

TÉCNICAS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL COMO HERRAMIENTA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL CAMPO SONORO EN SALAS

Segura, Jaume¹; Cerdá, Salvador²; Barba, Arturo³; Cibrián, Rosa⁴;
Montell, Radha³; Giménez A.³,

¹IRTIC – Universitat de València, C/ Catedràtic Dr José Beltrán, 2

²E.T.S.I. Arquitectura, Univ. Politècnica de València, Camí de Vera s/n

²E.T.S.I. Industriales, Univ. Politècnica de València, Camí de Vera s/n

¹Facultat de Medicina – Universitat de València

{jsegura@uv.es, salcerjo@mat.upv.es, arbarse@doctor.upv.es, rosa.m.cibrian@uv.es
radmonse@upvnet.upv.es, agimenez@fis.upv.es }

Resumen

Habitualmente, las salas se caracterizan por los valores promedio de algunos parámetros acústicos. A partir de los valores óptimos mayoritariamente reconocidos, los especialistas consideran adecuada o no una sala para un cierto uso. Esto nos puede llevar a ver salas en las que los valores medios estén en el rango óptimo, pero que en la práctica no lo sean si los valores medios carecen de representatividad. En trabajos recientes hemos obtenido un modelo que permite clasificar una sala con respecto a la representación de música clásica que depende del tiempo de reverberación (T30), el factor de energía lateral (JLF) y el envolvimiento del oyente (LEV). A partir de las medidas de estos tres parámetros y utilizando técnicas de interpolación espacial (Kriging), podemos determinar los mapas de calidad para salas. Estos mapas son una útil herramienta que permite visualizar de forma rápida y clara, si la sala cumple con los criterios de calidad como salas de conciertos de música clásica.

Palabras clave: Kriging, calidad sonora, campo sonoro, acústica de salas.

Abstract

Usually rooms are characterized by average values of some acoustic parameters. From the optimal values mostly recognized, specialists can consider adequate rooms for a musical or speech use according to its average values. This can induce us to see some rooms that are in the optimal range, but in practice they are not as good as they show because these average values are not representative. In recent works, we have got a model to classify a room for classical music which depends on the reverberation time (T30), the lateral energy factor (JLF) and the listener envelopment (LEV). From measurements of these three parameters and using spatial interpolation techniques (Kriging), we can determine quality maps for these rooms. These maps are a useful tool to get a quick and clear view of the room's quality criteria such as concert halls for classical music.

Keywords: Kriging, sound quality, sound field, room acoustics.

PACS no. 43.55.Cs, 43.55.Gx

1 Introducción

El análisis de la variación estadística de parámetros en superficies limitadas es una aplicación que se trata tradicionalmente mediante técnicas de estadística espacial. Esta técnica fue esbozada por R.A. Fisher en 1935 y desarrollada por otros matemáticos e ingenieros, como D.G Krige (1951) [1] o G. Matheron (1962) [2], que desarrollaron una técnica de predicción geoestadística a la que se llamó Kriging. La técnica de Kriging ha sido aplicada a diferentes áreas, como en epidemiología, en ecología, en agricultura, en meteorología, en geología, en oceanografía. En el campo de la acústica, las técnicas de Kriging han sido aplicadas en acústica ambiental para generar modelos semiempíricos y monitorizar la variación espacial del ruido ambiental [3].

El método de Krige o Kriging es usado como técnica de interpolación espacial. En él, los datos son un conjunto de observaciones de ciertas variables de interés que presentan cierta correlación espacial. Normalmente, el resultado del Kriging es el valor esperado y su varianza calculada para cada punto en un área. El promedio del Kriging en cada localización puede ser considerado como la media del conjunto completo de posibles realizaciones, condicionadas a los datos. Por otra parte, la varianza del Kriging será la varianza del conjunto.

En el diseño de salas, en las que la acústica debe tomarse en especial consideración, los modelos acústicos se ajustan para obtener los valores óptimos de los parámetros seleccionados [4]. El gran número de parámetros usados tradicionalmente para determinar la calidad acústica ha dado lugar a diversas aproximaciones, de acuerdo con diferentes atributos básicos en consideración [5][6][7].

Los parámetros acústicos objetivos corresponden a calidades acústicas específicas y que pueden reflejarse en ciertos aspectos de percepción subjetiva, pero no existe ningún parámetro concreto de diseño que podamos decir que se corresponda con la calidad percibida de una sala, aunque diferentes autores han tratado de definir modelos que combinen los parámetros acústicos estudiados con el establecimiento de rangos que permitan la correlación de la percepción subjetiva con la medida objetiva de estos entornos [8].

Entre los autores que más han influido en los estudios de relación entre la percepción subjetiva y objetiva se encuentran Beranek y Ando, los cuales han contribuido desarrollar una teoría para obtener un método de categorización objetiva de salas [9][10]. El modelo que desarrolla la teoría de Ando-Beranek se basa en cálculos predictivos de parámetros objetivos usando tests comparativos por pares y señales sintetizadas en una cámara anecoica. La fórmula que desarrolla el modelo de Ando-Beranek de preferencia subjetiva tiene en cuenta las aportaciones que realiza cada uno de los parámetros independientes, que aporta su teoría, con unos determinados pesos.

$$S_{\alpha} = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \cdot S_i \quad \text{con } S_i = g(x_i) = -a_i \cdot |x_i|^{3/2} \text{ y } \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1 \quad (1)$$

Este modelo de Ando-Beranek contempla unos determinados pesos α_i , de acuerdo con el trabajo de Beranek [10] para los parámetros x_i , que según Beranek son IACCe3, ITDG, G_{mid} , EDT_{mid} , BR y SDI (este último no ha sido contemplado en este trabajo).

La reducción mediante análisis factorial de un conjunto de 14 parámetros objetivos para la caracterización de salas a partir de las medidas realizadas en diferentes salas de acuerdo con la ISO 3382, nos lleva a un conjunto de 3 factores que explican el 78% de la varianza de estos factores [11]. Estos tres factores vienen representados por los parámetros: RT_{mid} , LFCe4 y LEV (listener envelopement), que constituyen una base de parámetros independiente.

La correlación de esta base con el conjunto de parámetros de preferencia subjetiva S_i nos da una solución óptima como la que muestra la siguiente ecuación:

$$S_\alpha = 0.29 \cdot S_2 + 0.36 \cdot S_3 + 0.36 \cdot S_5 = -1.49 + 0.36 \cdot RT_{mid} + 2.76 \cdot LFC_{E4} - 0.19 \cdot LEV, \text{ con } r=0.97 \quad (2)$$

Con esta expresión podemos determinar, mediante medición, la calidad subjetiva en diferentes localidades de una sala. Por otra parte, teniendo en cuenta la categorización de salas presentada en [8] de acuerdo con la cuestión específica que se plantea en esta encuesta, se puede establecer un criterio de calidad de acuerdo con este parámetro que es:

$$-\frac{1}{3} < S_\alpha < 0 \quad (3)$$

En este trabajo, presentamos una aplicación de la técnica de estadística espacial, mediante el método de Kriging, para determinar la calidad de las localidades en diferentes salas de conciertos y teatros de acuerdo con la teoría explicada. También se realizará un estudio de los errores de esta técnica.

2 Metodología

A partir de las medidas realizada en diferentes salas, según la norma ISO-3382 [12] y en la IEC 60268[13], con un equipo compuesto por: un portátil con una tarjeta de sonido profesional (VxPocket v2), dos micrófonos G.R.A.S. Tipo 40 AK y sus correspondientes preamplificadores y alimentación (GRAS Tipo 26AK y GRAS 12AA), una etapa amplificadora M-1000, una fuente dodecaédrica DO12 y el software de captura y análisis de las señales WinMLS [14], se han obtenido las respuestas impulsivas en cada una de las salas consideradas, mediante ensayos con señal sweep sinusoidal logarítmico. Todas las medidas se realizaron con las salas vacías y la fuente situada en el centro del escenario.

Las salas estudiadas y sus principales características se muestran en la siguiente Tabla 1:

Tabla 1 – Salas estudiadas.

Sala	Tipo	Uso	Año	Asientos	#Medidas	V(m ³)	RT(s)
Paraninfo	rectangular	Conferencias, congresos y conciertos solistas; orquesta de cámara y coro	1978	385	24	2700	1.3
Auditorio de Ribarroja	rectangular	Teatro, ópera, danza y conciertos	1994	783	39	7830	1.79
Teatro Principal de Valencia	herradura	Teatro, ópera, danza y conciertos	1832 - r1991	1224	53	6986	1.5
Auditori de Torrent	hexágono irregular (abanico+abanico invertido)	conferencias, congresos, conciertos, ópera y danza	1997	606	48	6430	1.87

2.1 Krigin

Los datos de tiempos de reverberación (RT_{mid}), fracción de energía lateral temprana (LFC_{e4}) y involucramiento del oyente (LEV) nos permiten determinar el valor de la calidad subjetiva de una sala,

S_α , calculada a partir de la expresión (2), y que hemos analizado en diferentes puntos de cada sala, que constituyen un conjunto de datos espaciales localizados mediante las coordenadas puntuales en el lugar de la sala donde fueron registrados. Denotando por $Z(x)$ el parámetro estudiados (S_α), disponemos los datos como $\{Z(x), x \in D\}$, dentro del conjunto completo de localizaciones de modelización D .

De esta forma, lo que pretendemos predecir es el valor del proceso $Z(x_0)$ en una localización cualquiera x_0 , particularmente en las de un conjunto de validación. Los parámetros disponibles contienen información de un conjunto de covariables asociado que pueden influir sobre ellos. En consecuencia, se modeliza $Z(x)$ como la suma de una tendencia, como una función de las covariables que influyen en el proceso que expresa su variación a gran escala, más un error aleatorio o perturbación que recoge la variación a pequeña escala,

$$Z(x) = \mu(x) + \delta(x) \quad (4)$$

donde $E[Z(x)] = \mu(x)$ y $\delta(\bullet)$ es un proceso Gaussiano intrínsecamente estacionario de media cero, cuya caracterización de la dependencia espacial viene dada por el variograma

$$2\gamma(h) = \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = \text{Var}[\delta(x+h) - \delta(x)] \quad (5)$$

Estos cálculos se han realizado mediante el uso del paquete estadístico R [15], para el ajuste de los variogramas.

3 Resultados y discusión

Las salas seleccionadas para este estudio presentan una diversidad, tanto en forma como en volumen, como podemos observar en la tabla 1. En el caso del Auditori de Ribarroja y del Paraninf, ambas salas son rectangulares pero con una diferencia considerable en volumen y número de butacas. El Auditori de Torrent tiene una forma hexagonal irregular y el Teatro Principal de Valencia la tiene de herradura. Todas estas peculiaridades influyen en la configuración de las características acústicas de cada una de las salas, por lo que la percepción subjetiva en cada una de ellas será diferente.

Nuestro propósito es obtener de manera gráfica una representación espacial de los niveles de calidad de percepción subjetiva. Para ello, es necesaria la aplicación de una técnica de estadística espacial (Kriging) en la determinación de la calidad subjetiva percibida en las diferentes salas, las cuales tienen diferentes usos. Para ello, hemos usado un ajuste de la superficie de tendencia que configuran los puntos de medida mediante mínimos cuadrados generalizados, utilizando una función exponencial para evaluar la covariancia del ajuste.

La aplicación de esta técnica al conjunto de resultados obtenidos a partir de las mediciones de los parámetros objetivos RT_{mid} , $LFCE4$ y LEV , nos permite obtener representaciones como las que se observan en la figura 1.

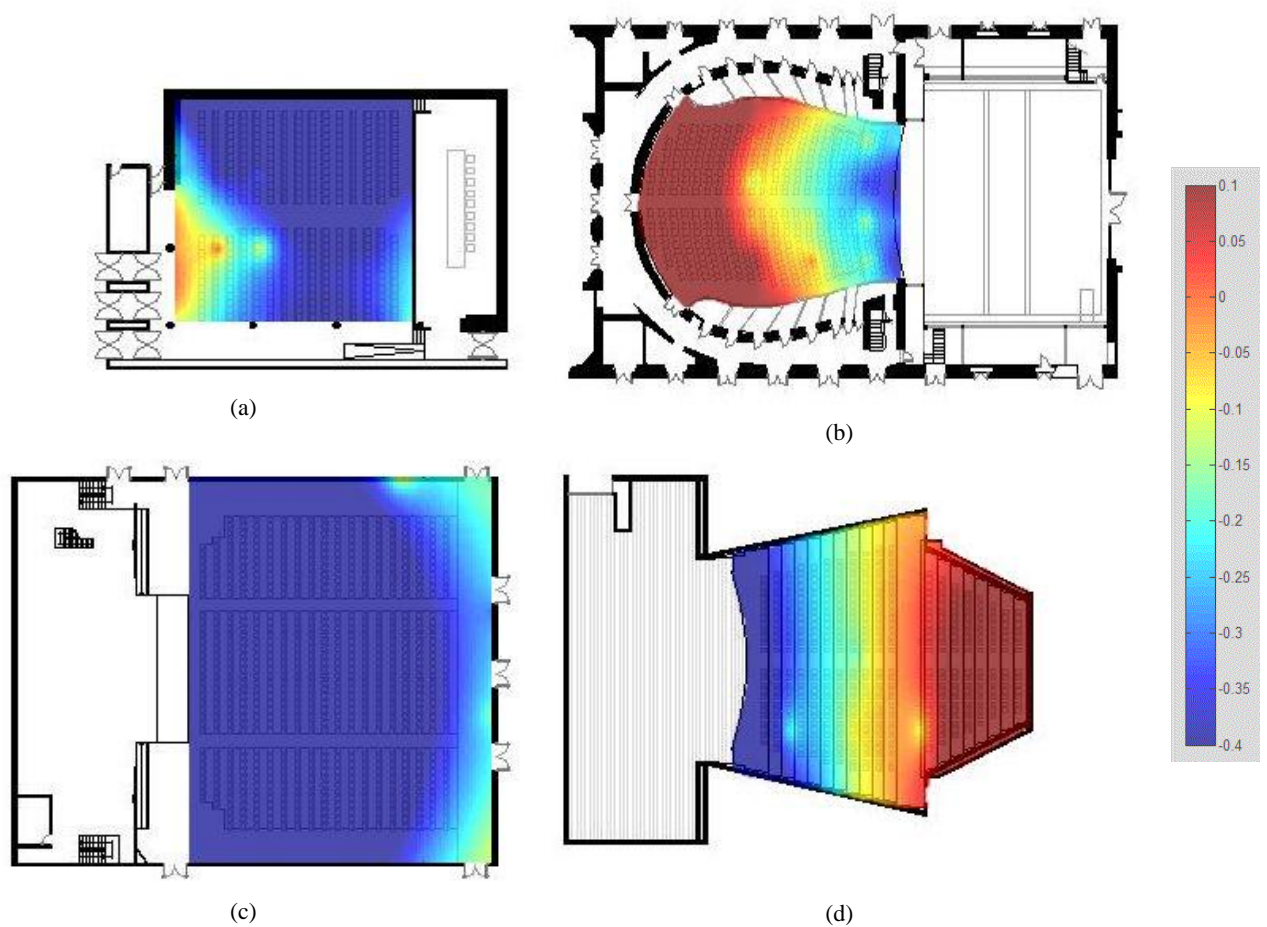


Figura 1 – Representación del parámetro S_α de calidad en 4 salas: (a) Paraninfo UPV, (b) Teatro Principal de Valencia, (c) Auditori de Ribarroja y (d) Auditori de Torrent

En la representación de la figura 1, cada una de estas salas tiene una calidad acústica diferente. De acuerdo con el criterio establecido por la expresión (3) que establece un criterio de calidad para la percepción subjetiva según S_α , y según lo que se aprecia en cada uno de los casos de la figura 1, las salas (b) y (d) serían las únicas que presentan cierta calidad de percepción subjetiva. Igualmente, aquellas posiciones en las que S_α tenga un valor por encima de cero tendrán color rojo, mientras que aquellas en las que S_α sea menor que -0.33 tendrán un color azul oscuro. En este último caso, y de acuerdo con [4], en estas localidades se percibe un LEV (listener envelopment) en exceso lo cual también se relaciona con un exceso de fuerza tardía (G_L) en estas posiciones. Por el contrario, en aquellas posiciones donde haya un color rojo (por encima de 0), se percibe un LEV en defecto que está relacionado con una falta de G_L .

De esta manera, esta aplicación nos puede ser útil para determinar las localidades mejor ubicadas o por otra parte puede servir como criterio para el diseño y mejora de salas.

3.1 Estudio de errores

Debido a su naturaleza estadística, el método de Kriging conlleva una serie de errores que son inherentes a la técnica. En nuestro caso, hemos evaluado la desviación estándar del Kriging sobre toda la malla a partir de los resultados de ajuste obtenidos mediante la aplicación del método de mínimos cuadrados generalizados. Los resultados para las cuatro salas consideradas se resumen en la figura 2.

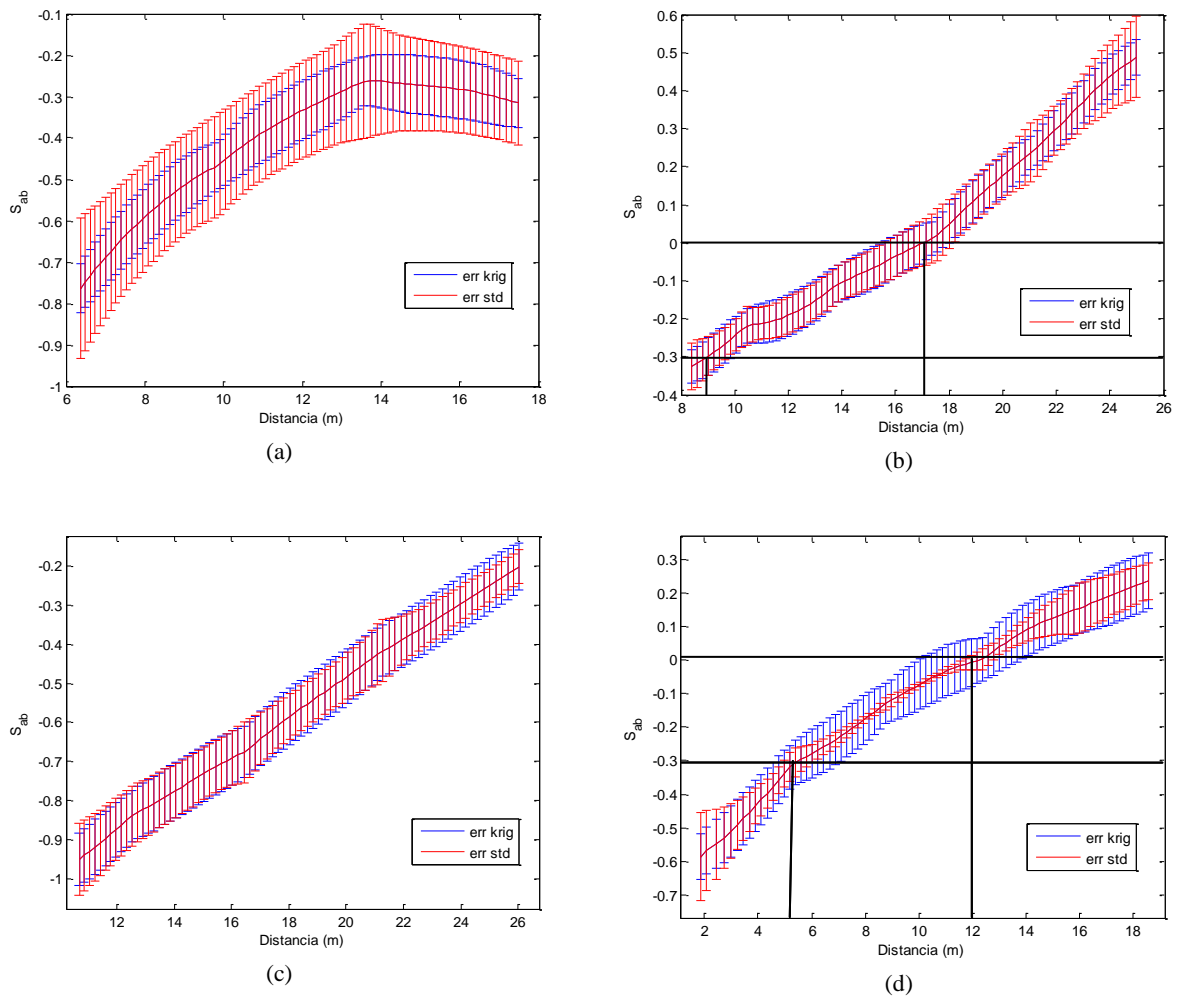


Figura 2 – Distribución promedio por filas del parámetro S_{α} con la distancia (se muestra el error del Kriging y la media de la desviación estándar por filas) : (a) Paraninfo UPV, (b) Teatro Principal de Valencia, (c) Auditori de Ribarroja y (d) Auditori de Torrent

Observamos que en el caso del Teatro Principal y del Auditori de Valencia, el promedio de la desviación típica por filas de la matriz del Kriging coincide bastante bien con el error del Kriging hasta media distancia de la fuente. A grandes distancias se produce desviación. En el caso del Paraninfo, el promedio de la desviación típica por filas está siempre por encima del error del Kriging y en el caso del Auditori de Torrent siempre por debajo excepto a distancias cortas respecto a la fuente. Por otra parte, podemos observar en (b) y (d), que el rango de distancias medias que corresponde a las

localidades que se encuentran dentro del intervalo óptimo son, en el Teatro Principal 9-17 m y en el Auditori de Torrent 5-12 m.

4 Conclusiones

En este trabajo hemos aplicado una técnica de estadística espacial (Kriging) al estudio de parámetros de calidad acústica en diferentes salas. También se ha realizado un estudio de errores promedio de esta técnica respecto a la distancia a la fuente.

Por una parte, se ha establecido un criterio gráfico de identificación de calidades de percepción subjetiva en una sala, mediante la aplicación de la técnica de Kriging. Según este criterio, es relativamente sencillo identificar aquellas localidades en las que el oyente no se sentira ‘envuelto’ por el sonido (corresponden a localidades en rojo, con falta de LEV y consecuentemente de G_L) o aquellas en las que por el contrario son susceptibles de ‘saturar’ la percepción sonora (como en el caso de las localidades en azul oscuro, con exceso de LEV y por lo tanto de G_L). Todos los valores intermedios, son apreciados como buenos para una sala.

El estudio de los errores promedios producidos por la técnica de Kriging nos han permitido estudiar la relación que existe entre ellos y la desviación típica media por filas con respecto a la distancia a la fuente.

Este procedimiento puede ser útil en los casos de rehabilitación y mejora de la calidad de percepción subjetiva en una sala.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto de investigación BIA2008-05485. Los autores también quieren agradecer al profesor Michael Vorländer del *Institut für Technische Akustik* de la RWTH-Aachen, su apoyo en la realización de este trabajo durante la estancia realizada en su laboratorio y a la UVEG la beca UV-INV_EPDI12-67818 para la estancia en Aquisgrán (Alemania) con el equipo investigador.

Referencias

- [1] Krige, D. G. “A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand”. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa* 52 (6): pp.119-139 (1951).
- [2] Matheron, G. *Traité de Géostatistique appliquée*. Tome 1, Éditions Technip, Paris, 1962
- [3] O. Baume, B. Gauvreau, M. Brengier, F. Junker, H. Wackernagel, and J-P Chils. “Geostatistical modeling of sound propagation: Principles and a field application experiment”. *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 126, Issue 6, pp. 2894-2904 (2009).
- [4] Cerdá, S.; Giménez, A.; Cibrián, R. “An Objective Scheme for Ranking Halls and Obtaining Criteria for Improvements and Design”. *JAES*, Volume 60, Issue 6, pp. 419-430 (2012).

- [5] M.R. Schroeder, D. Gottlob, and K.F. Siebrasse. “Comparative Study of European Concert Halls: Correlation of Subjective Preference with Geometric and Acoustic Parameters”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 56, pp. 1195-1201 (1974).
- [6] T.Yamamoto and F. Suzuki, “Multivariate Analysis of Subjective Measures for Sound in Rooms and the Physical Values of Room Acoustics”. (in Japanese). *J. Acoust. Soc. Jpn.* 32, pp. 599-605 (1976)
- [7] L.G. Marshall. “An Acoustics Measurement Program for Evaluating Auditoriums Based on the Early/Late Sound Energy Ratio”. *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 96, Issue 4, pp. 2251-2261 (1994)
- [8] A. Gimenez, R.M. Cibrian, S. Giron, T. Zamarreño, J.J. Sendra, A. Vela and F. Daumal. “Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls,” *Acta Acustica united with Acustica*, Volume 97. Number 6. pp. 949-965 (2011).
- [9] Y. Ando. “Calculation of Subjective Preference at Each Seat in a Concert Hall”, *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 74, Issue 3, pp. 873-887 (1983).
- [10] L. Beranek. *Concert halls and opera houses: How they sound?*. Acoust. Soc. Am., Woodbury, NY (1996)
- [11] S. Cerdá, A. Giménez, J. Romero and R.M. Cibrián. “A Factor Analysis Approach To Determining A Small Number Of Parameters For Characterising Halls”, *Acta Acustica united with Acustica*. Volume 97, Number 3, May/June, pp. 441-452 (2011).
- [12] ISO 3382:1997(E), Second edition 1997-06-15, *Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*.
- [13] IEC 60268 - *Sound system equipment. International Electrotechnical Commission*.
- [14] L. Morset. *WinMLS 2004 - User manual*. (2004).
- [15] K. Hornik. *The R statistical software*. <http://cran.r-project.org> (2011)