vol. 91(2), 2005, pp. 333-341.
- [17] Tarlao, C. Steele, D. and Guastavino, C. Assessing the ecological validity of soundscape reproduction in different laboratory settings. *PLoS One*. vol. 17(6), 2022, pp. e0270401.
- [18] Lewis-Williams, D. and Challis, S. *Deciphering Ancient Minds: The Mystery of San Bushman Rock Art*. 2012.
- [19] Mazel, A. D. and Watchman, A. L. Accelerator radiocarbon dating of Natal Drakensberg paintings: results and implications. *Antiquity*. vol. 71(272), 1997, pp. 445-449.
- [20] Mazel, A. D. and Watchman, A. L. Dating rock paintings in the uKhahlamba-Drakensberg and the Biggarsberg, KwaZulu-Natal, South Africa. *Southern African Humanities*. vol. 15(1), 2003, pp. 59-73.
- [21] Pijanowski, B. C. et al What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecol.* vol. 26(9), 2011, pp. 1213-1232.
- [22] Asociación Española de Normalización, UNE-EN ISO 3382-1:2009. Medición de parámetros en Recintos. Parte 1: Salas de espectáculos
- [23] Fletcher, H. and Munson, W. A. Loudness, its definition, measurement and calculation. *Bell System Technical Journal*. vol. 12(4), 1933, pp. 377-430.
- [24] Zwicker, E. and Fastl, H. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer Science & Business Media. (Vol. 22). 2013.
- [25] Yang, M. and Kang, J. Psychoacoustical evaluation of natural and urban sounds in soundscapes. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 134(1), 2013, pp. 840-851.
- [26] Engel, M. S. et al. A review of the use of psychoacoustic indicators on soundscape studies. *Current Pollution Reports*. vol. 7(3), 2021, pp. 359-378.
- [27] Musick, M. et al. I hear NY3D: An ambisonic installation reproducing NYC soundscapes, in *Audio Engineering Society Convention 135*, 2013.
- [28] Oberman, T. et al. Using virtual soundwalk approach for assessing sound art soundscape interventions in public spaces. *Applied Sciences*. vol. 10(6), 2020, pp. 2102.
- [29] International Organization for Standardization., ISO 532-1:2017(E). Acoustics – Methods for calculating loudness – Part 1: Zwicker method.
- [30] International Organization for Standardization., ISO 532-2:2017(E). Acoustics – Methods for calculating loudness – Part 2: Moore-Glasberg method.
- [31] German Institute for Standardization. DIN 45692:2009. Measurement Technique for the Simulation of the Auditory Sensation of Sharpness.
- [32] Rychtáriková, M. and Vermeir, G. Soundscape categorization on the basis of objective acoustical parameters. *Appl. Acoust.* vol. 74(2), 2013, pp. 240-247.
- [33] You, J. and Jeon J. Y., Just noticeable difference of sound quality metrics of refrigerator noise, in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2006.
- [34] Pedrielli, F.;Carletti, E. and Casazza, C. Just noticeable differences of loudness and sharpness for earth moving machines. *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 123(5), 2008, pp. 3