



## ANÁLISIS DE LA POLICORALIDAD EN ESPACIOS SACROS

Referencia PACS: 43.55.Ka

**Romero Moreno, Álvaro<sup>1</sup>; Segura García, Jaume<sup>2</sup>; Navarro Camba, Enrique A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Católica de Valencia, Valencia, SPAIN [alvaro.romero@ucv.es](mailto:alvaro.romero@ucv.es)

<sup>2</sup>IRTIC - Universitat de València, Paterna, SPAIN [jaume.segura@uv.es](mailto:jaume.segura@uv.es); [enrique.navarro@uv.es](mailto:enrique.navarro@uv.es)

### ABSTRACT

Towards the end of the Renaissance period and mainly in the Baroque was a common habit to delocating sources (vocals and instruments) to create new sound effects in sacred spaces. So the concerts 'in battle', in echo or other distributed settings throughout the churches were widely used resources by composers at that time. In this paper, we intend to study some settings of sources in two churches in order to analyze how different acoustic parameters are affected.

### RESUMEN

Hacia finales del periodo renacentista y fundamentalmente en el barroco fue muy común el hábito de deslocalizar fuentes (coros e instrumentos) para crear nuevos efectos sonoros en los espacios sacros. Así los conciertos 'en batalla', en eco u otras disposiciones distribuidas a lo largo de las iglesias fueron recursos muy utilizados por los compositores en aquella época. En este trabajo, pretendemos estudiar algunas disposiciones de fuentes no únicas en dos iglesias para así analizar cómo se ven afectados diferentes parámetros acústicos.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se realiza una primera aproximación al análisis de la distribución multifuente a través de la policoralidad o multicoralidad, como ejemplo de disposición real en gran número de obras religiosas destinadas a ser interpretadas en espacios sacros. Se analiza la distribución del campo sonoro (LP), la claridad (C80) y el índice de transmisión de la palabra (STI y RASTI), sin entrar a estudiar cuestiones relacionadas con la localización de las fuentes. Para realizar este análisis se emplean dos ejemplos tipológicos eclesiales diferentes, la iglesia de planta de cruz latina y la iglesia de planta basilical o uninave, que caracterizan a un gran número de espacios sacros presentes en la Comunitat Valenciana. Así, la iglesia de Sant Agustí situada en la localidad castellanense de Vinaròs representa el ejemplo de iglesia de planta de cruz latina con un volumen de unos 4.900 m<sup>3</sup> y la iglesia de Sant Jaume situada en la ciudad valenciana de Algemesí, el modelo de iglesia de planta basilical con un volumen de 11.000 m<sup>3</sup>. Ambos espacios sacros fueron construidos en el siglo XVI. Se consideran iglesias tipo, ya que en la mayoría de las poblaciones de esta zona geográfica se pueden encontrar espacios sacros de características similares, tanto en la tipología estructural como en sus dimensiones. De este modo se pretende ofrecer resultados que, en primera aproximación, se puedan extrapolar para un gran número de iglesias presentes en esta área geográfica.

La policoralidad, polifonía multicoral o polifonía policoral es una de las primeras manifestaciones de distribución multifuente en el ámbito musical. Este fenómeno tiene su origen en la música sacra y aparece en el siglo XVI en la Escuela Veneciana fundada por Adrian Willaert maestro de capilla de la iglesia de San Marcos de Venecia, desarrollándose con total plenitud en el barroco musical. La iglesia de San Marcos con su particular disposición arquitectónica, posee dos coros enfrentados cada uno con su propio órgano, favoreció la

colocación de coros o conjuntos instrumentales simultáneos separados en diferentes posiciones, para producir efectos antifonales, 'en batalla' y de eco, abrumando de este modo al oyente con una envolvente sonora plena de magnificencia, poder y esplendor. Los coros se situaban en diferentes puntos de las galerías elevadas de la iglesia [1]. Esta técnica policoral, multicoral o del coro spezzato abrió acústicamente el espacio y produjo timbres nuevos con la utilización de conjuntos instrumentales. Se produce así una música rica en colorido dentro de un espacio con fuertes impresiones sensoriales, con oposición y fusión de los sonidos. Se busca por tanto una nueva sonoridad en base a un procedimiento acústico, colocando a los diversos coros en distintas posiciones y produciendo un efecto equivalente a la estereofonía, efecto que se perdería si el sonido viniese de una misma dirección [2]. La colocación de órganos en sitios distintos servía de apoyo a estos coros. En la Península Ibérica ya desde ese siglo XVI se va a emplear el género multicoral o policoral en las composiciones de música sacra. Destaca la figura de Juan Bautista Comes introductor en Valencia de la policoralidad, autor que indicaba en sus obras la colocación de los distintos coros en lugares muy lejanos unos de otros. El Barroco también fue muy productivo en España en cuanto a música policoral sacra, con numerosos ejemplos a tres o cuatro coros, con o sin instrumentos [3]. El uso de varios coros e instrumentos, por lo general de viento, fue una constante en este siglo en la mayoría de iglesias importantes. En el caso de la iglesia de Sant Jaume destacan las figuras de Juan Bautista Cabanilles y José Pradas.

## 2. HISTORIA Y CARACTERIZACIÓN

La respuesta a la policoralidad de un tipo y otro de iglesia difieren, ya que tanto la forma constituyente como el volumen difieren. El volumen de una es mayor que el de la otra y la forma de la iglesia grande suele ser más compleja. Los problemas acústicos se hacen más importantes y más difíciles cuando aumenta el tamaño de la nave y cuando su forma se hace más compleja [4].

San Agustín forma parte de los restos del antiguo convento de los Padres Agustinos. Esta iglesia del siglo XVI es un edificio de estilo barroco que presenta forma de cruz latina, con tres capillas laterales por banda entre contrafuertes comunicados entre sí; crucero con cúpula sobre tambor y pechinas, y presbiterio techado con bóveda de aristas, al igual que las capillas laterales de la nave, que en la actualidad están totalmente vacías. A los pies del templo, se levanta un coro sobre elevado. La iglesia sufrió un gran deterioro en el año 1936, utilizándose eventualmente para el culto, y se cerró al público en el año 1975. En los años 80 la antigua iglesia fue acondicionada y rehabilitada funcionalmente como auditorio, perdiendo su función eclesial [5], aunque para el presente análisis se considere en su estado anterior a la rehabilitación y acondicionamiento.

Sant Jaume fue construida entre 1550 y 1582. Se trata de un edificio de planta basilical que mide 38 metros de largo por 13,70 de ancho en la nave central (20 metros contando las capillas laterales) y unos 15 metros de altura en su parte más elevada. Por lo tanto, tiene un volumen de unos 11.000 m<sup>3</sup>. La planta de la iglesia tiene cinco tramos, cubiertos con arquivoltas nervadas con capillas laterales. Se cierra con un ábside de forma poligonal de cinco lados y vueltas estrelladas. La nave central presenta pilastras adosadas que sostienen arcos fajones y está iluminada mediante ventanas rectangulares, abiertas en las lunetas que forman el crucero de las nervaduras. Las naves laterales han sido transformadas en capillas. El edificio en sí es una mezcla de estilos renacentista y barroco valenciano. La iglesia de Sant Jaume sigue empleándose para su función primigenia, es decir, para el culto religioso, aunque también acoge audiciones musicales eventualmente.

## 3. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN

Para modelizar acústicamente ambas iglesias se ha empleado el algoritmo del método de trazado de rayos. El método de trazado de rayos o ray-tracing method, está basado en los principios generales de la acústica geométrica. EPIDAURE ha sido el programa de simulación empleado [6], [7] y [8] para la realización del modelo geométrico. La fuente estadística emite una serie de rayos con una energía específica que, sobre la incidencia de las superficies de las paredes u obstáculos en el modelo geométrico, pierden energía en cada reflexión. La

correspondiente energía disminuye en función del coeficiente de absorción del material que forma dicha pared u obstáculo. Por medio de ciertos detectores -micrófonos virtuales-, los citados rayos pueden ser detectados en cualquier punto de la sala estudiada. Se deben tener en cuenta las reflexiones especulares y difusas, y en el caso de EPIDAURE, esto se lleva a cabo sobre la base de la definición del orden de la reflexión en el cálculo de los ecogramas. Este procedimiento se justifica para este tipo de ambiente de baja absorción. Este modelo de rayo es especialmente conveniente cuando la longitud de onda es pequeña (frecuencia alta), en relación con las dimensiones de los objetos interceptados por las ondas. En el campo acústico esto implica que las superficies que delimitan el recinto sean grandes en comparación con las longitudes de los sonidos transmitidos [9], hipótesis válida para el estudio del comportamiento acústico de recintos arquitectónicos sacros.

Después de trazar todos los rayos y procesar toda la información correspondiente a una determinada simulación, se puede reconstruir la respuesta impulsiva pertinente en el detector considerado admitiendo las siguientes simplificaciones: la duración de la extinción del sonido debe ser independiente de la posición de la fuente y de los receptores, así como también debe existir independencia en la posición de los materiales absorbentes presentes. En general, los sistemas de simulación emplean la teoría de la acústica geométrica mediante modelos de rayos que inciden y se reflejan sobre superficies, para longitudes de onda menores que las dimensiones de las superficies del recinto, y considerando campos sonoros incoherentes o difusos. Para modelizar, tanto la iglesia de Sant Agustí (SA) de Vinaròs, como la iglesia Sant Jaume (SJ) de Algemesí [10], se ha utilizado el formato requerido por el método de trazado de rayos que utiliza el programa informático EPIDAURE para el análisis de la policoralidad.

Para ambos casos, las coordenadas han sido calculadas a partir de los planos de de las iglesias, y para Sant Agustí de Vinaròs además se realizaron medidas mediante un sensor de ultrasonidos de las cotas de alzado, necesarias para realizar el modelo matemático en 3D que permiten la simulación. En el proceso de modelización se definen todas las superficies presentes en las iglesias, un total de 530 superficies para Sant Agustí y un total de 1.314 superficies para Sant Jaume, que permiten la simulación completa del comportamiento acústico de las dos iglesias. Se introducen los datos referentes al medio de propagación, como son la humedad relativa (%), la temperatura ambiente (°C) y la absorción del aire (dB / 100 m).

Como cada una de las superficies que componen las iglesias están constituidas por un determinado material, es necesario proporcionar los valores correspondientes de los coeficientes de absorción ( $\alpha$ ) de cada uno de ellos. Se definen las superficies y se estructuran en grupos, atribuyendo a cada una de las superficies o grupos el tipo de material del cual están constituidas. En la figura 1 se muestran imágenes del interior de las dos iglesias modelizadas.

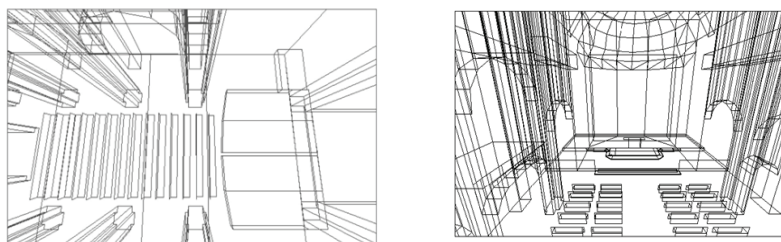


Figura 1: Vistas de la modelización de las iglesias (SA y SJ).

Para la iglesia de Sant Agustí se han considerado un total de siete materiales y para Sant Jaume un total de nueve. La configuración de materiales para la modelización de la iglesia de Sant Agustí es la que tiene mármol para el suelo; enlucido de yeso y vermiculita para las capillas, toda la vuelta central, laterales de la iglesia y para los muros anteriores y posteriores de la sala, así como, pilares, pilastras, las bóvedas y la cúpula; madera ordinaria para la parte del coro y para la puerta de entrada y bancos de madera. La configuración de materiales para la modelización de la iglesia Sant Jaume [11] es la que tiene mármol para el suelo y los escalones del presbiterio; enlucido de yeso y vermiculita para las capillas, toda la vuelta central, laterales de la iglesia y para los muros anteriores y posteriores de la sala, así como, para las columnas, las bóvedas y la cúpula; madera de pino para las balaustradas de los balcones y para la puerta de entrada; fieltro ligero para el retablo del altar mayor; piedra para los arcos centrales; madera para la sillería del presbiterio y bancos de madera para los feligreses. En la

tabla 1 se reproducen los valores de los correspondientes coeficientes de absorción  $\alpha$  [4] y [12], para las frecuencias comprendidas en las bandas de octava entre 125 y 4.000 Hz, para cada uno de estos materiales.

Material	Coeficiente de absorción $\alpha$					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Enlucido (Yeso)	0,120	0,100	0,070	0,090	0,070	0,050
Madera de pino	0,098	0,110	0,061	0,081	0,082	0,110
Madera ordinaria	0,200	0,160	0,130	0,100	0,060	0,050
Mármol	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,010
Fieltro (Retablo)	0,020	0,040	0,100	0,210	0,570	0,920
Piedra	0,010	0,012	0,020	0,020	0,023	0,035
Bancos de madera	0,100	0,160	0,130	0,100	0,060	0,050

Tabla 1: Coeficiente de absorción en función de la frecuencia para cada material.

Para proseguir el proceso de modelización es necesario especificar también la posición y características de las fuentes sonoras presentes en el recinto, así como las posiciones o localizaciones de los respectivos receptores. Para la simulación de las fuentes se definen su posición, orientación, ángulos límites, retardo en la emisión, nivel sonoro y potencia sonora. Las fuentes utilizadas son omnidireccionales.

Para la modelización de las fuentes se ha empleado el programa de análisis sonoro ARTEMIS, con el que se han obtenido los espectros sonoros de cada una de las fuentes musicales. Posteriormente se obtienen los niveles sonoros de los respectivos espectros sonoros para bandas de tercio de octava. A partir de los tercios de octava se calculan los niveles sonoros, tabla 2, y la respectiva potencia sonora de las fuentes, para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz, que son los empleados para la modelización y simulación en EPIDAURE. El análisis multifuente de la policoralidad en las dos iglesias se realiza considerando las siguientes distribuciones de las fuentes: fuente de voces acompañadas por órgano (VO) situada en el coro alto al pie de la iglesia para Sant Agustí y en la posición del antiguo coro, punto de partida de la vía sacra en la iglesia de Sant Jaume, más dos fuentes de voces acompañadas por instrumentos musicales de cuerda y viento (VI) situadas a ambos lados del crucero o transepto para las dos iglesias.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
<b>VO</b>	60,92	65,48	68,71	62,64	57,78	54,99
<b>VI</b>	66,07	69,69	77,99	78,12	72,16	67,13

Tabla 2: Niveles sonoros (dB) de las fuentes por bandas de octava

Estas disposiciones representarían dos de las posibles disposiciones características de la policoralidad (PC). Se ha considerado una red con un total de 24 receptores distribuidos en la zona de la audiencia a lo largo de toda la iglesia. En ambos casos los cálculos se han realizado con las mismas fuentes. Las posiciones de los 24 receptores considerados y de las fuentes se muestran en la figura 2.

Una vez realizado el proceso de modelización, ya se está en disposición de lanzar un determinado número de rayos, en número suficientemente alto si se pretenden obtener resultados válidos, procedentes de las fuentes sonoras que se quieran tomar en consideración en el proceso y calcular los valores de los parámetros analizados para esa configuración concreta. En cada uno de los cálculos que se han realizado para el análisis se han lanzado un total de 20.000 rayos, considerando en cada caso un total de 10 reflexiones por rayo. Esta elección presenta una fórmula de compromiso en la obtención de resultados satisfactorios para un tiempo de cálculo razonable. Mediante el programa EPIDAURE se pueden obtener resultados de niveles sonoros, valores de claridad e índices STI para las octavas de frecuencia entre 125 y 4.000 Hz. También se pueden obtener mapas de distribuciones sonoras, de claridad y de índices RASTI, globales o por octavas de frecuencia.

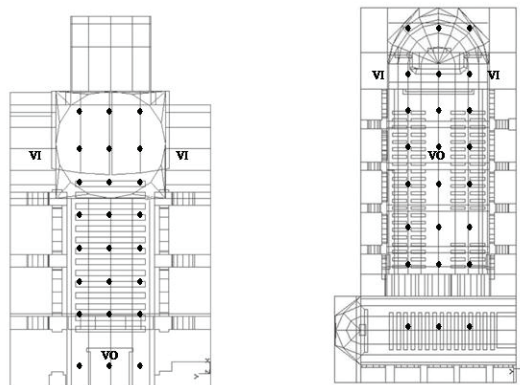


Figura 2: Posiciones de los 24 receptores y de las fuentes para SA y SJ

#### 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los parámetros estudiados para las dos iglesias, con el objeto de obtener unas conclusiones respecto a la policoralidad que se puedan extrapolar, en primera aproximación, para otros espacios eclesiales o sacros con tipologías similares al de estas dos iglesias. En la tabla 3 se resumen los valores obtenidos. Se emplea un código de colores para mostrar la adecuación o no a los valores óptimos (buena-verde, regular-amarillo, mala-rojo).

Parámetros indicadores	Policoralidad	
	SA	SJ
LP (dB)	74,31	74,54
C80 (dB)	1,90	-2,58
STI	0,53	0,42
RASTI	0,6-0,7	0,5-0,6

Tabla 3: Resumen valores de los parámetros

Para la distribución del campo sonoro LP (dB) se muestran sus tendencias comparadas con el modelo de Barron y Lee (fig.3), sus valores medios y sus mapas de distribución (fig. 4)

Distribución del nivel sonoro  $L_p$  (dB)

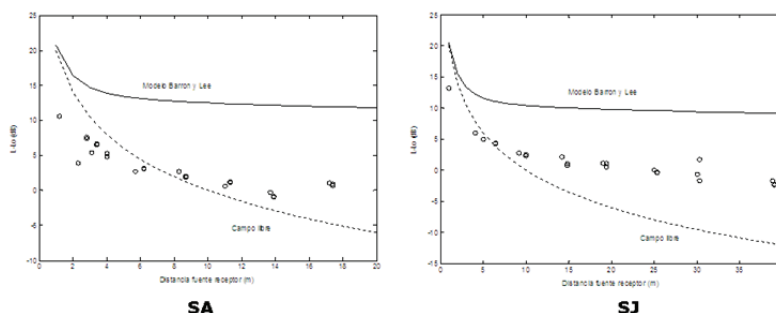
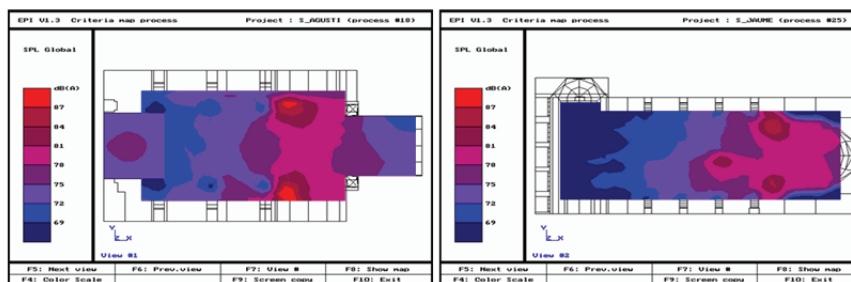


Figura 3: Distribución del campo sonoro (24 receptores)



$L_p$  SA = 74,31 dB

$L_p$  SJ = 74,54 dB

Figura 4: Mapas del nivel sonoro para la policoralidad



A continuación se muestran los mapas obtenidos para el índice de claridad C80 (fig. 5) con los valores máximos y mínimos, y los mapas obtenidos para el índice RASTI (fig. 6).

### 5. CONCLUSIONES

En el análisis de la policorralidad para estos espacios sacros se aprecia que la distribución del campo sonoro en el interior de las dos iglesias se observa como la tendencia se aproxima a la del algoritmo propuesto por Barron y Lee, figura 3, con un campo sonoro difuso. Los valores de los niveles sonoros LP obtenidos son prácticamente los mismos para las dos iglesias con valores en torno a los 74 dB. Los mapas de la figura 4 presentan distribuciones del campo sonoro aceptables para las dos iglesias.

El índice de claridad C80 presenta un valor medio para la iglesia de Sant Jaume por debajo del límite inferior óptimo, para Sant Agustí los valores están dentro de los márgenes deseables. Al observar los mapas de distribución del índice C80 se comprueba que los valores mejoran en las proximidades de las fuentes y que en todos los casos presentan distribuciones con valores aceptables para la buena audición tanto de la melodía como de la armonía, cubriendo de forma homogénea toda la zona destinada tanto a la audición como las zonas destinadas para la interpretación, es decir, para las fuentes - música.

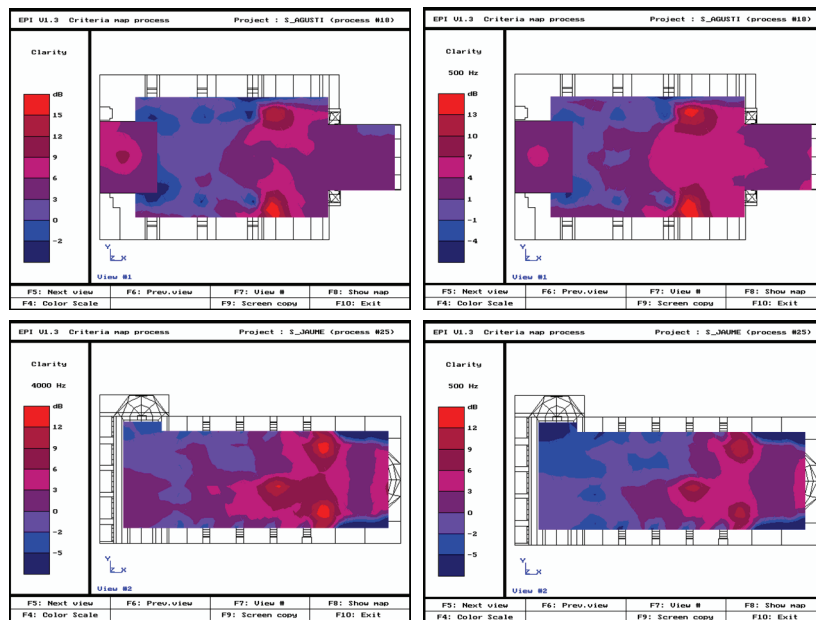


Figura 5: Mapas C<sub>80</sub> con los valores máximos y mínimos para la policorralidad PC  
Mapas RASTI PC

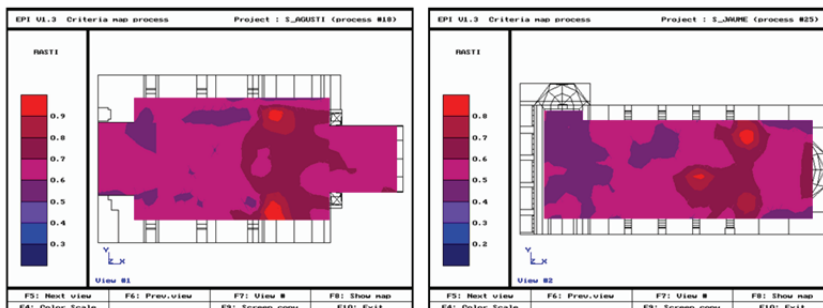


Figura 6: Mapas RASTI policorralidad PC

El estudio y análisis de la inteligibilidad de la palabra se realiza a partir del índice de transmisión de la palabra STI y del índice rápido RASTI. Los resultados obtenidos en ambas iglesias para el índice STI están por debajo de lo deseable, 0,6, para poseer unas buenas condiciones acústicas para la palabra, con valores medios de 0,53 para Sant Agustí y de 0,42 para Sant Jaume, valores calificados como pobres.

Sin embargo al analizar la distribución en los mapas obtenidos del índice RASTI los resultados mejoran tomando valores entre 0,6 y 0,7 para Sant Agustí y entre 0,5 y 0,6 en Sant Jaume. Estos valores están calificados de buenos a débiles. Se puede concluir que la respuesta a la transmisión de la palabra en las dos iglesias será débil, con tendencias hacia pobres o buenas según la distribución y la naturaleza de las fuentes. Es notable el aumento en estos índices en zonas cercanas a las fuentes, lo que todavía pone más de manifiesto la dependencia en la distribución de estos índices con la disposición de las fuentes.

Los resultados obtenidos para las dos iglesias del índice STI, índice de transmisión de la palabra, se consideran débiles, con tendencia hacia pobre para la iglesia de Sant Jaume. La transmisión de la palabra será débil o pobre, dificultando la inteligibilidad de la misma, si bien es cierto, que este fenómeno se acusa más en Sant Jaume que en Sant Agustí, cuyos índices mejoran hasta casi alcanzar los valores superiores a 0,6 que califican a las salas como buenas para la inteligibilidad de la palabra.

A partir de este análisis se pueden obtener unos resultados orientadores que permiten caracterizar la identidad acústica de un espacio sacro y su respuesta respecto al estilo musical sacro de la policoralidad, que tuvo su mayor apogeo hacia finales del renacimiento y durante el barroco fundamentalmente. Como ejemplo se ha realizado el análisis en dos iglesias de estructura y tamaño diferente, que responden a dos modelos arquitectónicos tipo y cuyos resultados pueden ser extrapolados para la mayoría de las iglesias presentes en la Comunitat Valenciana. Funcionan pues como dos modelos diferenciados, cuyo análisis puede servir, en primera aproximación, para el análisis de la policoralidad en otros espacios eclesiásticos de características similares. Es cierto que cada iglesia, catedral, basílica, ermita o capilla, tienen particularidades arquitectónicas u ornamentales que las diferencian y que a su vez influyen en su comportamiento acústico. Para un análisis más detallado y particularizado de cada caso se deberán tener en cuenta tanto las diferencias estructurales como los detalles ornamentales.

## 6. REFERENCIAS

- [1] J. J. SENDRA, J. NAVARRO: La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del paleocristiano al tardobarroco, IUCC, ETSA, servicio publicaciones Universidad Sevilla, 1997.
- [2] J. L. LÓPEZ GARCÍA: Conjunto Coral, Artes Gráficas Mariano Bo, 1986.
- [3] J. LÓPEZ-CALO: Historia de la música española, 3. Siglo XVII, Alianza Música, 1983.
- [4] M. RECUERO Y C. GIL: Acústica arquitectónica, E.U. de Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones, U.P.M., 1993.
- [5] A. ROMERO, J.SEGURA, E. A. NAVARRO: Sant Agusti Church Acoustic Rehabilitation. A case of Study, Lambert Academic Publishing, 2011.
- [6] L. CREMER, H. A. MÜLLER: Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science Publishers Ltd. England, 1982.
- [7] D. MAERCKE, J. VAN MARTÍN: "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software", Applied Acoustics, vol. 38, pp. 93-114, 1993.
- [8] C.S.T.B.: Epidaure. Prediction of auditorium acoustics, User's manual. Version 1.0. 0'1dB. Villeurbanne, 1994.
- [9] J. J. SENDRA, T. ZAMARREÑO, J. NAVARRO, J. ALGABA: El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación, IUCC, ETSA, servicio publicaciones Universidad de Sevilla, 1997.
- [10] J. SEGURA, A. GIMÉNEZ, J. ROMERO, S. CERDÁ; "A comparison of different techniques for simulating and measuring parameters in a place of worship: Sant Jaume Basilica in Valencia, Spain". Acta Acustica united with Acustica. Vol. 97 Number 1, January/February 2011, pp. 155-170.
- [11] J. SEGURA, L. VERA, A. BARBA, R. MONTELL, A. GIMÉNEZ, M. FERNÁNDEZ, R. CIBRIÁN, S. CERDÁ, J. ROMERO; "Análisis de auralizaciones del nuevo órgano de la Basílica de San Jaume de Algemesí (Valencia)". TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPTIEMBRE 2009.
- [12] M. RECUERO: Acústica arquitectónica aplicada, Paraninfo, 1999.