

Determinación del número de posiciones de medida en una sala mediante el uso de variogramas

REFERENCIA PACS: 43.15.+s

Montell, Radha¹; Cerdá, Salvador²; Segura, Jaume³; Giménez, Alicia¹; Cibrián, Rosa⁴; Barba, Arturo¹

1 E.T.S.I.Industriales., Univ. Politécnica de Valencia, Camí de Vera s/n, radmonse@upvnet.upv.es, agimenez@fis.upv.es, arbarse@doctor.upv.es

2 E.T.S.I.Arquitectura, Univ. Politécnica de Valencia, salcerjo@mat.upv.es

3 Institut de Robòtica, Universitat de València, Polígon de la Coma s/n, jsegura@uv.es

4 Facultad de Medicina. Universidad de Valencia, rosa.m.cibrian@uv.es

ABSTRACT

The ISO 3382 standard specifies the procedure and conditions for room acoustics measurements and for the calculation of impulse responses, as well as a minimal set of parameters to take into account for the acoustical evaluation of a room. Moreover, it specifies the number of measurement positions, setting a minimum according to the number of seats of the room. These indications, in general, do not guarantee that the full variability of the room parameters will be recorded. In this work, we propose a method to estimate the minimum number of positions required to guarantee a satisfactory representation of the variations in parameter values by using variograms, spatial statistics models.

RESUMEN

La norma ISO 3382 define y regula el proceso y condiciones de medición acústica y obtención de respuestas impulsivas así como un conjunto de parámetros mínimos a tener en cuenta en la evaluación acústica de una sala. Además, ésta especifica el número de posiciones de medida, estableciendo un mínimo acorde al número de asientos en la sala. Estas indicaciones, en general, no garantizan el registro de toda la variabilidad de los parámetros en la sala. En este trabajo se propone un método que, mediante el uso de modelos estadísticos espaciales, variogramas, estima el número mínimo de posiciones necesario para garantizar una buena representatividad de la variación en los valores de los parámetros.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de análisis espacial permiten el estudio de la variación estadística de los parámetros dentro de un área determinada. Con estas técnicas es posible obtener, a partir de un modelo ajustado con valores experimentales, predicciones de los valores en posiciones donde no se dispone de medidas. Un elemento básico de estas técnicas es el variograma, el cual es utilizado para estimar modelos, para calcular los pesos en la técnica de Krigin y sus errores. Los variogramas proporcionan una descripción de cómo se relacionan los datos con la distancia. Entre los matemáticos que desarrollaron estas técnicas se encuentran N. Cressie [1], G. Matheron [2] y J.P. Chiles y P. Delfiner [3].

Estas técnicas se han aplicado principalmente en geoestadística [3], para estudiar la variabilidad del suelo, aunque también se utilizan en hidrología, epidemiología, ecología,

agricultura, meteorología, geología u oceanografía. En el campo de la acústica, éstas se han utilizado en acústica ambiental para generar modelos semiempíricos y monitorizar la variación espacial del ruido ambiental [4]; en [5] se utilizan los variogramas para caracterizar la exposición al ruido en el ámbito profesional a lo largo del tiempo; y en [6] y [7] se calculan variogramas y se aplica la técnica de Kriging para obtener una visualización más óptima de los parámetros medidos.

Un variograma es una función que describe el grado de dependencia espacial de un proceso estocástico. Un semivariograma se define como la mitad de la varianza de la diferencia de valores en dos posiciones, o lo que es lo mismo, para una distancia h . Si los datos son estacionarios, entonces el variograma y la covariancia se encuentran teóricamente relacionados. Esta función, generalmente, crece con la distancia y se describe mediante tres parámetros: *nugget*, *sill* y *range* (Figura 1). El *nugget* representa los posibles errores de medida, el *sill* equivale a la varianza cuando la distancia h tiende a infinito y el *range* se define como la distancia a la cual los datos ya no se autocorrelacionan. El semivariograma se calcula con la expresión indicada en la Ecuación 1, donde h es la distancia, $N(h)$ representa el conjunto de pares i, j , tales que $|x_i - x_j| = h$, y $|N(h)|$ es el número de pares que existen en el conjunto.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 |N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2 \quad (1)$$

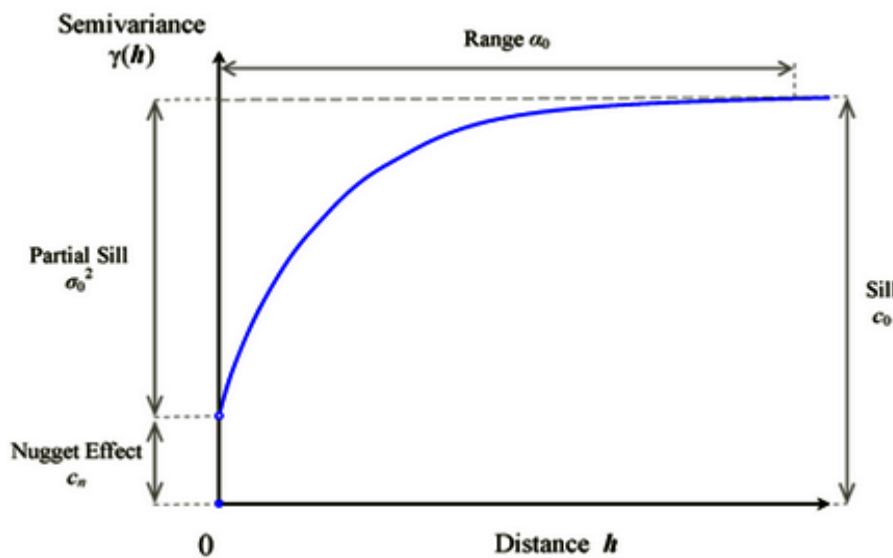


Figura 1. Representación gráfica de un variograma y sus parámetros

Por otro lado, la norma ISO 3382 [8] define y regula el proceso y condiciones de medición acústica y obtención de respuestas impulsivas así como un conjunto de parámetros mínimos a tener en cuenta en la evaluación acústica de una sala. No obstante, carece de suficiente detalle en algunos campos y esto implica una variabilidad que puede dar pie a serios errores tanto en la medición, como en el cálculo de parámetros y simulación. Además, algunas partes de la metodología introducen una incertidumbre, que de forma acumulativa, puede hacer que varíe el resultado y que los valores finales no sean válidos. En los últimos años, se está tomando conciencia de estas restricciones y se están investigando nuevas técnicas que proporcionen mayor fiabilidad a los resultados. En [9], Christensen et al. analiza las incertidumbres que presentan varias fases: proceso de medición (fuente no completamente omnidireccional, ruido de fondo, truncado, filtrado de la respuesta impulsiva), modelado geométrico y ajuste de materiales (simplificación del modelo, determinación de los coeficientes de absorción y dispersión). En [10], San Martín y Arana analizan las medidas tomadas con cuatro fuentes omnidireccionales que cumplen la norma y las diferencias en los parámetros que con ellas se obtienen. Analizan también el resultado de las simulaciones y muestran que, en algunos casos,

las diferencias entre posiciones de receptores son mayores de las permitidas. En [11], Witew et al. analiza la recomendación de la norma respecto el número de posiciones de medida. Para ello, utilizan el algoritmo de Monte Carlo para obtener una función que modele el parámetro Claridad (C80) en función del desplazamiento entre posiciones de medida. Con esa función obtienen la distancia que debe existir entre posiciones de medida para poder describir con exactitud las condiciones acústicas de la sala. En [12], Hidaka estudia el número de posiciones necesarias analizando un conjunto de parámetros determinado y concluye que este número debe ser superior al que recomienda la norma. Estos estudios demuestran la necesidad de evaluar las directrices de la norma y ajustarlas para obtener una mayor fiabilidad.

En este trabajo se propone la aplicación de las funciones variogramas para determinar un modelo que estime la distancia máxima entre dos posiciones de medida para que la variación del parámetro estudiado sea menor que 1 JND. Mediante esta técnica podemos determinar el número de posiciones mínimo necesarias en la sala.

2. METODOLOGÍA

2.1. Medidas

Las medidas de la sala se han realizado según la norma ISO-3382 [8]. Se ha utilizado 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 [13]. A partir de las medidas, se han obtenido las respuestas impulsivas de cada una de las posiciones establecidas, mediante ensayos con señal sweep sinusoidal logarítmica. Todas las medidas se realizaron con la sala vacía y la fuente situada en el centro del escenario.

La sala seleccionada para este estudio es el Auditorio de Ribarroja, utilizada para teatro, danza opera y conciertos; sus características se encuentran indicadas en la Tabla 1 y su planta y alzado en la Figura 2.

Forma	Año construcción	Núm. Asientos	Posiciones de medida	Posiciones medida según norma	Volumen (m ³)	Volumen /asiento (m ³)	TR (s)
Rectangular	1994	738	39	7	7830	10	1.79

Tabla 1. Características Auditorio de Ribarroja (Valencia)

2.2. Variogramas

A partir de las medidas se obtuvieron los valores de los parámetros T30, C80 y G para cada punto de la sala medido. Los JND de cada uno de estos parámetros son 0.09s, 1dB y 1dB, respectivamente.

En primer lugar se calcularon los semivariogramas empíricos con los valores de los parámetros y las coordenadas de las posiciones de medida. Una vez calculado el modelo empírico, se calculan varios modelos teóricos con diferentes funciones y parámetros y se selecciona el que mejor se ajuste a los datos, realizando para ello un ajuste por mínimos cuadrados. Las funciones teóricas consideradas son las siguientes, siendo h : distancia y $\gamma(h)$: semivariancia.

Respecto a las funciones acotadas, su definición es la indicada en la tabla si $\gamma(h) < sill$ y $\gamma(h) = sill$ si $\gamma(h) \geq sill$.

Lineal acotado	$\gamma(h) = \frac{sill}{range} * h$
Circular acotado	$\gamma(h) = sill * \left(1 - \frac{2}{\pi} \arccos \frac{h}{range} + \frac{2 * h}{\pi * range} * \sqrt{1 - \frac{h^2}{range^2}} \right)$
Esférico acotado	$\gamma(h) = sill * \left(\frac{3 * h}{2 * range} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{range} \right)^3 \right)$
Exponencial	$\gamma(h) = sill * \left(1 - e^{-\frac{h}{range}} \right)$
Gaussiano	$\gamma(h) = sill * \left(1 - e^{-\frac{h^2}{range^2}} \right)$

Tabla 2. Funciones de variogramas teóricos considerados en el ajuste del variograma experimental

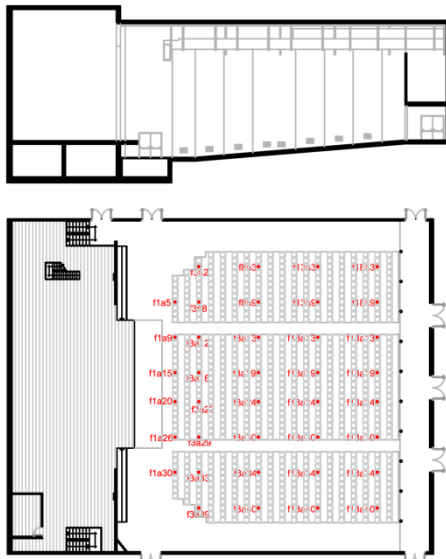


Figura 2. Planta y alzado Auditorio Ribarroja junto con posiciones de medida

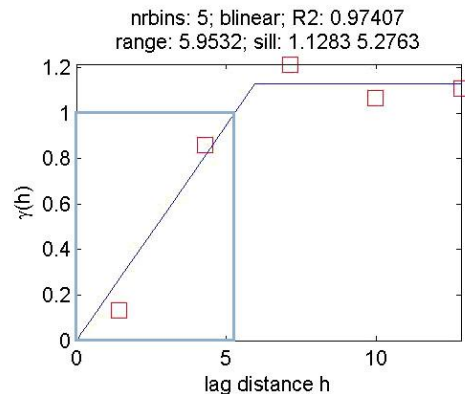


Figura 3. Ejemplo de variograma teórico ajustado a variograma experimental

Para calcular la distancia máxima a la que deben posicionarse los micrófonos, se estableció que $\gamma(h) = 1$ JND, ya que dentro de este rango las diferencias entre valores no son perceptibles y, para cada modelo teórico se despejó la variable distancia (h). Para el caso del modelo lineal, la ecuación para calcular la distancia quedaría así:

$$h = JND * \frac{range}{sill} \quad (2)$$

En la Figura 3 se puede observar la zona de corte y el valor para h correspondiente (5.28m).

Para obtener un resultado base, se utilizaron las 39 medidas disponibles. El procedimiento propuesto consiste en seleccionar inicialmente el número de puntos que recomienda la norma para el número de asientos de la sala; de forma aleatoria pero repartidos uniformemente por todo el espacio de butacas, medir en estas posiciones y calcular el modelo de variograma teórico que mejor se ajuste a los datos medidos. A partir del modelo teórico, se obtiene la distancia mínima a la que deben estar las posiciones. Si esta distancia es menor que la que existe con las posiciones escogidas, se selecciona una posición más y se repite el procedimiento. Si la distancia es mayor o igual, ya no es necesario medir más posiciones. Este procedimiento puede verse de forma esquemática en la Figura 4.

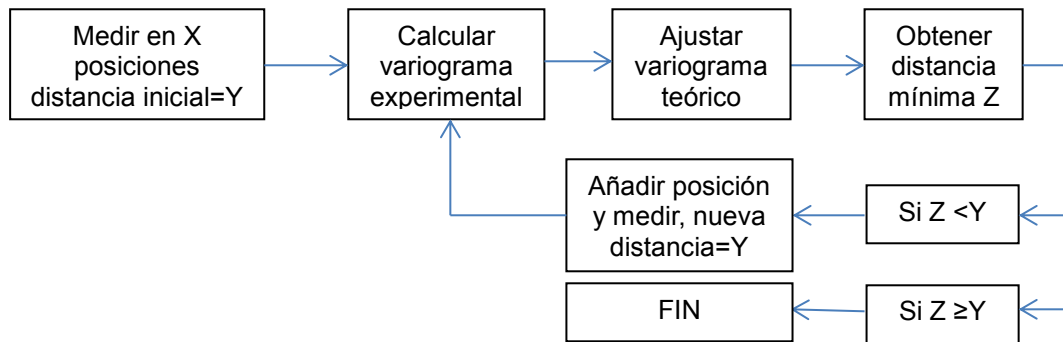


Figura 4. Esquema del procedimiento propuesto

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestran los resultados para el caso base, calculado con todas las medidas realizadas (39 posiciones) y con dos selecciones diferentes del número de puntos que recomienda la norma ISO3382 para esta sala (7 posiciones). En las primeras filas de la tabla se muestra la distancia máxima estimada con el modelo con mejor ajuste. Cada fila representa el valor obtenido por una función teórica, en orden de mayor a menor ajuste. La parte inferior de la tabla representa el número de posiciones de medida calculadas con el tamaño de la sala, en horizontal y en vertical. Y la última fila muestra el número de posiciones total calculada a partir de los dos datos anteriores.

	Todas las medidas (39)			1a selección 7 puntos			2a selección 7 puntos		
	RT	C80	G	RT	C80	G	RT	C80	G
Distancia máxima calculada (m)	28.08 (lineal)	6.19 (lineal)	9.46 (lineal)	459 (lineal)	3.48 (circular)	10.66 (circular)	196.01 (circular)	1.53 (circular)	8.86 (gaussiano)
		7.5 (esférico)	9.4 (circular)		3.09 (esférico)	10.22 (gaussiano)	198.83 (esférico)	1.36 (esférico)	8.86 (lineal)
Horizontal	0,78	3,52	2,30	0,05	6,26	2,05	0,11	14,25	2,46
Vertical	0,66	2,97	1,95	0,04	5,29	1,73	0,09	12,03	2,08
# posiciones Total	1	12	4	1	30	4	1	168	4

Tabla 3. Resultados ajuste variograma teórico a valores experimentales. Caso base (39 puntos) y selección inicial

En la Tabla 3 puede verse que, con todas las medidas, para el parámetro RT solo sería necesario medir una posición. Esto indica y confirma la poca variabilidad que presenta este parámetro. Para C80, en cambio, se necesitarían 12 puntos para que la variabilidad de la sala estuviese recogida. Y para G, serían necesarios 4 puntos de medida. Con esto, también confirmamos la alta variabilidad que presenta C80 en esta sala (ver Figura 5). A partir de este resultado también vemos que el número de posiciones necesarias calculado (12 el mayor resultado) son menores que el número de posiciones medidas (39). Esto indica que se han medido más posiciones de las indicadas por el método, ya que con 12 se recogería la variabilidad de la sala para estos parámetros. En las dos selecciones de 7 puntos de medida, se observa que el número de posiciones necesarias calculado es diferente en cada selección. En la experimentación se ha comprobado que la selección inicial influye en las iteraciones necesarias para converger.

En la Tabla 3 vemos que el número de posiciones calculado para RT y para G, converge ya en la primera iteración y además, se ha comprobado que no presentan apenas variabilidad en esta sala. Por ello, en este trabajo se ha seleccionado C80 como caso crítico para definir la convergencia del método y es por eso que aquí se representará solo la evolución de C80 en las

diferentes iteraciones.

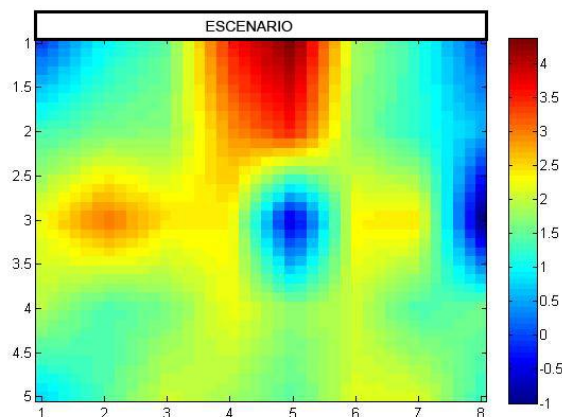


Figura 5. Variación del parámetro C80 en el auditorio de Ribarroja.

En la Figura 6 se muestra la evolución del proceso de estimación del número de posiciones (Figura 4) necesarias para C80 en el Auditorio de Ribarroja. El proceso se inicia con el número de posiciones recomendadas por la norma para esta sala (7), como puede verse en el eje horizontal. Cada una de las curvas representa la variación en el número de posiciones estimadas por los modelos de variogramas que mejor se ajustan a los valores experimentales. También se ha representado el caso base (*Baseline*) que se corresponde con el número estimado con todas las posiciones medidas (39), así como la línea de aceptación, que indica que si se han medido hasta el momento 15 posiciones, por ejemplo, y el número estimado obtenido es 15 o menor, entonces se llega a la convergencia y el procedimiento termina.

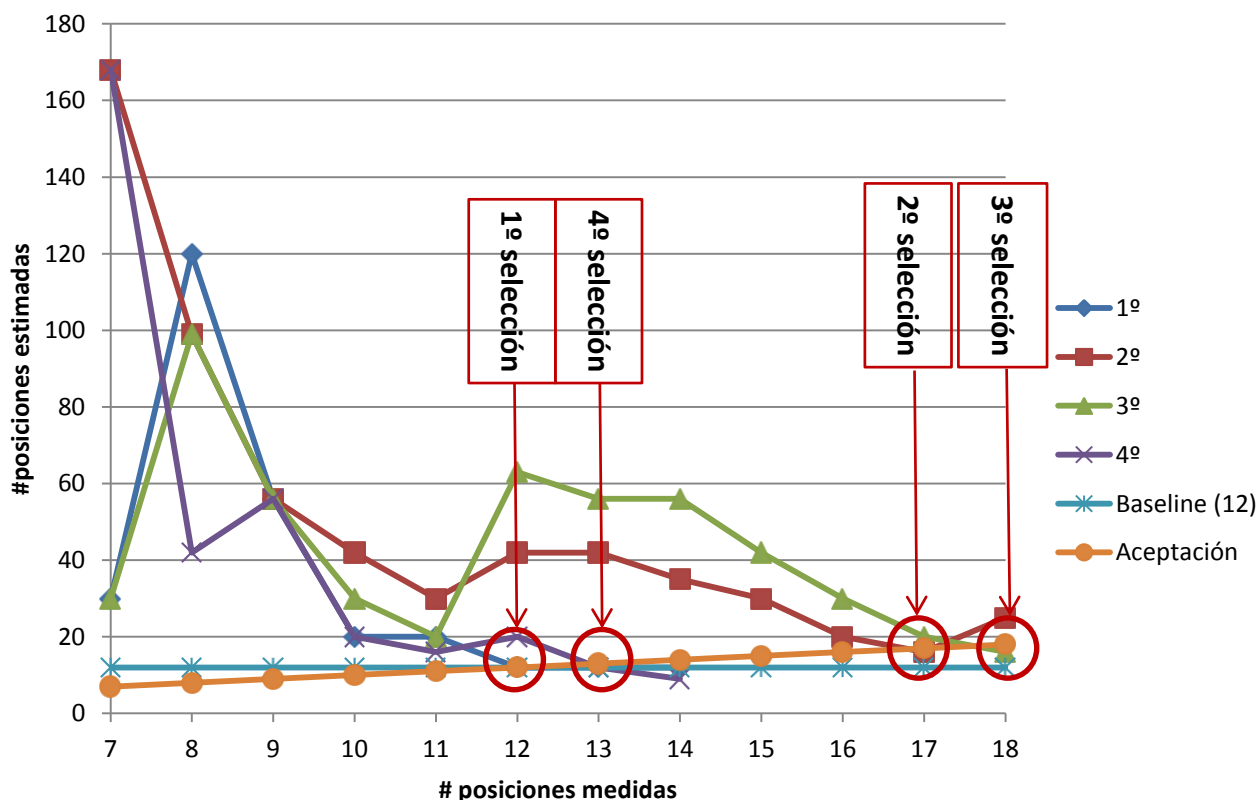


Figura 6. Evolución del número de medidas estimadas con los modelos de variogramas

En la Figura 6 puede observarse como, dependiendo de la selección de posiciones en cada iteración, el método puede converger con más o menos iteraciones. La 1º selección converge en la 5º iteración, la 2º selección en la 10º, la 3º selección en la 11º y la 4º selección en la 6º. A pesar de la diferencia en el número de iteraciones necesarias, en todos los casos el método converge mucho antes de llegar al número de posiciones medidas realmente en la sala (39 puntos).

Cabe destacar también la importancia de la selección inicial. Aunque en este caso se ha hecho de forma distribuida semi-aleatoria, habría que investigar un método automático que proporcionase buenos resultados en la predicción de posiciones con variogramas. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de selección de posiciones. En concreto, corresponde a las iteraciones de 7, 8, 9 y 10 puntos de la 1º selección.

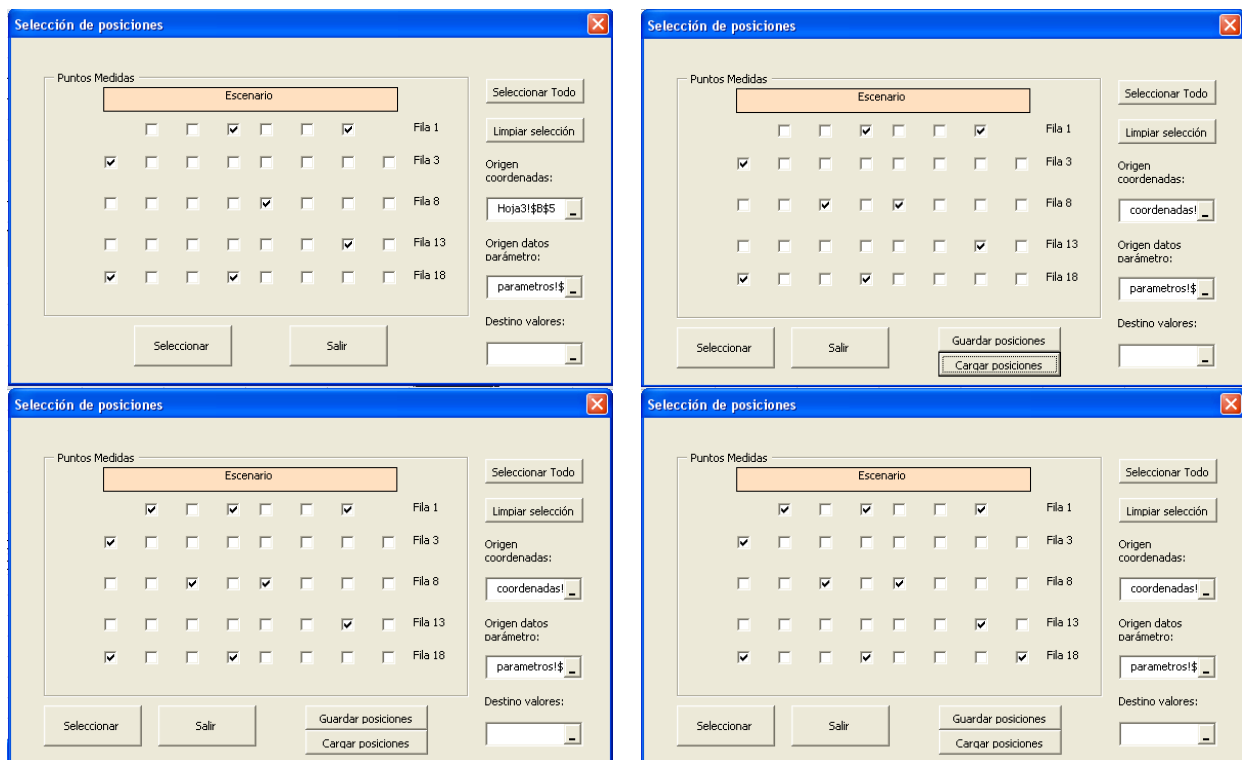


Figura 7. Diálogo de selección de posiciones. Caso 1º selección, 7, 8, 9 y 10 posiciones de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un método para estimar el número de posiciones de medida mínimo para garantizar una buena representatividad de la variación en los valores de los parámetros. En concreto se ha analizado el parámetro C80, ya que en esta sala presentaba mayor variación que RT y G. Para ello se propone el uso de variogramas ajustados a los datos experimentales que, de forma iterativa, estiman la distancia a la que deben estar dos puntos para que la diferencia del valor que toman las dos posiciones sea menor que 1 JND. Se ha observado que la selección inicial influye en la velocidad de convergencia del método y se propone una investigación para determinar de forma automática una selección inicial óptima. En las cuatro selecciones mostradas, el método converge mucho antes de llegar a necesitar todas las posiciones medidas. Estos resultados preliminares muestran la validez del método para estimar el número de posiciones necesarias en una sala. A partir de este trabajo es necesario realizar esta experimentación en otras salas así como incluir otros parámetros que presenten más variabilidad que C80 y por tanto puedan ser más críticos para determinar el número mínimo de posiciones.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto de investigación BIA2003-09306-C04-01, BIA2008-05485 y el proyecto BIA2012-36896.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Cressie, «Statistics for spatial data,» *Terra Nova*, vol. 4, nº 5, pp. 613-617, 1992.
- [2] G. Matheron, *Traité de Géostatistique appliquée*. Tome 1, Paris: Éditions Technip, 1962.
- [3] J. P. Chiles y P. Delfiner, *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*, vol. 497, Wiley series in probability and statistics, 1999.
- [4] O. Baume, B. Gauvreau, M. Berengier, F. Junker, H. Wackernagel y J. Chiles, «Geostatistical modeling of sound propagation: Principles and a field application experiment,» *Journal Acoustic Society of America*, 2894 (), vol. 126, nº 6, pp. 2894-2904, 2009.
- [5] L. Thiery, H. Wackernagel y C. Lajaunie, «Geostatistical analysis of time series of short LAeq values.,» de *INTERNOISE*, 1996.
- [6] J. Segura, S. Cerdá, A. Barba, R. Cibrián, R. Montell y A. Giménez, «Técnicas de interpolación espacial como herramienta para la determinación de la calidad del campo sonoro en salas,» de *TECNIACÚSTICA*, Évora, 2012.
- [7] J. Segura, S. Cerdá, R. Montell, A. Barba, R. Cibrián y A. Giménez, «Estudio de la distribución espacial de valores medidos C80 en auditorios,» de *International seminar on virtual acoustics*, Valencia, 2011.
- [8] ISO3382-2:2008, *Acústica: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: tiempo de reverberación en recintos ordinarios.*, Asociación Española de Normalización y Certificación (AECOR), 2008.
- [9] C. Christensen, G. Koutsouris y J. Rindel, «The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them?,» de *International Symposium on Room Acoustics (ISRA)*, Toronto, Canada, 2013.
- [10] R. San Martín y M. Arana, «Uncertainties caused by source directivity in room-acoustic investigations,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, nº 6, pp. 133-138, 2008.
- [11] I. Witew, P. Dietrich, D. de Vries y M. Vorländer, «Uncertainty of room acoustic measurements—How many measurement positions are necessary to describe the conditions in auditoria?,» de *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA)*, Melbourne, Australia, 2010.
- [12] T. Hidaka, «Supplemental data of dependence of objective room acoustical parameters on source and receiver positions at field measurement,» *Acoustical science and technology*, vol. 26, nº 2, pp. 128-135, 2005.
- [13] L. Morset., *WinMLS 2004 - User manual*, 2004.