

**Desarrollo de modelos predictivos para la
percepción de urgencia en señales de alarma en
cruces ferroviarios de Argentina.**

*Tesis final presentada para obtener el título de
Ingeniero de Sonido de la Universidad Nacional de Tres
de Febrero (UNTREF)*

TESISTA: Iván Kaspierowicz (DNI 40227081)

TUTOR/A: Phd. Shin-ichi Sato

Fecha de defensa: 2024 | Locación (Caseros), Argentina

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, doy gracias a la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), a su rector emérito, Lic. Aníbal Jozami, a su rector Martín Kaufmann y a todo su personal docente y no docente por promover un espacio para el desarrollo de profesionales, por la atención al estudiante y por disponer de los recursos que la institución posee.

Al coordinador, Mg. Ing. Alejandro Bidondo, por la dedicación y el compromiso de estar al frente de la única carrera en Argentina con las características que abarca la Ingeniería de Sonido.

Esta investigación no hubiera sido posible sin una formación académica de excelencia. Por este motivo, debo extender mi agradecimiento a todos los docentes de la carrera de Ingeniería de Sonido de la UNTREF por su compromiso con la educación pública y por estar siempre a disposición.

A mi tutor, Ph.D. Shin-ichi Sato, un especial agradecimiento por su dedicación, conocimiento y pasión por la investigación, que han contribuido enormemente a mi desarrollo como profesional y a esta tesis en particular.

A mi familia, por acompañarme incondicionalmente desde el primer momento en que decidí estudiar Ingeniería de Sonido. A mi pareja, por ayudarme en los momentos más difíciles. A mis amigos, colegas de carrera y compañeros de trabajo, por alentarme a seguir adelante en este maravilloso recorrido.

Por último, pero no menos importante, a todos aquellos que hoy no se encuentran físicamente para agradecerles. En especial, a mi compañero de infancia, Gastón Toranzo, víctima de un incidente en un cruce ferroviario en 2015.

DEDICATORIA

En memoria de Gastón Toranzo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FUNDAMENTACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. GENERAL	3
1.2.2. ESPECÍFICOS	3
1.3. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. INCIDENTES FERROVIARIOS EN ARGENTINA	5
2.2. PARÁMETROS ACÚSTICOS	9
2.3. APROXIMACIÓN DE MATRICES DE COMPARACIONES INCOMPLETAS PARA TESTS DE COMPARACIÓN POR PARES	12
2.3.1. VALORES DE ESCALA GLOBALES	13
2.3.2. VALORES DE ESCALA INDIVIDUALES	14
3. ESTADO DEL ARTE	16
4. MÉTODO EXPERIMENTAL	22
4.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	22
4.2. CREACIÓN DE ALARMAS SONORAS	25
4.3. DISEÑO PRUEBA SUBJETIVA	31
5. TEST DE VARIABLES FRECUENCIALES (A): RESULTADOS DE LA PRUEBA SUBJETIVA	34
5.1. ANÁLISIS DE LA MUESTRA	34
5.2. VALIDACIÓN	35
5.3. ANÁLISIS POR EDAD	36
5.4. PRUEBA DE NORMALIDAD	39
5.5. ANOVA	40
5.6. RESULTADOS GLOBALES Y MODELO DE PREDICCIÓN	42
6. TEST DE VARIABLES TEMPORALES (B): RESULTADOS DE LA PRUEBA SUBJETIVA	46
6.1. ANÁLISIS DE LA MUESTRA	46
6.2. VALIDACIÓN	47
6.3. ANÁLISIS POR EDAD	48

6.4. PRUEBA DE NORMALIDAD	51
6.5. ANOVA	53
6.6. RESULTADOS GLOBALES Y MODELO MATEMÁTICO	54
7. DISCUSIÓN	59
7.1. TEST DE VARIABLES FRECUENCIALES (A)	59
7.2. TEST DE VARIABLES TEMPORALES (B).....	60
7.3. POR EDAD.....	61
7.4. ANÁLISIS DE ALARMAS RECOMENDADAS PARA ARGENTINA.....	62
8. CONCLUSIONES.....	64
9. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	66
BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Población, accidentes en pasos a nivel y razón de accidentes por millón de habitantes de países seleccionados [2,3,4,5,6].	2
Figura 2.	Lesiones a personas según gravedad por mes para el año 2022 [1].	6
Figura 3.	Distribución de sucesos por tipo de servicio ferroviario [1]. CHO: Choque, COL-P: Colisión con peatón, COL-V: Colisión con vehículo, DESC: Descarrilamiento.	7
Figura 4.	Distribución de sucesos por línea de servicio de pasajeros [1]. CHO: Choque, COL-P: Colisión con peatón, COL-V: Colisión con vehículo, DESC: Descarrilamiento.	8
Figura 5.	Distribución de sucesos por región geográfica de Argentina [1]. CHO: Choque, COL-P: Colisión con peatón, COL-V: Colisión con vehículo, DESC: Descarrilamiento.	9
Figura 6.	Representación frecuencial a través de la DFT(d) de un pulso rectangular (c) con frecuencia de muestreo de 8 Hz [9].	10
Figura 7.	Definición de tiempo de subida (rise time) [13].	11
Figura 8.	Molestia/Urgencia percibida versus la idoneidad percibida para un escenario de maniobra evasiva [22].	17
Figura 9.	Definición de intervalo inter-onset (IOI), duración (DR) y tiempo de superposición (KDT) [29].	18
Figura 10.	Respuesta en frecuencia con filtro de media móvil ($N=5$) para las alarmas de Argentina (negro), Gran Bretaña (rojo), Francia (verde) y Corea del Sur (azul).	25
Figura 11.	Comparación de respuesta en frecuencia. Alarma Argentina versus alarma sintetizada.	26
Figura 12.	Comparación temporal (a) y frecuencial (b) de la alarma sintonizada en 1046,5 Hz (C6) a 140 BPM con tres valores de atenuación de armónicos: $c = 1/15$ (negro), $c = 1/5$ (rojo), $c = 1/2$ (azul).	28
Figura 13.	Comparación del tiempo de ataque de 5 ms, 50 ms, 120 ms para la alarma sintonizada en $F1$ y 140 BPM.	28
Figura 14.	Respuesta en frecuencia de la señal sintonizada con entonación = 0% para tres valores de atenuación de armónicos: $1/15$ (línea solida negra); $1/5$ (línea entrecortada roja) y $1/2$ (línea punteada azul).	29

Figura 15.	Respuesta en frecuencia para tres alarmas con entonación +30% (línea entrecortada roja), +50% (línea punteada azul), +0% (línea sólida negra).	29
Figura 16.	Comparación entre alarma original (línea entrecortada roja) versus la alarma modificada (línea sólida negra).	30
Figura 17.	Distribución temporal del test subjetivo.	31
Figura 18.	Matriz incompleta del test de comparación por pares de variables frecuenciales.	32
Figura 19.	Posibilidades en una matriz de comparación por pares y casos de errores circulares (rojo).	33
Figura 20.	Tipos de auriculares utilizados para el test A.	34
Figura 21.	Líneas de trenes más usuales para los participantes del Test A.	35
Figura 22.	Error circular por participante (arriba) y cantidad de errores circulares por triada (debajo).	36
Figura 23.	Gráfico de tipo proyección solar segmentado por generaciones y agrupado por color según el grupo de edad.	37
Figura 24.	Puntajes según ranking de urgencia percibida por señal para dos grupos de edad.	37
Figura 25.	Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales y segmentado en ≤ 42 años (Azul) y ≥ 43 años (Verde).	38
Figura 26.	Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales.	40
Figura 27.	Valores globales de escala segmentados por señal y agrupados por valor de pitch (color) y valor de atenuación de armónicos (relleno).	42
Figura 28.	Valores de escala versus atenuación de armónicos agrupados por valor de F con regresiones lineales.	43
Figura 29.	Valores de escala versus entonación agrupados por valor de c con regresiones lineales.	44
Figura 30.	Valores de escala versus atenuación de armónicos agrupados por F para los resultados observados (figuras sólidas) y los valores predichos (cruces).	45
Figura 31.	Valores de escala globales observados (negro) y ecuación del modelo de predicción de la urgencia (plano).	45
Figura 32.	Tipos de auriculares utilizados para el test B.	46
Figura 33.	Líneas de trenes más usuales para los participantes del Test B.	47

Figura 34. Error circular por participante (arriba) y cantidad de errores circulares por triada (abajo).	48
Figura 35. Gráfico de tipo proyección solar segmentado por generaciones y agrupado por color según el grupo de edad.....	49
Figura 36. Puntajes según ranking de urgencia percibida por señal para dos grupos de edad.	50
Figura 37. Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales y segmentado en ≤ 43 años (azul) y ≥ 43 años (verde).	51
Figura 38. Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales.	52
Figura 39. Valores globales de escala segmentados por señal y agrupados por valor de velocidad (color) y valor de tiempo de ataque (relleno).	55
Figura 40. Valores de escala versus tiempo de ataque agrupados por valor de V con regresiones lineales.	56
Figura 41. Valores de escala versus velocidad agrupados por valor de TA con regresiones lineales.	56
Figura 42. Valores de escala versus tiempo de ataque agrupados por V para los resultados observados (figuras sólidas) y los valores predichos (cruces).	57
Figura 43. Valores de escala globales observados (negro) y ecuación del modelo de predicción de la urgencia (plano).	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de los países seleccionados: Accidentes en pasos a nivel por año; Población y valor de la razón de accidentes por millón de habitantes.	23
Tabla 2. Características sonoras de las alarmas de referencia.	24
Tabla 3. Variables objetivas de las alarmas a utilizar en las pruebas subjetivas.	26
Tabla 4. Señales utilizadas para los test subjetivos.	27
Tabla 5. Parámetros estadísticos descriptivos de los resultados individuales del test A.	39
Tabla 6. ANOVA dos vías con varias muestras por grupo para el Test A.	41
Tabla 7. Test A. Prueba Post-Hoc con parámetro Games-Howell para las señales con mayor diferencia de medias. Se resaltan las diferencias significativas menores a 0.05 (negrita).	41

Tabla 8.	Medias de los valores de escala agrupadas por F y por c de los resultados globales del test A.....	43
Tabla 9.	Parámetros estadísticos descriptivos de los resultados individuales del test A.	52
Tabla 10.	ANOVA dos vías con una muestra por grupo para el Test B.	53
Tabla 11.	Test B. Prueba Post-Hoc con parámetro Games-Howell para las señales con mayor diferencia de medias. Se resaltan las diferencias significativas menores a 0.05 (negrita).	54
Tabla 12.	Medias agrupadas por V y por TA de los resultados globales del test A.	55
Tabla 13.	Parámetros de las alarmas propuestas por normativa para generar la máxima y mínima urgencia percibida.	62
Tabla 14.	Valores de escala de las alarmas propuestas por normativa para generar la máxima y mínima urgencia percibida.....	62

ÍNDICE DE ANEXO

ANEXO I. RESULTADOS PRELIMINARES.....	71
a. TEST SUBJETIVO DE VARIABLES FRECUENCIALES (A).....	72
b. TEST SUBJETIVO DE VARIABLES TEMPORALES (B)	74

ÍNDICE DE FIGURAS ANEXO

Figura A1. Errores circulares (d) por tríada y participantes de los resultados preliminares del test A.	72
Figura A2. Valores globales de escala preliminares, segmentados por señal y agrupados por valor de pitch (color) y valor de atenuación de armónicos (relleno).	73
Figura A3. Errores circulares (d) por tríada y participantes de los resultados preliminares del test B.	74
Figura A4. Valores globales de escala preliminares, segmentados por señal y agrupados por valor de pitch (color) y valor de atenuación de armónicos (relleno).	75

RESUMEN

En Argentina, la tasa de accidentes por millón de personas en cruces ferroviarios es de 7,01, contrastando con países como Inglaterra, Japón o Corea del Sur, donde esta tasa tiende a 0. El objetivo de la presente investigación es proponer y verificar un modelo predictivo destinado a evaluar la percepción de urgencia a partir de las características acústicas de las señales de alarma utilizadas en pasos a nivel ferroviarios. Con el propósito a futuro de obtener una alarma efectiva, medida en términos de su capacidad para generar una percepción de urgencia, se ofrece un diseño con valores específicos como parte de una solución a corto plazo.

Se efectúan dos pruebas subjetivas, donde se generan nueve señales sintéticas para cada una, a partir de la alarma empleada en Argentina. Para el Test A, como variables objetivas se utilizan el tono (F) y atenuación de armónicos (c) y para el Test B, como variables objetivas se utilizan la velocidad (V) y tiempo de ataque (TA). La variable subjetiva evaluada en ambas pruebas es la percepción de urgencia. Se ha constatado que todas las variables utilizadas influyen significativamente en los resultados de la sensación de urgencia, confirmado por el nivel de significancia estadística ($p < 0,01$).

Las recomendaciones actuales para las alarmas en cruces ferroviarios en Argentina muestran una variabilidad en la escala de urgencia, que puede alcanzar diferencias significativas en la escala de valor.

Palabras Clave: Urgencia, alarmas, modelo de predicción.

ABSTRACT

In Argentina, the accident rate per million people at railway crossings is 7.01, contrasting with countries such as England, Japan, or South Korea, where this rate tends to be 0. The main objective of this research is to develop a predictive model aimed for the evaluation of the perception of urgency based on the acoustic characteristics of the alarm signals used at railway level crossings. With the future purpose of obtaining an effective alarm, measured in terms of its ability to generate a perception of urgency, an alarm with specific values is given as part of a short-term solution.

For each of the two subjective tests, nine synthetic signals are generated from the alarm used in Argentina. For Test A, the tone (F) and harmonic attenuation (c) are used as objective variables, and for Test B, velocity (V) and attack time (TA) are used as objective variables. The subjective variable evaluated in both tests is the perception of urgency. It has been found that all the variables used significantly influence on the results of the perception of urgency, confirmed by a level of statistical significance ($p < 0.01$).

Current recommendations for alarms at railway crossings in Argentina show variability in the urgency scale, which can reach differences of up to 1.167 on the value scale.

Keywords: Urgency, alarms, predictive model.

1. INTRODUCCIÓN

Las alarmas desempeñan un papel crucial al emitir señales que alertan sobre situaciones que demandan atención especial. Estos dispositivos se encuentran presentes en todos lados, desde alarmas contra incendios hasta aquellas empleadas en vehículos, instituciones educativas y sistemas de transporte público.

Varios investigadores han estudiado las cualidades sonoras (tanto temporales como frecuenciales) de las alertas y como estas repercuten en la urgencia que se percibe, como se detalla en la sección del estado del arte. Sin embargo, no se han realizado investigaciones centradas en cruces ferroviarios. Es por esto que la presente investigación tiene como meta principal la creación de un modelo predictivo que estime la urgencia percibida específicamente para este tipo de alertas.

1.1. FUNDAMENTACIÓN

Según el anuario estadístico publicado por la Junta de Seguridad en el Transporte (JST), durante el 2022 se registraron un total de 357 colisiones con peatones y 209 colisiones con vehículos en pasos a nivel del sistema ferroviario, sin incluir vehículos de carga [1]. Estas cifras reflejan la magnitud de los incidentes relacionados con la interacción entre peatones, vehículos y las señales de advertencia en un contexto urbano específico como Buenos Aires.

Por otro lado, durante el período de 2020-2021, Inglaterra reportó solamente 5 incidentes fatales y 2 colisiones con vehículos. En el caso de Japón, la ausencia de accidentes se extiende a varios años atrás. Estos datos contrastan notablemente con la situación observada en Argentina, como se ilustra en la Figura 1, al analizar la cantidad de accidentes en pasos a nivel por cada millón de habitantes. En otros países, este índice se sitúa por debajo de 1, mientras que en Argentina esta tasa se incrementa significativamente, alcanzando un valor de 7.

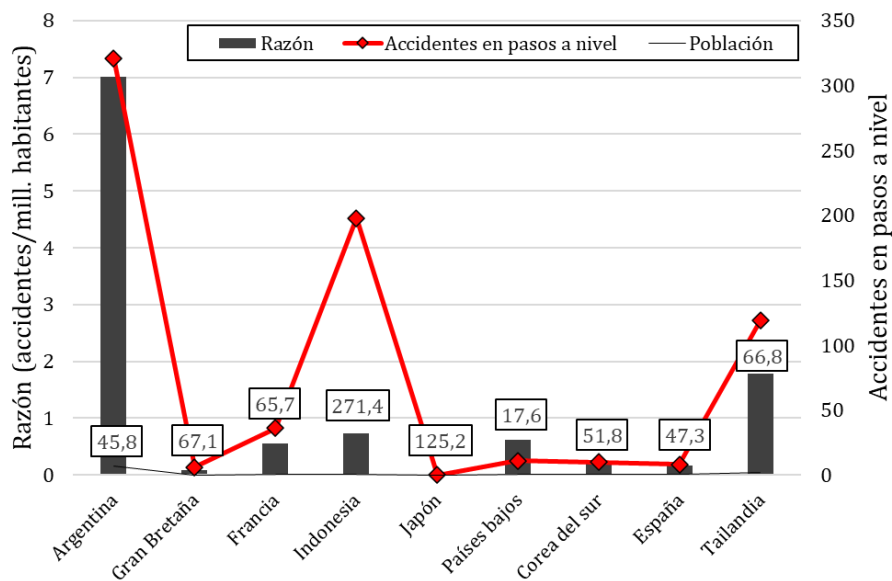


Figura 1. Población, accidentes en pasos a nivel y razón de accidentes por millón de habitantes de países seleccionados [2,3,4,5,6].

Alrededor del mundo hay una amplia variedad de sonidos de alarmas de cruces ferroviarios. Tanto Inglaterra como Japón utilizan sonidos generados electrónicamente (Buzzers). En contraste, Argentina utiliza alarmas mecánicas, como campanas, similares a las que se utilizan en Estados Unidos o Australia. La Comisión Nacional de Regulación del Transporte en Argentina ha establecido directrices específicas: *“El equipamiento emisor acústico (campana de alarma mecánica o electrónica) deberá poder emitir entre 60 y 240 golpes por minuto, y deberá poseer la capacidad de ajustar el nivel sonoro entre 60 y 95 dB(A), medidos a 1 metro de distancia”* y luego destacan que el tono de la señal sonora se ajustará a alguna de las frecuencias de la quinta octava, según norma IRAM 4036, Tabla II (preferentemente la frecuencia correspondiente a la nota sol) [7]. Es importante señalar que estas alertas acústicas presentan diferencias en sus características tanto frecuenciales como temporales, lo que distingue los sonidos utilizados en distintos sistemas ferroviarios a nivel internacional.

En la investigación previa, se analizaron los parámetros de las alarmas utilizadas en países con bajos índices de accidentes, extrayendo sus características acústicas para evaluar si la percepción de urgencia mejoraba, confirmando que se mantenían las conclusiones derivadas de investigaciones similares aplicadas a alarmas en general.

A partir del modelo predictivo, se busca sugerir una alarma que genere una percepción de urgencia acorde a la situación y así poder sentar las bases para la concepción

de un prototipo a implementar en los cruces ferroviarios peatonales del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA).

No se limita únicamente a la generación de un modelo predictivo y al análisis de variables para obtener conclusiones. El núcleo de esta investigación radica en la identificación de problemáticas, la presentación de soluciones que hagan uso de la acústica como herramienta primordial y, mediante ello, la mejora en la calidad de vida de las personas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GENERAL

La investigación tiene como objetivo principal proponer y verificar un modelo de predicción de urgencia de las alarmas de pasos peatonales a nivel ferroviarios y así establecer una línea de trabajo para diseñar una solución a corto plazo en los cruces peatonales.

1.2.2. ESPECÍFICOS

Para llevar a cabo ambos objetivos es necesario establecer los siguientes pasos:

- Determinar las variables objetivas a utilizar a partir de la revisión de las conclusiones de la bibliografía.
- Registrar o simular el paisaje sonoro propio de un cruce peatonal ferroviario del AMBA.
- Generar las alarmas sintetizadas a utilizar para cada prueba, considerando las conclusiones de la investigación preliminar.
- Diseñar las pruebas subjetivas para evaluar la percepción de urgencia.
- Llevar a cabo los test en forma virtual.
- Evaluar los resultados usando las herramientas estadísticas.
- Generar el modelo de predicción de urgencia.
- Definir la alarma de sugerencia a partir de los resultados obtenidos.
- Establecer la línea de trabajo para posibles prototipos a implementar en pasos peatonales a nivel.

1.3. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

El capítulo 1 expone los objetivos que se pretenden alcanzar, seguido del marco teórico (capítulo 2) y el estado del arte (capítulo 3) que sirven de soporte a la presente investigación.

En el capítulo 4, se desarrolla el diseño de la investigación, incluyendo el proceso para obtener los parámetros objetivos que caracterizan el fenómeno bajo análisis, y el diseño de las pruebas subjetivas.

El capítulo 5 se dedica a la validación de los resultados obtenidos en las pruebas, analizándolos con herramientas estadísticas. Posteriormente, en los capítulos 6 y 7, se presentan los resultados correspondientes a cada prueba subjetiva.

En los capítulos 8 y 9 se ofrecen las conclusiones acompañadas de las limitaciones inherentes al estudio, así como propuestas de directrices para futuras investigaciones. Esta estructura permite un abordaje integral del proceso investigativo, desde su fundamentación teórica hasta la presentación de resultados y conclusiones, así como pautas para posibles trabajos posteriores.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. INCIDENTES FERROVIARIOS EN ARGENTINA

Como se menciona en la sección de fundamentación, la Junta de Seguridad en el Transporte (JST) comunicó en su anuario estadístico del año 2022, un total de 357 colisiones con peatones y 209 colisiones con vehículos sin contemplar vehículos de carga. La JST es un organismo descentralizado que se desprende del Ministerio de Transporte de la Nación, que tiene como objetivo primordial, desde el año 2020, contribuir a la seguridad en el ámbito del transporte. Su labor se enfoca en la investigación de accidentes e incidentes de transporte. Asimismo, desempeña un rol fundamental a través de controles, emisión de recomendaciones y la implementación de acciones efectivas destinadas a mejorar la seguridad en el transporte, cumpliendo así una función crucial en el resguardo y mejora de la seguridad en este ámbito [1].

En el año 2022, de acuerdo a la gravedad de las lesiones a personas, se registraron 115 personas fallecidas, 257 personas con lesiones graves y 304 personas con lesiones leves. El gráfico de barras presentado en la Figura 2 desglosa las lesiones sufridas por individuos según el mes, diferenciando el tipo de lesión. De acuerdo con este gráfico, el 45% de los afectados sufrió heridas leves, el 38% experimentó lesiones graves y el 17% lamentablemente fallecieron.

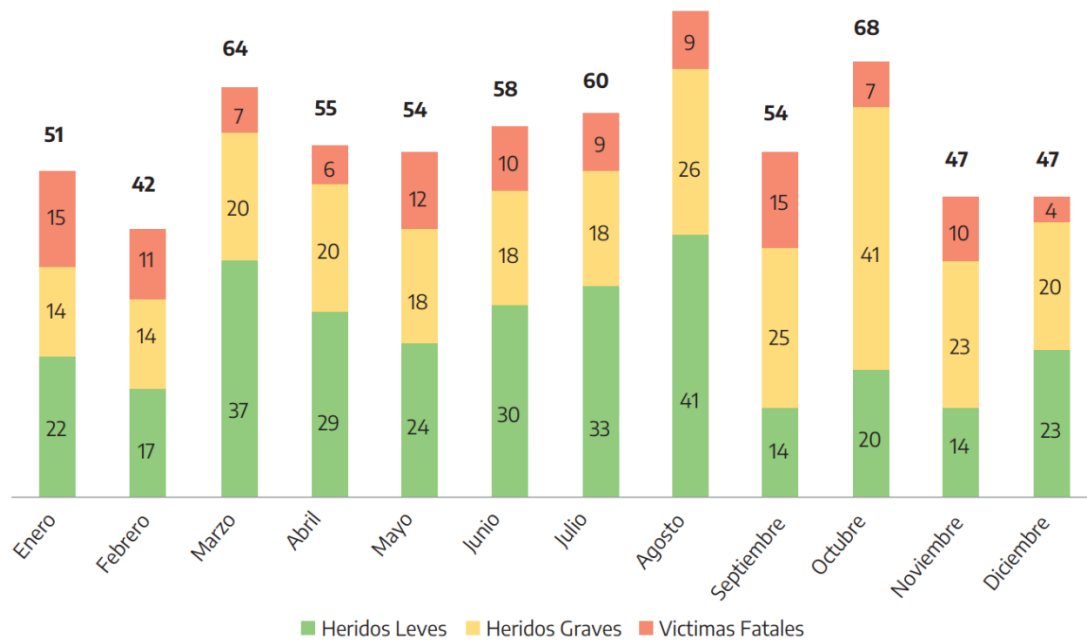


Figura 2. Lesiones a personas según gravedad por mes para el año 2022 [1].

El gráfico anular representado en la Figura 3 ilustra la distribución de incidentes según el tipo de servicio ferroviario, mostrando el servicio de pasajeros en el anillo exterior y el servicio de carga/transporte en el anillo interior. Se evidencia que las colisiones con personas y vehículos son considerablemente más frecuentes en el servicio de pasajeros. En contraste, para el servicio de carga, los incidentes más comunes son los descarrilamientos y las colisiones con vehículos.

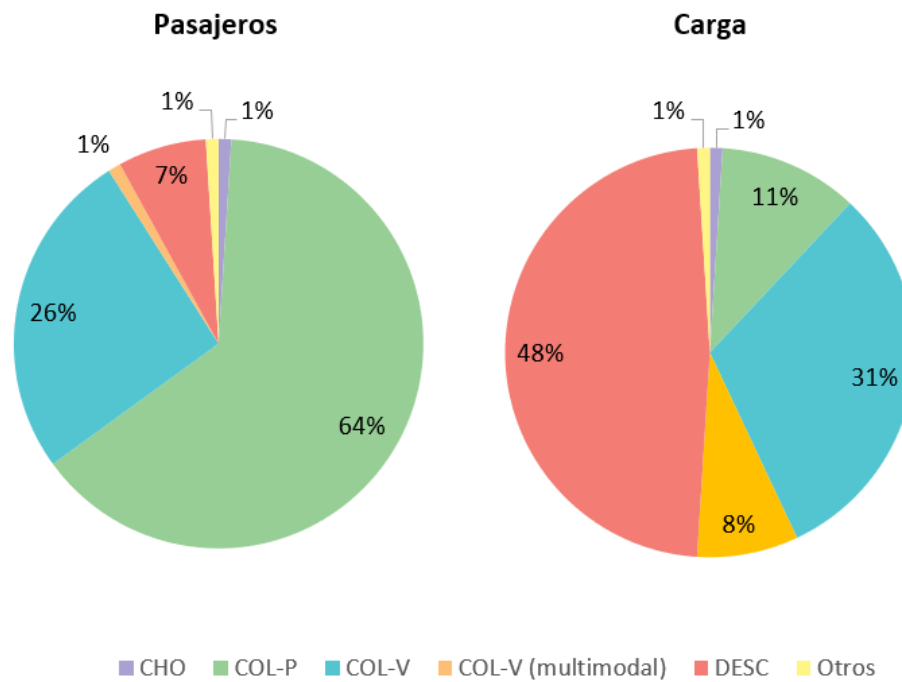


Figura 3. Distribución de sucesos por tipo de servicio ferroviario [1]. CHO: Choque, COL-P: Colisión con peatón, COL-V: Colisión con vehículo, DESC: Descarrilamiento.

Según lo evidenciado en la Figura 4, al analizar el tipo de suceso por línea de pasajeros (excluyendo las líneas regionales), se observa que el ferrocarril Urquiza exhibe la menor cantidad de incidentes registrados. Por otro lado, las líneas Roca y Sarmiento son las que concentran la mayor cantidad de incidentes.

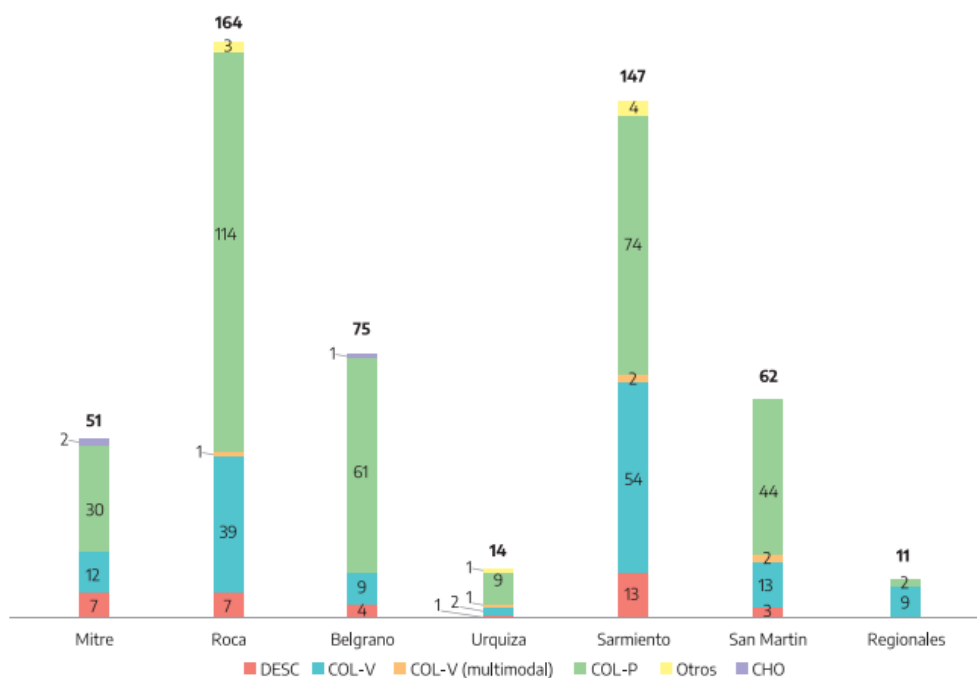


Figura 4. Distribución de sucesos por línea de servicio de pasajeros [1]. CHO: Choque, COL-P: Colisión con peatón, COL-V: Colisión con vehículo, DESC: Descarrilamiento.

Al contemplar los datos de la cantidad de sucesos segmentados por región, se puede discernir la zona geográfica en donde se concentran los casos de interés. La Figura 5 revela que el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) acapara casi la totalidad de los incidentes reportados por la Junta de Seguridad en el Transporte. Sin embargo, resulta crucial tener en cuenta que el sistema ferroviario argentino presenta un desarrollo concentrado en esta zona. No obstante, se espera que con el tiempo se recupere y se expanda fuera del AMBA [1].



Figura 5. Cantidad de sucesos por región geográfica de Argentina [1].

2.2. PARÁMETROS ACÚSTICOS

Una herramienta fundamental para realizar el análisis frecuencial de las señales es la transformada discreta de Fourier (DFT). La misma convierte una secuencia finita de muestras equiespaciadas (variable temporal) en una secuencia equiespaciada del mismo largo en el espacio frecuencial, a través de la siguiente ecuación (1):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad (1)$$

Siendo $x[n]$ el vector de entrada en el dominio temporal, $X[k]$ el vector de salida que se encuentra en el dominio frecuencial y W_N^{kn} son las funciones definidas en la ecuación (2).

$$W_N^{kn} = e^{-j(2\pi/N)kn} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

La cantidad de muestras de $x[n]$ se denota como N . Comúnmente, se opta por valores de N que son potencias de dos, que facilita la explotación de simetrías en las funciones base, elemento clave del algoritmo desarrollado por Cooley-Tukey para la implementación computacional de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

En los siguientes gráficos, se muestran dos ejemplos de implementación de la transformada de Fourier. En la Figura 6, se presenta la representación frecuencial de un tren de pulsos rectangulares con duty cycle del 50% y una frecuencia de muestreo de 8 Hz.

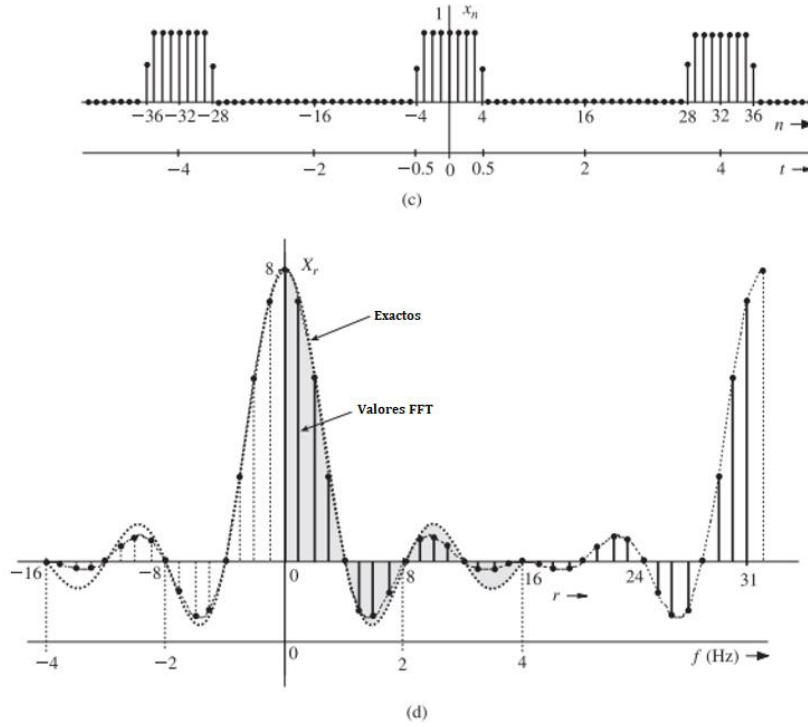


Figura 6. Representación frecuencial a través de la DFT(d) de un pulso rectangular (c) con frecuencia de muestreo de 8 Hz [9].

Para el análisis de las señales, se utilizan los momentos espectrales asociados con la respuesta en frecuencia [10]. Estas variables son las que se emplean para caracterizar de forma frecuencial a las alarmas analizadas. El primero, centroide espectral (spectral centroid) se expresa debajo en la ecuación (3).

$$SpectralCentroid = \mu_1 = \frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} f_k s_k}{\sum_{k=b_1}^{b_2} s_k} \quad (3)$$

El spectral centroid es calculado a partir de la suma ponderada en frecuencias respecto de la suma sin ponderar. En donde, f_k es la frecuencia en Hz correspondiente al bin (grupo) k , s_k el valor del espectro en el bin k (usualmente a partir de la magnitud del espectro y el espectro de potencia) y, por último, b_1 y b_2 los límites de las bandas en bins, donde se realiza el cálculo del spectral centroid.

Este parámetro que representa el “centro de gravedad” del espectro, también es comúnmente utilizado como indicador del “brillo” de las señales.

El ancho de banda (bandwidth) se obtiene a partir de la desviación estándar sobre el spectral centroid y describe que tan ancho o angosto es el espectro de la señal, indicando

o no, la dominancia de un tono en particular. El bandwidth se adquiere mediante la ecuación (4).

$$Bandwidth = \mu_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} S_k (f_k - \mu_1)^2}{\sum_{k=b_1}^{b_2} S_k}} \quad (4)$$

Para realizar el test de tonalidad se implementa el método detallado en la normativa ISO 1996-2:2017 a través de la herramienta AARAE (Audio and Acoustical Response Analysis Environment) desarrollada por Cabrera, Jiménez y Martens [11, 12]. Se decide utilizar el criterio de diferencia por nivel.

La señal tendrá componentes tonales si para una banda de tercios de octava, la diferencia de nivel con las bandas adyacentes supere cierto umbral establecido según la frecuencia. Este umbral se establece en 15 dB para las frecuencias graves (25 Hz a 125 Hz), 8 dB para las frecuencias medias (160 Hz a 400 Hz) y 5 dB en frecuencias agudas (500 Hz a 10 kHz) [11].

El tiempo de subida (rise time) se define como el lapso que requiere una señal para pasar desde un nivel bajo predefinido hasta un nivel alto también previamente establecido. En el área de la electrónica, suele emplearse un criterio en el cual el techo se sitúa en el 90% de la amplitud de la señal y el piso en un valor del 10%. La Figura 7 ilustra el tiempo de subida para la carga de un capacitor ideal, mostrando cómo varía la señal desde su nivel bajo hasta alcanzar el 90% de su amplitud máxima.

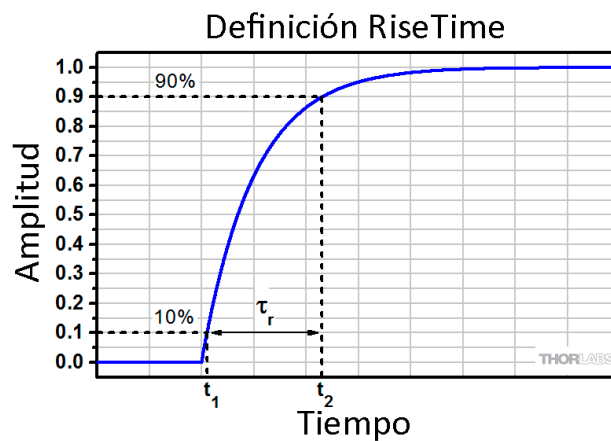


Figura 7. Definición de tiempo de subida (rise time) [13].

En la presente tesis, con el propósito de simplificar el análisis, se adopta una variación de la definición del tiempo de ataque. Se propone utilizar un intervalo de amplitud que

abarque desde el 0% hasta el 100% de la señal, en lugar del intervalo convencional de 10% a 90%. En esencia, esto implica medir el tiempo que demora la señal en pasar desde una amplitud de cero hasta alcanzar su amplitud máxima.

Por último, se define el parámetro de armonía siguiendo los lineamientos del estudio realizado por Hellier et al. [14], en donde la armonía representa al porcentaje de irregularidad en la serie de armónicos de la alarma generada. Por ejemplo, un valor de 0% indica que todos los armónicos de la señal son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Un valor del 30% indica que los armónicos pares se encuentran un 30% por encima del valor que tendría una señal con armonía 0%.

Estos conceptos se formalizan en las ecuaciones (5)-(7), donde: A representa la amplitud de la frecuencia fundamental, B la amplitud de los armónicos, f la frecuencia fundamental, t el vector temporal, n la cantidad total de armónicos, k el valor de armonía para los n armónicos y c la atenuación de los armónicos presentes en la señal.

$$x(t) = A \sin(2\pi f t) + c x_n(t) \quad (5)$$

$$x_n(t) = \sum_{n=1}^N B_n \sin(2\pi n f t m_n) \quad (6)$$

$$m_n = \frac{k}{2} (-1)^{1-n} + \frac{k}{2} + 1 \quad (7)$$

Por ejemplo, con un valor de armonía del 30%, $k = 0.3$ y $m_n = [1, 1.3, 1, 1.3, \dots]$.

2.3. APROXIMACIÓN DE MATRICES DE COMPARACIONES INCOMPLETAS PARA TESTS DE COMPARACIÓN POR PARES

En los test de comparación por pares, se contrastan todas las combinaciones posibles de los estímulos a evaluar. Por consiguiente, al aumentar el número de estímulos N , la cantidad de comparaciones que deben llevar a cabo los participantes en la prueba se calcula como $(N(N-1)/2)$. Por ejemplo, si hay nueve estímulos, se requerirían 36 comparaciones, lo que extiende la duración del test y puede generar fatiga y sesgo en la evaluación de los participantes.

Para mitigar este desafío, se utilizan matrices de comparación por pares incompletas, reduciendo así el número de comparaciones y la duración total del test. Sin embargo, esta estrategia implica aproximar los valores de escala para poder analizar posteriormente los resultados mediante herramientas estadísticas. Este enfoque permite mantener la

eficiencia del test al disminuir la carga cognitiva y la fatiga percibida por los participantes, a la vez que facilita un análisis estadístico adecuado de los datos obtenidos.

2.3.1. VALORES DE ESCALA GLOBALES

El método para la aproximación de los valores de escala globales se obtiene a partir del trabajo de Gulliksen [15]. El proceso comienza convirtiendo los valores de escala de los estímulos S_i a valores normalmente desviados, con la colocación de ceros en las posiciones donde no hay datos disponibles. Luego, se calculan los valores Z , los cuales son la suma de las filas de la matriz de comparaciones D . Posteriormente, se crea la matriz M , donde la diagonal principal contiene valores nulos, y los valores M_i son -1 si la matriz de comparaciones D_1 contiene información y cero si no la posee.

De manera simultánea, se generan las matrices N y L . La matriz L se deriva de la matriz M , con ceros en los valores que son nulos en M y un valor de +1 en caso contrario. La matriz N se obtiene mediante la inversión de la suma de las matrices M y L . Finalmente, se construye la matriz I , donde la diagonal principal contiene valores de 1 y el resto de las posiciones contienen valor 0.

A continuación, comienza el proceso de iteración del método de cuadrados mínimos, los pasos para obtener la aproximación son los siguientes:

1. Seleccionar los valores iniciales T_1 para iniciar el proceso de iteración. T_1 puede tener cualquier valor, con la secuencia 0,1,2,3,4 ... (n-1) se es suficiente para alcanzar rápidamente la convergencia del error.
2. Calcular MT_1
3. Ajustar el valor general de escala de T_1 a Z calculando

$$a^2 = Z'Z / (T_1' M' M T_1) \quad (8)$$

4. Establecer $T_1 = aT_1$ y luego, $MT_1 = aMT_1$
5. Calcular el error de aproximación ME

$$ME_1 = Z - MT_1 \quad (9)$$

6. Computar la corrección c

$$c_1 = N(I + LN)ME_1 = N(I + I - MN)ME_1 \quad (10)$$

7. Luego, se calcula el valor de prueba T_2 en donde b es una constante aditiva que ajusta el origen a un valor conveniente.

$$T_2 = T_1 + c_1 + b_1 \quad (11)$$

El proceso iterativo finaliza una vez que el error de aproximación ME_n sea menor a 0.05, obteniendo la aproximación a partir de los valores del vector de prueba T_n .

2.3.2. VALORES DE ESCALA INDIVIDUALES

El método para aproximar los valores de escala individuales se basa en la investigación de Kaiser y Serlin titulada "Contributions to the method of paired comparisons" [15]. Este proceso implica la creación de una matriz D_i a partir de la matriz de comparación incompleta de cada individuo. En D_i , se asigna un valor de -1 si no hay preferencia, 1 si hay preferencia y 0 si no se proporciona una respuesta. Esta disposición asegura que la suma de los componentes D_{ij} con D_{ji} sea igual a cero, manteniendo la consistencia en las comparaciones.

Luego, se genera la matriz K basándose en la matriz D_i . Los valores nulos en D_i se reemplazan con 1, y los valores unitarios se mantienen como 1. Además, en la diagonal de K se inserta la suma de las comparaciones incompletas para cada fila i .

El último paso implica el cálculo del vector d_{ij} , obtenido mediante la suma de los elementos de las columnas i -ésimas de D_i . Este vector representa las sumas de preferencias o elecciones individuales en relación con los elementos comparados en la matriz de comparación por pares incompleta A .

$$A = \begin{bmatrix} * & * & 0 & 1 \\ * & * & 1 & * \\ 1 & 0 & * & 1 \\ 0 & * & 0 & * \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$S_{ij} = K^{-1} \cdot D_{ij} = \begin{bmatrix} -0.5 \\ 1 \\ 1 \\ -1.5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

3. ESTADO DEL ARTE

Varios autores han explorado cómo el impacto de múltiples características del sonido de las alarmas, como la formante, la duración del pulso o el ciclo de trabajo (duty cycle), impactan sobre la percepción de la urgencia. Este análisis de la urgencia se ha llevado a cabo en diversos contextos, como hospitales y unidades de cuidados intensivos [17], instalaciones de energía nuclear [18, 19], así como en la industria de la aviación [20, 21].

Marshall Lee y Austria estudiaron la influencia de nueve parámetros de alarmas internas de vehículos para tres contextos distintos de manejo [22]. En automóviles ocurre un balance entre la urgencia percibida de la alarma y su molestia subjetiva, ya que, si la alarma resulta demasiado molesta, el conductor puede decidir desactivar la alarma o directamente ignorarla.

Para ello separaron el estudio en tres experimentos, en los cuales se presentan tres escenarios: correo, navegación y evitar colisión. El contexto de correo es el menos urgente y el conductor puede ignorar la alarma sin consecuencias; el segundo escenario es urgencia media e ignorar la alarma puede traer consecuencias, pero sin peligro asociado; el último escenario es el que presenta la mayor urgencia.

En el primer experimento evaluaron los parámetros de serie de armónicos, duración de los pulsos e intervalo entre pulsos. Los resultados arrojaron que a mayor duración de pulso (0,1 s) menor es la urgencia percibida, mientras que intervalos más cortos entre pulsos (25 ms) generaba una mayor urgencia. Las alarmas basadas en la formante high /a/ (300, 2550, 3450 y 4050 Hz) resultaron en una mayor urgencia y molestia que la formante high /i/ (600, 1350, 2550 y 3300 Hz).

En el segundo experimento se buscó caracterizar los efectos de las ráfagas de pulsos. Para ello se evaluaron los parámetros de tiempo de ataque, tiempo de offset y el ciclo de trabajo de la ráfaga. Los resultados indicaron que el tiempo de ataque más rápido (tiempo de ataque de 0,025 s) se asoció a una mayor urgencia y molestia percibidas, así como un tiempo de offset más rápido (tiempo instantáneo) también generó una mayor urgencia y molestia percibida. Además, se observó que un ciclo de trabajo de ráfagas mayor conllevaba a una mayor urgencia, aunque no se relacionó con más molestia percibida. Previamente, Nixon et al. comprobaron que la urgencia percibida se modifica con dichos parámetros debido a la sensación de acercamiento u alejamiento de un objeto [23].

En el tercer y último experimento se logró entender cómo el ciclo de trabajo de la alarma, el tiempo entre ráfagas y el tipo de sonido afectan en la percepción de la urgencia y la molestia. Los resultados mostraron que a mayor ciclo de trabajo mayor urgencia y molestia percibida, períodos entre ráfagas más cortos implican una mayor urgencia y molestias; por su parte, los sonidos compuestos de formante high /i/ fueron catalogados como más molestos, pero menos urgentes que las alarmas de series de frecuencia recomendadas por Tan & Lenner.

Por otro lado, se estudia la relación entre el principio de mapeo de urgencia, que determina que las alertas en un cierto espacio, deben corresponderse con la urgencia que requiera la situación [24,25].

Para un contexto de conducción en una situación de evasión de colisión, hallaron una relación lineal entre las variables subjetivas de urgencia percibida y de idoneidad (que tan apropiadas se perciben las alarmas para cierto escenario). Obtuvieron un valor de $R^2 = 0.89$, consistente con el hecho de que las alertas percibidas con mayor urgencia son clasificadas como de mayor idoneidad tal como se muestra en la Figura 8.

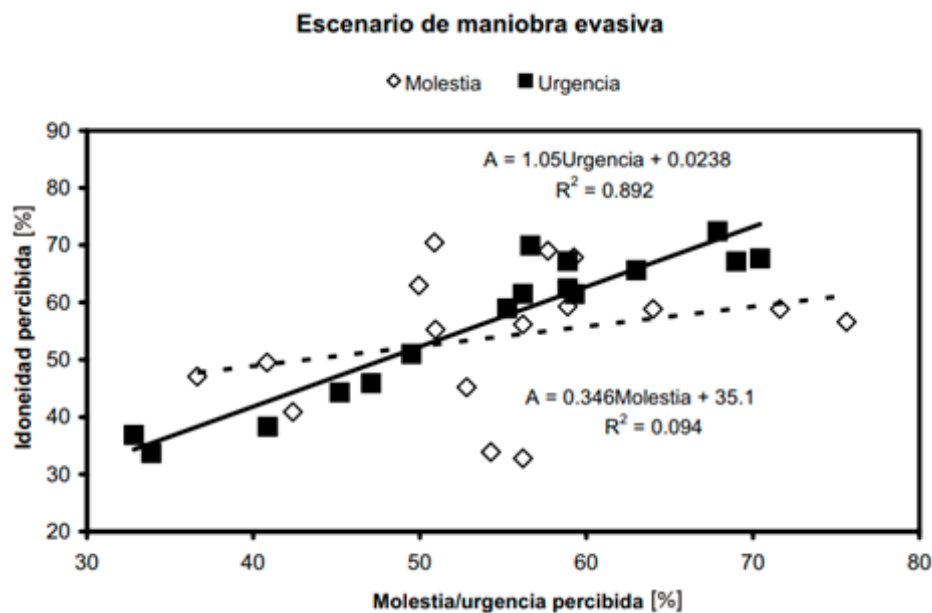


Figura 8. Molestia/Urgencia percibida versus la idoneidad percibida para un escenario de maniobra evasiva [22].

El estudio de Haas et al. [26] se centró en examinar el impacto del tiempo de reacción en relación con la percepción de urgencia. Para ello, utilizaron los intervalos de tiempo entre las alarmas (intervalos inter-onset), presentados en la Figura 9. Además de evaluar

los parámetros de nivel del pulso en la posición del participante del test (expresado en dBC), se analizaron tres diseños de alarma: pulsos de tonos puros (500, 1000, 2000 y 3000 Hz), pulsos secuenciales en los cuales se presentan secuencialmente los tonos puros, y una señal modulada por una forma de onda en diente de sierra.

Para añadir un contexto más realista, se incorporó ruido rosa como fondo acústico, equilibrando las señales para igualar su sonoridad. Este tipo de ruido se considera representativo del ruido constante producido por maquinaria industrial [27,28].

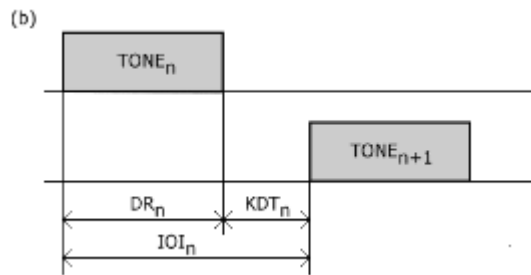


Figura 9. Definición de intervalo inter-onset (IOI), duración (DR) y tiempo de superposición (KDT) [29].

Los hallazgos concluyeron que la percepción de urgencia está influenciada por las características temporales, de nivel y espectrales de las señales evaluadas. Se determinó que cuando el nivel de los pulsos aumenta, la urgencia percibida también aumenta. Específicamente, la señal con un valor de 79 dBC fue identificada como la que genera la mayor urgencia percibida entre los tres tipos de señales. Este factor mostró ser el más significativo en el análisis ANOVA, lo que justifica más de la mitad (56%) de la variabilidad total.

En contraste con investigaciones previas que enfatizaban la importancia de las variables temporales en la percepción de urgencia [30], este estudio reveló que la influencia de estas variables fue relativamente débil, contribuyendo solo al 16% de la variabilidad total en el análisis ANOVA.

Se observó que la alarma con pulsos secuenciales fue significativamente menos urgente que alertas de tonos puros o señales moduladas en frecuencia con una onda de sierra. El tipo de señal tuvo una influencia considerable en la percepción de urgencia, explicando un 24% de la variabilidad total. Independientemente del tipo de señal, los resultados indicaron que a mayor nivel y menor intervalo inter-onset (IOI), mayor fue la urgencia percibida. En cuanto al tiempo de reacción, se comprobó una correlación entre la

urgencia percibida y el tiempo de reacción: a mayor urgencia percibida más rápida es la reacción de los participantes. Aunque la diferencia media en los tiempos de reacción fue de solo 60 ms (un intervalo breve), este tiempo puede ser crítico en situaciones de colisión inminente.

En una extensión del estudio previo, Suied et al. examinaron los efectos del intervalo inter-onset (IOI) sobre el tiempo de reacción y encontraron que este tiempo disminuye a medida que la separación entre pulsos se reduce. El efecto más notable se observó en el segundo experimento, donde se aplicó una ecualización de sonoridad para eliminar cualquier influencia del Loudness en la percepción de urgencia. Además, evidenciaron que el efecto del IOI en la percepción de urgencia es más pronunciado en situaciones que requieren una alta atención, destacando la importancia de estudiar los efectos de las alarmas en entornos simulados que reflejen escenarios reales, como la conducción [31].

Por otro lado, Rouch y Parizet exploraron la relación entre la percepción de urgencia y variables psicoacústicas como los parámetros de Sharpness y Roughness [32,33]. Descubrieron que el 71% de los participantes mostraron una correlación significativa y positiva entre el Sharpness y la percepción de urgencia. Sin embargo, señalaron que esta relación puede variar considerablemente entre individuos.

Edworthy et al., concluyeron que, tanto los parámetros acústicos como los parámetros melódicos/temporales determinan la percepción de la urgencia [25,14]. En el primer experimento de la primera serie, exploraron variables de pulso, incluyendo la frecuencia fundamental de la alarma, la armonía (definida en la sección de marco teórico) y la forma de envolvente de la señal, ya sea con un onset bajo o estándar. En el segundo experimento además de la frecuencia fundamental y la armonía, agregaron como variable a la aparición de armónicos con retraso temporal. Luego, para la segunda tanda de experimentos, se enfocaron en la modulación de las alarmas.

Los resultados obtenidos en los experimentos mostraron que todas las variables consideradas son factores de influencia sobre la percepción de la urgencia. Se observó que, a mayor frecuencia fundamental, mayor es la urgencia percibida. En cuanto al efecto de la amplitud de la envolvente, una envolvente estándar (con 20 ms de tiempo de ataque y de relajamiento) fue percibida de forma más urgente por los participantes que una señal con una envolvente lenta. Además, se encontró que a medida que las componentes armónicas

pares aumentan en frecuencia, alejándose de valores enteros, se incrementa la urgencia percibida del estímulo sonoro.

En la serie de experimentos número 2, se confirmó que las variables temporales tienen un impacto consistente y significativo en la urgencia percibida, particularmente la variable de velocidad de las alarmas. Las ráfagas con un ritmo regular resultan de mayor urgencia percibida que las sincopadas, sin embargo, esta afirmación requiere de mayor investigación. Los parámetros melódicos tienen menos influencia en la urgencia percibida que los parámetros temporales, siendo los rangos de pitch más largos percibidos como más urgentes que los rangos más cortos.

En la última tanda de experimentos (3), lograron demostrar que la urgencia de las alarmas es altamente manipulable y predecible con una alta tasa de concordancia entre los participantes de la prueba.

Años más tarde, utilizando la ley del cuadrado de Stevens, lograron predecir el ranking de urgencia con una significativa correlación entre los valores observados y los predichos [14].

En la primera serie de experimentos encontraron que incrementar la velocidad, frecuencia fundamental, número de repeticiones y la desarmonía produce una mayor urgencia percibida. Por ejemplo, para duplicar la sensación de urgencia percibida se puede:

- Multiplicar la velocidad de la alarma por 1,6
- Multiplicar la frecuencia fundamental por 6
- Multiplicar la unidad de repetición por 4
- Multiplicar el número de componentes des-armónicas por 307

Se concluyó que el parámetro más efectivo para comunicar un cambio en la urgencia es la velocidad.

Luego, en la segunda serie de experimentos, se logra obtener un modelo de regresión multivariable en donde la entonación/frecuencia fundamental resulta el parámetro sobresaliente por sobre la velocidad o las repeticiones.

En la segunda serie de experimentos, se desarrolló un modelo de regresión multivariable donde la entonación o frecuencia fundamental emergió como el factor más destacado por encima de la velocidad o las repeticiones. En ambos experimentos, se confirmó que la urgencia podía manipularse de manera aditiva, lo que implica que los

cambios en la velocidad, la entonación y el número de repeticiones pueden combinarse para diseñar alarmas que generen una mayor sensación de urgencia.

Judy Edworthy, junto con Ellen Haas, investigaron los efectos de la sonoridad en la percepción de urgencia y el tiempo de reacción [34]. Los participantes calificaron las señales con 40 dB sobre el nivel de ruido base como considerablemente más urgentes que aquellas a 25 dB y 5 dB, respectivamente. Los resultados indicaron que a medida que el nivel de la señal aumentaba, también lo hacía la percepción de urgencia. Sin embargo, en la práctica, estos hallazgos deben considerarse en conjunción con los niveles recomendados por estándares internacionales y estudios científicos (generalmente entre 15 y 30 dB por encima del nivel de ruido ambiental) [35,21].

Por otro lado, la diferencia promedio en el tiempo de reacción entre las señales de 40 dB y 5 dB fue de 60 ms. A nivel de respuesta humana, este intervalo temporal es extremadamente corto y solo resulta significativo en situaciones específicas (como en el caso de un piloto de fuerzas aéreas, ante inminente colisión, por ejemplo).

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

Se propone una investigación cuantitativa orientada a la búsqueda de un modelo de predicción de la sensación de urgencia en alarmas. El análisis se centra especialmente en alarmas de cruces ferroviarios a paso-nivel, logrando llenar un vacío existente en la literatura. También se propone una alarma modelo basada en el análisis de variables objetivas/subjetivas.

Las variables objetivas que son consideradas para la generación del modelo predictivo abordan tanto aspectos frecuenciales como temporales. Entre estas variables se encuentran la entonación medida en porcentajes, la atenuación de armónicos, la velocidad medida en pulsos por minuto (BPM) y el tiempo de ataque expresado en milisegundos. Por otro lado, la variable subjetiva que se utiliza es la percepción de urgencia.

Además, para caracterizar las alarmas de referencia se utilizan dos de los cuatro momentos espectrales, expresados en las ecuaciones (3)-(5), así como el test de tonalidad según el método descrito en la norma ISO 1996-2 [11]. También se considerará el tipo de alarma utilizada, ya sea zumbador (buzzer), campana o ambas.

En las primeras subsecciones se determina un procedimiento para obtener las variables objetivas a estudiar. Para comparar las variables objetivas con las subjetivas es necesario utilizar alarmas de referencia que deben cumplir con requerimientos (detallados en la subsección) para ser elegidas.

En el segundo subcapítulo se explica el diseño de las pruebas subjetivas, determinando el tipo de prueba con su escala, tamaño de población, estructura de la prueba y todas las consideraciones necesarias para llevarla a cabo.

4.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

La investigación preliminar se basó en la evaluación de variables objetivas utilizando un conjunto de alarmas de referencia que cumplieran con requisitos específicos [36]. En primer lugar, se seleccionaron aquellos países con bajos índices de accidentes en cruces a nivel. Esta información fue tomada a partir de reportes de la unión europea, reguladoras de transporte [2], y artículos (en el caso de Corea del sur, Indonesia y Tailandia) [3-5]. En segundo lugar, se estableció una población mínima de 15 millones de habitantes, para que se asemeje al caso de Argentina. Los países seleccionados que cumplen con estos dos

requerimientos son: Inglaterra, Francia, Indonesia, Japón, Países bajos, Corea del sur, España y Tailandia. Además, para una mejor apreciación de la problemática en el caso de Argentina, se calculó la razón de accidentes en pasos a nivel por millón de habitantes. En adición a la Figura 1, se presenta la Tabla 1 con los datos de las alarmas seleccionadas.

Tabla 1. Datos de los países seleccionados: Accidentes en pasos a nivel por año; Población y valor de la razón de accidentes por millón de habitantes.

País	Accidentes/año	Población	Accidentes/millón hab.
Argentina	321	45.808.747	7.01
Gran Bretaña	6	67.113.000	0.09
Francia	36	65.653.000	0.55
Indonesia	198	271.350.000	0.73
Japón	0	125.190.000	0.00
Países Bajos	11	17.641.147	0.62
Corea del Sur	10	51.829.136	0.19
España	8	47.326.687	0.17
Tailandia	119	66.791.000	1.78

Antes de proceder con el análisis de las señales de los cruces ferroviarios, es necesario realizar ciertas aclaraciones. Idealmente, las alarmas deberían ser captadas con el mismo instrumental y bajo condiciones acústicas similares. Esto, en la práctica es sumamente complejo de llevar a cabo, ya que se deberían conseguir las alarmas, realizar el montaje de un entorno experimental que se asemeje a un caso de la vida real y que además posea una buena acústica para grabar las señales.

Se realizó el análisis de las señales de referencia y se obtuvieron los valores de velocidad, bandas en tercio de octava del test de tonalidad, Spectral Centroid y Bandwidth, junto con el tipo de alarma. Estos valores se expresan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características sonoras de las alarmas de referencia.

País	Velocidad [BPM]	Test tonalidad [Hz]	Spectral centroid [Hz]	Bandwidth [Hz]	Tipo
Argentina	60	1000	2189	2963	Campana
Gran Bretaña	246	2500	3401	2684	Buzzer
Francia	9662	500, 1250, 2000, 3150	7429	4248	Campana
Indonesia	50	400, 630, 1250, 2500	1253	2018	Buzzer
Japón	133	630, 800, 2000, 4000	1855	2935	Buzzer
Países Bajos	347	800, 1250, 2000	2321	2540	Campana
Corea del Sur	100 & 857	315, 1250, 2000, 5000	2943	2939	Ambas
España	98	100, 1250, 2500	2061	3006	Buzzer
Tailandia	66	630, 800	2324	3252	Buzzer

Como se puede apreciar, las alarmas de Argentina e Indonesia exhiben velocidades más bajas en comparación con las demás. Por otro lado, Francia destaca con la alarma de mayor frecuencia de pulsaciones por minuto. Un aspecto particular de Corea del Sur es su alarma dividida en dos, una para peatones y otra para vehículos, lo que marca una diferenciación en sus parámetros acústicos.

Resultó interesante observar los resultados del test de tonalidad, por debajo de 2 kHz, donde Argentina tiene una sola componente tonal en 1 kHz, y Tailandia tiene dos en 630 Hz y 800 Hz. Los demás países poseen al menos una componente tonal en frecuencias más altas. La componente tonal más aguda se encuentra para el caso de Corea del sur y Japón en 5 y 4 kHz respectivamente.

La Figura 10 muestra la respuesta en frecuencia de alarmas para cuatro países. Se observa que Argentina presenta un valle alrededor de 4 kHz, a diferencias de las otras alarmas que presentan una caída constante hacia las altas frecuencias. Sumado a esto, los armónicos de la señal se concentran entre 500 Hz y 2 kHz. Francia, con su alarma tipo campana mecánica, amplía significativamente el ancho de banda generando armónicos notables en la franja entre 4 kHz y 16 kHz.

Es importante destacar que el análisis realizado se encuentra sujeto al error asociado a la obtención de las alarmas. Este error ocurre dado que las muestras de sonido elegidas no fueron capturadas con el mismo instrumental y no se posee información alguna de la metodología empleada.

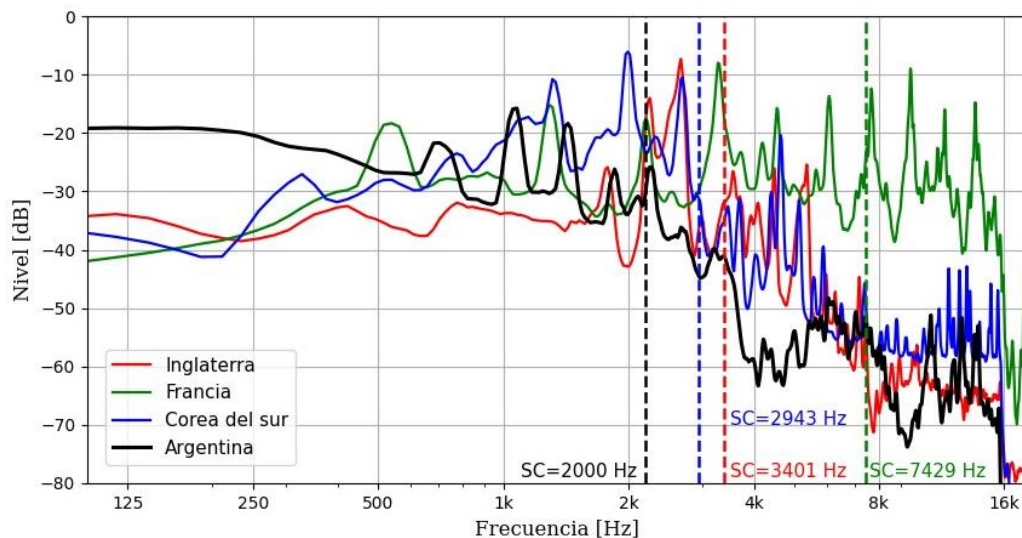


Figura 10. Respuesta en frecuencia con filtro de media móvil ($N=5$) para las alarmas de Argentina (negro), Gran Bretaña (rojo), Francia (verde) y Corea del Sur (azul).

Los resultados de las pruebas subjetivas confirmaron que, a mayor velocidad, mayor es la urgencia percibida y, por otro lado, agregar componentes tonales a las señales también aumenta la sensación de urgencia percibida. La señal estándar fue la menos preferida por los participantes del test. Las dos señales percibidas como más urgentes se acercan en características sonoras a las alarmas de Corea del Sur e Inglaterra.

4.2. CREACIÓN DE ALARMAS SONORAS

Teniendo en cuenta las conclusiones de la investigación preliminar acerca de la percepción de la urgencia en cruces ferroviarios [36], se sintetizan nuevas alarmas partiendo de otras que ya se han caracterizado. Esto permite manipular las variables de las mismas sin sufrir ningún tipo de pérdida de calidad de las señales. Se selecciona una alerta proveniente de un cruce peatonal ferroviario de la línea Urquiza como base para la síntesis, luego, se varían sus parámetros temporales y frecuenciales y se obtienen las señales a emplear en las pruebas subjetivas. Las variables objetivas se manipulan de tal forma que se acerquen en características sonoras a las alarmas de referencia de la investigación preliminar.

Por otro lado, se determina que estas nuevas alarmas no deben ser combinaciones complejas de sonidos, por ejemplo, un sonido que este compuesto por dos alertas con

distintos valores temporales y frecuenciales. Dado que ello podría introducir errores en el análisis estadístico y dificultar la obtención de un modelo predictivo coherente.

A partir del análisis espectral de la alarma utilizada en el ferrocarril Urquiza en Argentina, se extraen las cinco frecuencias principales que caracterizan su sonido. Estas se establecen en 715, 1061, 1435, 1834 y 2260 Hz tal y como se aprecia en la Figura 11. Se crean las señales a partir de las ecuaciones (5) y (6) con los valores antes mencionados, un valor de amplitud A de 0,8, una duración de un segundo y un valor de desarmonía k del 30%.

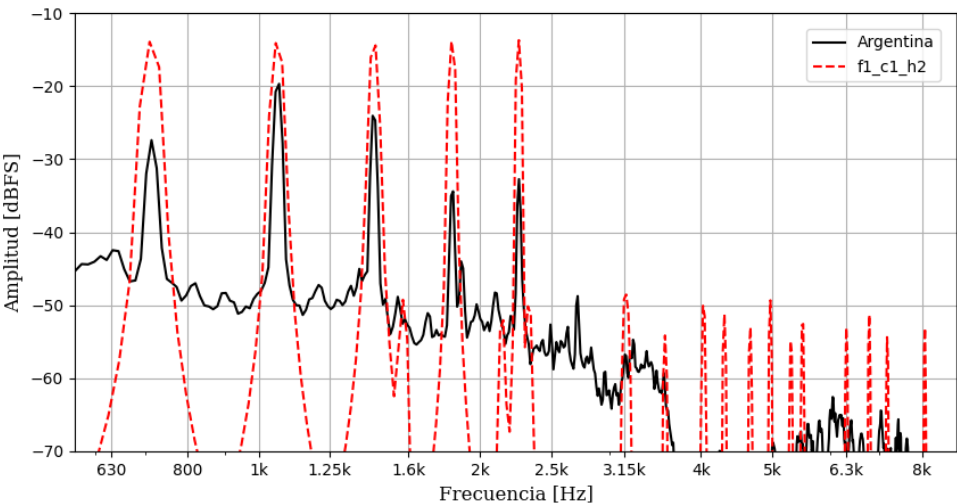


Figura 11. Comparación de respuesta en frecuencia. Alarma Argentina versus alarma sintetizada.

Como variables objetivas se emplean tres valores de entonación para las cinco frecuencias detalladas en el párrafo anterior, tres valores de atenuación de los armónicos, tres de velocidad y tres de tiempo de ataque. Con estos valores detallados en la Tabla 3, se logra un total de 18 alarmas de cuatro variables independientes, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3. Variables objetivas de las alarmas a utilizar en las pruebas subjetivas.

Entonación (F)	Atenuación de armónicos (C)	Tiempo ataque [ms] (TA)	Velocidad [BPM] (V)
+ 0% (F1)	1/15 (c1)	5 (TA1)	90 (V1)
+ 30% (F2)	1/5 (c2)	50 (TA2)	140 (V2)
+ 50% (F3)	1/2 (c3)	120 (TA3)	220 (V3)

Tabla 4. Señales utilizadas para los test subjetivos.

	Señal	F	C	TA [ms]	V [BPM]
Test A	F1c1	1	1/15	5	140
	F1c2	1	1/5	5	140
	F1c3	1	1/2	5	140
	F2c1	1.3	1/15	5	140
	F2c2	1.3	1/5	5	140
	F2c3	1.3	1/2	5	140
	F3c1	1.5	1/15	5	140
	F3c2	1.5	1/5	5	140
	F3c3	1.5	1/2	5	140
Test B	V1TA1	1	1/15	5	90
	V1TA2	1	1/15	50	90
	V1TA3	1	1/15	120	90
	V2TA1	1	1/15	5	140
	V2TA2	1	1/15	50	140
	V2TA3	1	1/15	120	140
	V3TA1	1	1/15	5	220
	V3TA2	1	1/15	50	220
	V3TA3	1	1/15	120	220

Para implementaciones de alarmas en cruces ferroviarios, según el ministerio de transporte, se recomienda la utilización de un tono ubicado en alguna de las frecuencias de la quinta octava según la norma IRAM 4036, Tabla II (preferentemente nota sol) [37].

Un aspecto importante a la hora de crear las alarmas que se utilizarán en el test, es que sean distinguibles entre sí y para eso, es necesario observar los cambios en las variables. La Figura 12 muestra las representaciones temporales y frecuenciales de las señales para los tres valores de atenuación de armónicos elegidos. La alarma sintetizada se compone de 5 frecuencias fundamentales con una amplitud de 0,8 y 20 armónicos, con amplitud decreciente de $A/4$ hasta $A/7$ que se ven afectados por el valor de atenuación c . Además, antes de exportar las señales, se lleva a cabo un proceso de normalización para evitar distorsiones de la misma.

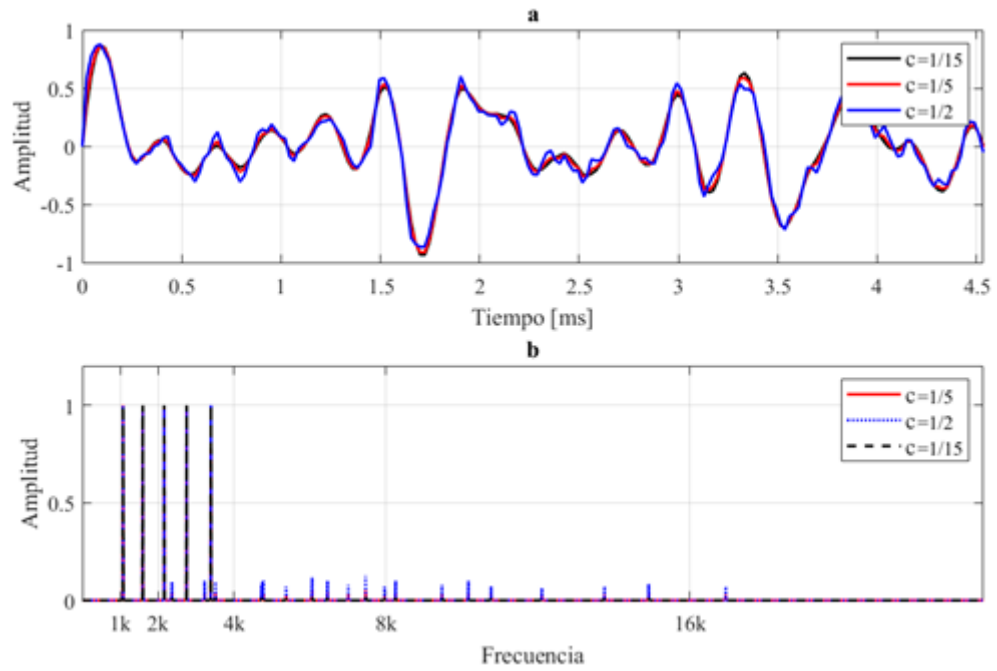


Figura 12. Comparación temporal (a) y frecuencial (b) de la alarma sintonizada en 1046,5 Hz (C6) a 140 BPM con tres valores de atenuación de armónicos: $c = 1/15$ (negro), $c = 1/5$ (rojo), $c = 1/2$ (azul).

En la Figura 13 se ilustra la variación del tiempo de ataque, que se extiende desde un mínimo de 5 milisegundos hasta 150 milisegundos. Esto sirve para aumentar o disminuir la sensación de que un objeto se acerca [23].

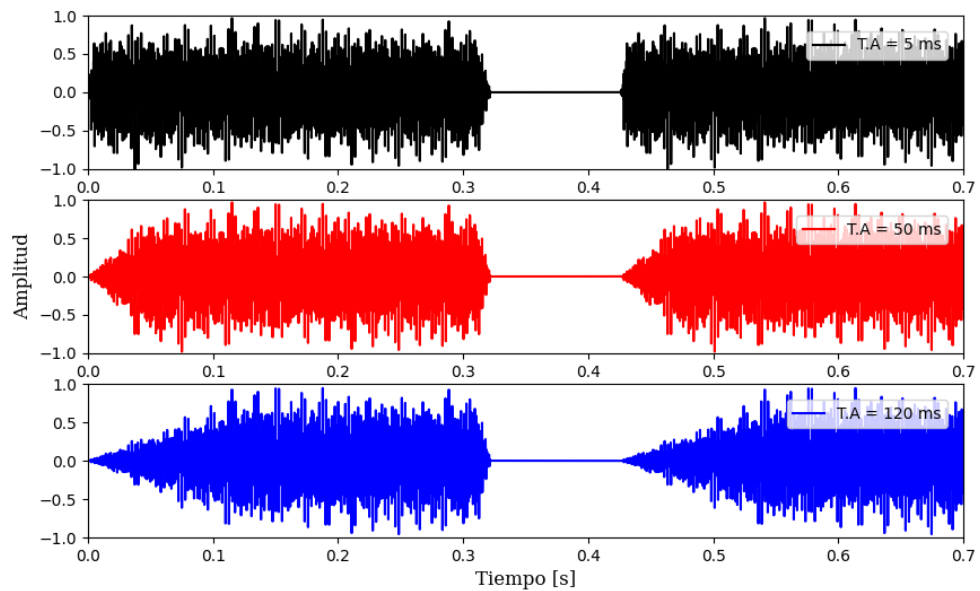


Figura 13. Comparación del tiempo de ataque de 5 ms, 50 ms, 120 ms para la alarma sintonizada en F1 y 140 BPM.

Por último, se analizan los cambios generados en el espectro al manipular las variables frecuenciales. La Figura 14 muestra las alteraciones del espectro al modificar la atenuación de los armónicos con un valor de desarmonía del 30%. En la representación gráfica, la línea negra sólida corresponde a un valor de atenuación $c = 1/15$, la línea roja entrecortada representa $c = 1/5$ y la línea azul punteada refleja $c = 1/2$. Por otro lado, en la Figura 15 se puede apreciar el desplazamiento de las frecuencias principales y sus armónicos para las alarmas con valores de entonación de 0%, +30% y +50%.

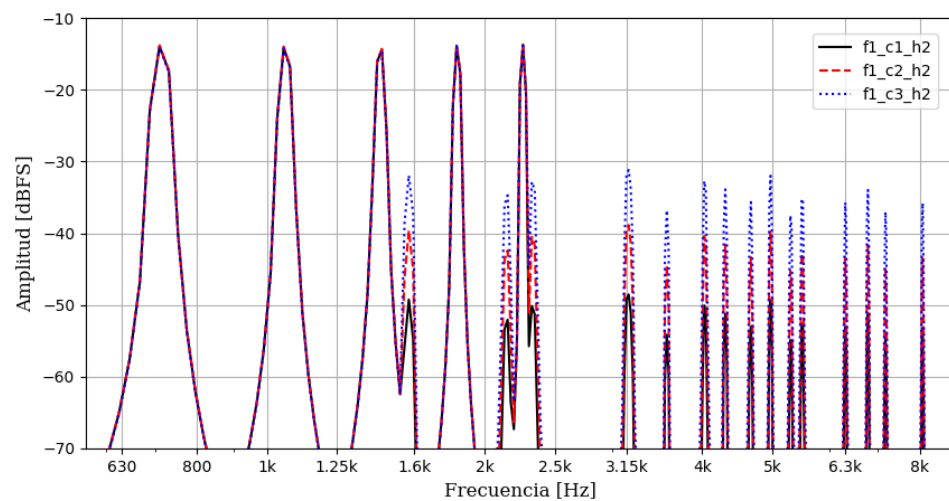


Figura 14. Respuesta en frecuencia de la señal sintonizada con entonación = 0% para tres valores de atenuación de armónicos: $1/15$ (línea sólida negra); $1/5$ (línea entrecortada roja) y $1/2$ (línea punteada azul).

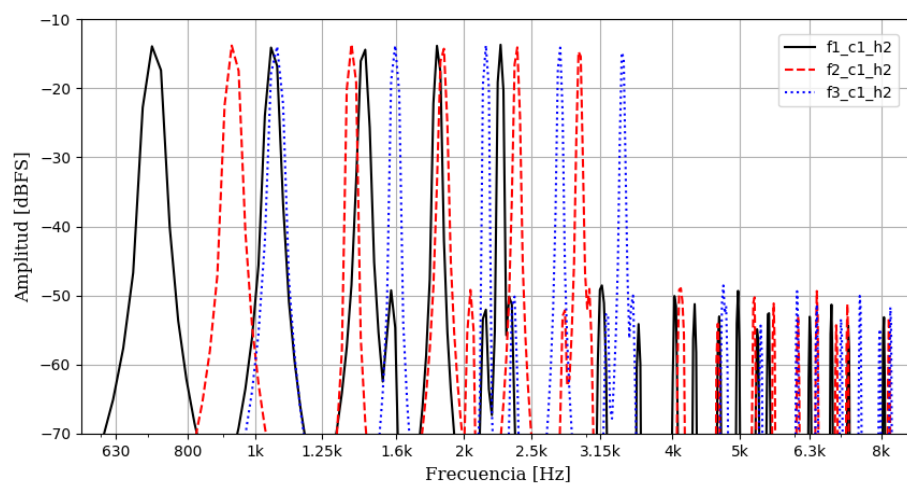


Figura 15. Respuesta en frecuencia para tres alarmas con entonación +30% (línea entrecortada roja), +50% (línea punteada azul), +0% (línea sólida negra).

Se propone recrear el campo sonoro [38] de un paso a nivel para que las condiciones del test se asemejen a la realidad. Esto se logra incorporando a la señal utilizada, un piso de ruido que comprenda ruido vehicular (tránsito liviano y pesado), pájaros, música y gente. La señal de ruido de fondo se obtiene a partir de una grabación auténtica de un cruce peatonal ferroviario de la provincia de Buenos Aires, la estación Caseros de la línea San Martín. Para que las señales sean lo suficientemente distinguibles, se utiliza una diferencia de nivel entre el paisaje sonoro y las alarmas de 16 dB, calculada a partir de los valores eficaces (RMS) de las señales.

Para lograr un ambiente aún más realista, se establece un intervalo de tiempo Δt antes de que la alarma empiece a sonar, mientras el fondo sonoro está presente. Además, para crear los pulsos intermitentes de las alarmas se debe implementar un pequeño tiempo de ataque y de liberación a las señales, evitando así cambios bruscos en el espectro debido a cortes abruptos en las señales. La comparación entre las señales con y sin este procesamiento se presenta en la Figura 16, con valores definidos de tiempo de ataque de 5 ms y tiempo de liberación de 10 ms.

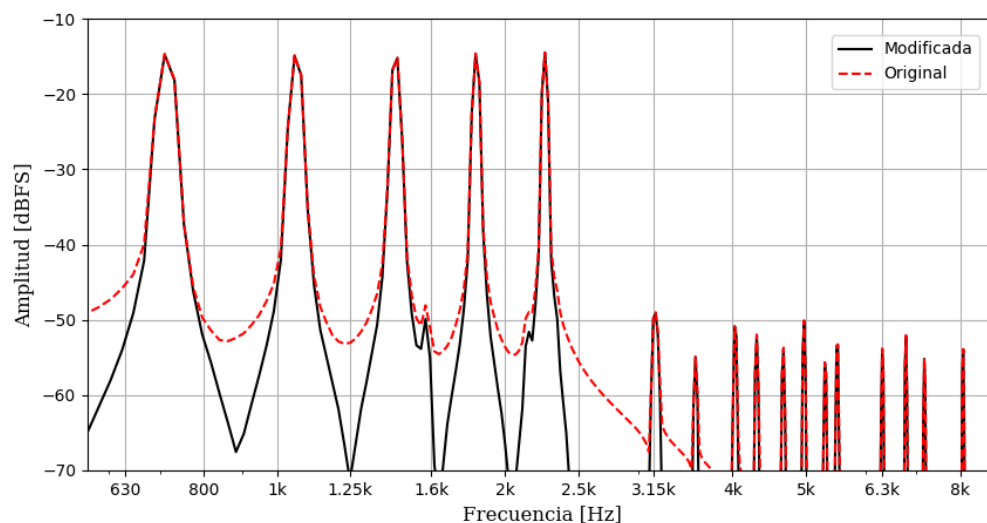


Figura 16. Comparación entre alarma original (línea entrecortada roja) versus la alarma modificada (línea sólida negra).

Las señales a utilizar en la prueba subjetiva (desarrolladas en el siguiente subcapítulo) deben poseer la misma sensación de nivel. Esto se consigue aplicando una normalización de sonoridad (Loudness) a todas las señales.

4.3. DISEÑO PRUEBA SUBJETIVA

Para el diseño de la prueba subjetiva se decide utilizar una muestra del tipo no probabilística, con una cantidad mínima de 30 sujetos no expertos por test, para facilitar el análisis estadístico de los resultados. Al ser una comparación entre alarmas sonoras que se presentan en la cotidianeidad, no es necesario que los sujetos a evaluar sean expertos en el tema. Debido al campo sonoro utilizado y la información obtenida de los accidentes por zona geográfica, se debe restringir el test a personas que vivan dentro del AMBA.

Para evaluar la urgencia percibida se utiliza un test de comparación por pares 2AFC (prueba de selección forzada de dos alternativas) sin posibilidad de empate. Se solicita a los participantes que indiquen cuál de dos sonidos (A o B) les genera una mayor sensación de urgencia. Estos test se llevan a cabo a través de la plataforma Google Forms de manera remota y virtual, con el objetivo de obtener un mayor número de respuestas y promover la difusión de la prueba subjetiva.

Dada la cantidad de alarmas utilizadas, se segmenta el test en dos partes. Un test para las variables temporales (velocidad y tiempo de ataque) y otro test para las variables frecuenciales (pitch y atenuación de armónicos).

La duración de la prueba no debe superar los 8-10 minutos, para evitar fatigar a los participantes y así prevenir cambios de criterio durante la realización de la prueba. Cada señal tiene una duración de 5 a 7 segundos, con un intervalo entre alarmas de 1 segundo y se presentan en una secuencia aleatoria. En la Figura 17 se ejemplifica una posible secuencia del test subjetivo.

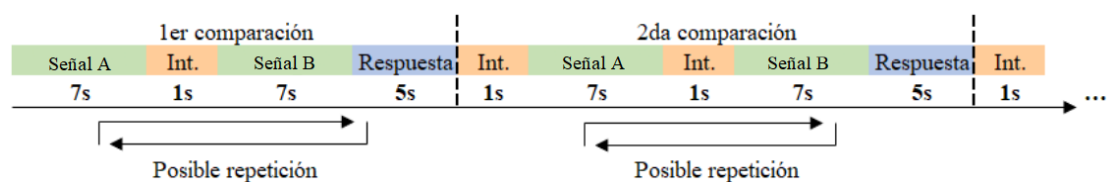


Figura 17. Distribución temporal del test subjetivo.

Se solicita a los participantes proporcionar información relacionada con su edad y si tienen o han tenido licencia de conducir. Además, se les pide que realicen el test utilizando los mejores auriculares que tengan disponibles, especificando la marca y modelo de los mismos. Si bien el test puede llevarse a cabo con cualquier tipo de dispositivos, se brinda una imagen de referencia para que los participantes indiquen correctamente el tipo de

auriculares que están utilizando: circumaurales (over-ear), supraaurales (on-ear), de botón (ear buds) o intraaurales (in ear). Al finalizar el test, se incluye un enlace para acceder al otro test en caso de que no lo hayan realizado.

Dado que se tiene un total de nueve señales para cada test, el número total de comparaciones asciende a 36, superando los límites propuestos de la duración de la prueba. Para disminuir la duración, se utiliza un método de aproximación de matrices incompletas, detallado en la sección de marco teórico. A continuación, en la Figura 18 se presenta la matriz de comparaciones incompletas utilizada para el test A.

Atenuación C		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
Pitch		F1	F1	F1	F2	F2	F2	F3	F3	F3	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
C1	F1	1		o	o	o			o	o	5
C2	F1	2		o		o	o	o		o	5
C3	F1	3	o	o	o		o		o		5
C1	F2	4	o	o				o	o	o	5
C2	F2	5	o	o			o	o		o	5
C3	F2	6		o	o	o		o	o		5
C1	F3	7		o	o	o				o	5
C2	F3	8	o	o	o		o			o	5
C3	F3	9	o	o	o	o	o	o	o		6
											23
											36

Figura 18. Matriz incompleta del test de comparación por pares de variables frecuenciales.

Observando la matriz de comparaciones de la Figura 18, se puede notar un balance en las alarmas elegidas para enfrentar y una reducción de la cantidad total de comparaciones. Al reducir la cantidad de enfrentamientos a 23, se logra permanecer dentro del margen contemplado para una duración adecuada para la prueba. Esta misma matriz se utiliza para el test de variables temporales.

Además, se logra una considerable cantidad de triadas (AB-BC-AC) [39], un componente esencial para realizar el test de concordancia de la muestra elegida. Con el diseño de la matriz de comparaciones se obtiene un total de 18 triadas que se utiliza para validar la muestra. A continuación, en la Figura 19, se ejemplifican los posibles resultados para una triada ABC.

1	A	B	C
A	-	0	0
B	1	-	0
C	1	1	-

2	A	B	C
A	-	0	1
B	1	-	0
C	0	1	-

3	A	B	C
A	-	0	0
B	1	-	1
C	1	0	-

4	A	B	C
A	-	0	1
B	1	-	1
C	0	0	-

5	A	B	C
A	-	1	0
B	0	-	0
C	1	1	-

6	A	B	C
A	-	1	1
B	0	-	0
C	0	1	-

7	A	B	C
A	-	1	0
B	0	-	1
C	1	0	-

8	A	B	C
A	-	1	1
B	0	-	1
C	0	0	-

Figura 19. Posibilidades en una matriz de comparación por pares y casos de errores circulares (rojo).

Se puede observar que si $AB = BC$, AC debería ser igual a los valores A y B . Si no lo es, se trata de un error circular. Esta lógica se repite en cada una de las 18 triadas para encontrar los errores circulares de cada participante.

5. TEST DE VARIABLES FRECUENCIALES (A): RESULTADOS DE LA PRUEBA SUBJETIVA

5.1. ANÁLISIS DE LA MUESTRA

Se dispone de una muestra de 34 individuos pertenecientes a un espectro etario que abarca desde los 21 hasta los 76 años y que residen en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). De este grupo, se identifica que el 14,7% no cuenta con licencia de conducir.

La Figura 20 exhibe el tipo de auriculares utilizado por los participantes durante la prueba. Dentro de las preferencias más destacadas se encuentran los auriculares tipo Ear buds, los cuales representan el 35,3% de la muestra, seguidos por los auriculares de tipo Over-Ear, que abarcan el 44,1% de la misma.



Figura 20. Tipos de auriculares utilizados para el test A.

Por otra parte, se recopiló una amplia variedad de líneas de trenes a las cuales se sienten más cercanos los participantes, ya sea porque pasan a diario por ciertos cruces, o porque viven en la cercanía a una estación. La Figura 21 presenta la distribución de estas preferencias dentro de la muestra evaluada.



Figura 21. Líneas de trenes más usuales para los participantes del Test A.

Por último, el 73,9% de los participantes calificó el lugar donde realizó las pruebas como muy poco ruidoso o poco ruidoso (1-2 puntos en escala de 5 puntos). El ruido más usual mientras realizaban el test fueron los perros y tráfico/ruido de la calle.

5.2. VALIDACIÓN

La validación de los datos obtenidos es fundamental para establecer una coherencia en lo que se pretende estudiar. En otras palabras, si se observa un cambio en las variables dependientes, debe haber seguridad de que esa variación fue provocada por la manipulación de las variables independientes y no otro factor. Es por esto que deben tomarse ciertos recaudos para evitar fuentes de invalidación.

Como método de validación de las respuestas, el elemento a considerar es el error circular de los participantes, que sucede cuando no hay un criterio uniforme para elegir. Se establece que el valor de error circular debe estar por debajo de 0,3, siendo este idealmente 0.

De la muestra inicial de 34 sujetos, se elimina la persona N° 31 ya que obtiene un valor *CER* (relación de error circular) de 0,333. Por lo tanto, la muestra final es de 33 participantes.

A continuación, se presenta el recuento de errores circulares por participantes y luego, segmentado por triadas.

A partir de la Figura 22, se puede observar que las triadas con mayor cantidad de errores circulares asociados son la 1-8-9, 2-5-9, 2-7-9, 3-6-8, 4-7-9, 4-8-9 y 5-7-9. Recordando la Tabla 4 de los valores de frecuencia y atenuación de armónicos por señal, se puede notar que todas las señales que conforman las triadas mencionadas poseen una o más señales con un valor de $F = 1,5$ (lo que corresponde a una señal con frecuencia fundamental más aguda).

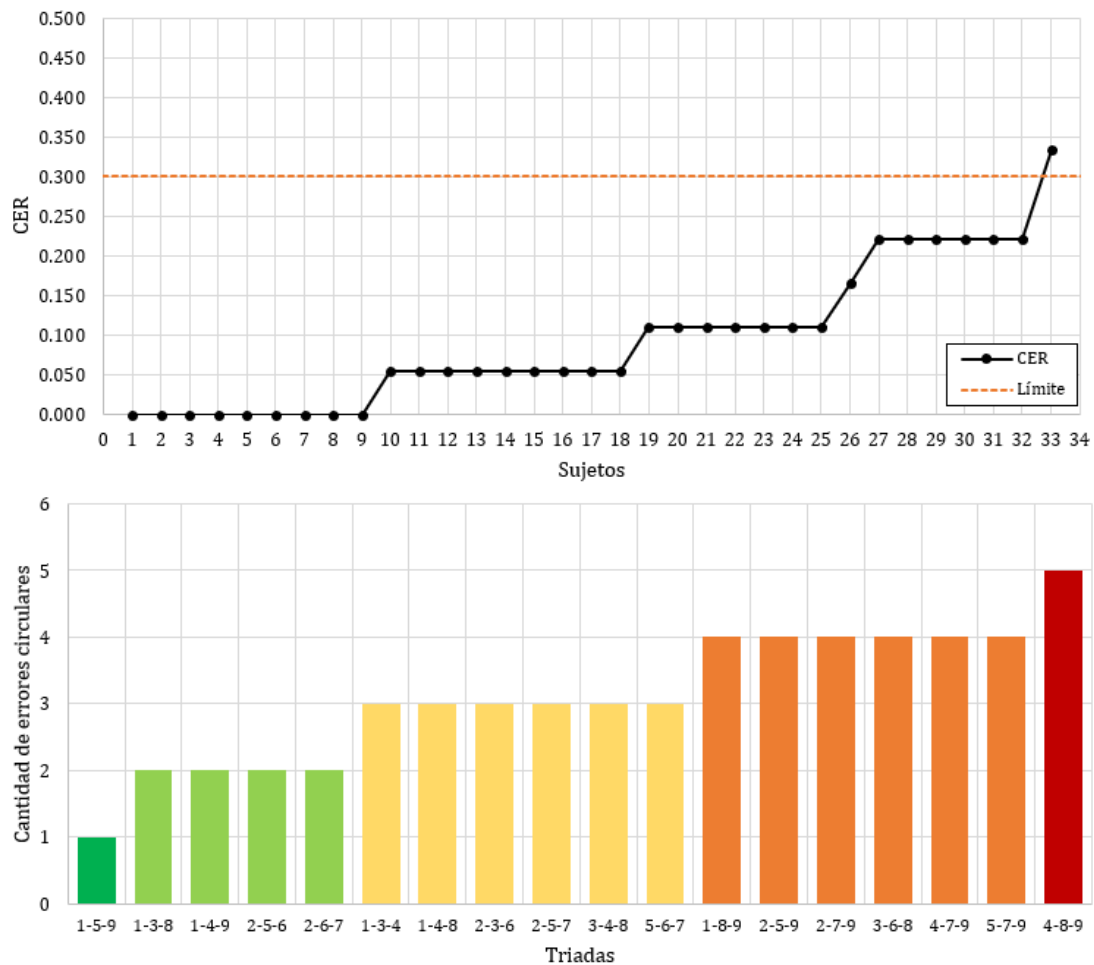


Figura 22. Error circular por participante (arriba) y cantidad de errores circulares por triada (debajo).

5.3. ANÁLISIS POR EDAD

Se analizan los valores de escalas dividiendo a los individuos en dos grupos etarios distintos: el primer grupo comprende a las personas menores a 43 años, mientras que el segundo engloba a personas de 43 años en adelante. Esta segmentación se basa en la clasificación generacional que va desde la generación Z (11 a 26 años), Y (27 a 42 años), X (43 a 58 años) y, por último, las generaciones de 59 años en adelante. De esta forma se

consiguen dos grupos segmentados con una cantidad balanceada de participantes, con 19 sujetos para el grupo de menor edad y 14 sujetos para el segundo grupo.

En el siguiente gráfico de proyección solar de la Figura 23, se aprecian las generaciones y cantidad de sujetos, segmentadas por color según el grupo de edad, con un color azul para los menores de 43 años y color verde para los mayores de 42.

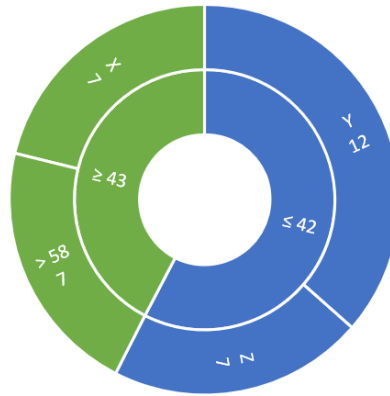


Figura 23. Gráfico de tipo proyección solar segmentado por generaciones y agrupado por color según el grupo de edad.

Para poder comparar los resultados entre grupos, se asigna un puntaje del 1 al 9 para cada alarma, siendo el mayor puntaje otorgado al primer puesto de preferencia. Luego, para independizar los resultados de la cantidad de participantes, se ponderan los puntajes obtenidos según la cantidad de sujetos por grupo. Los resultados se presentan en la Figura 24.

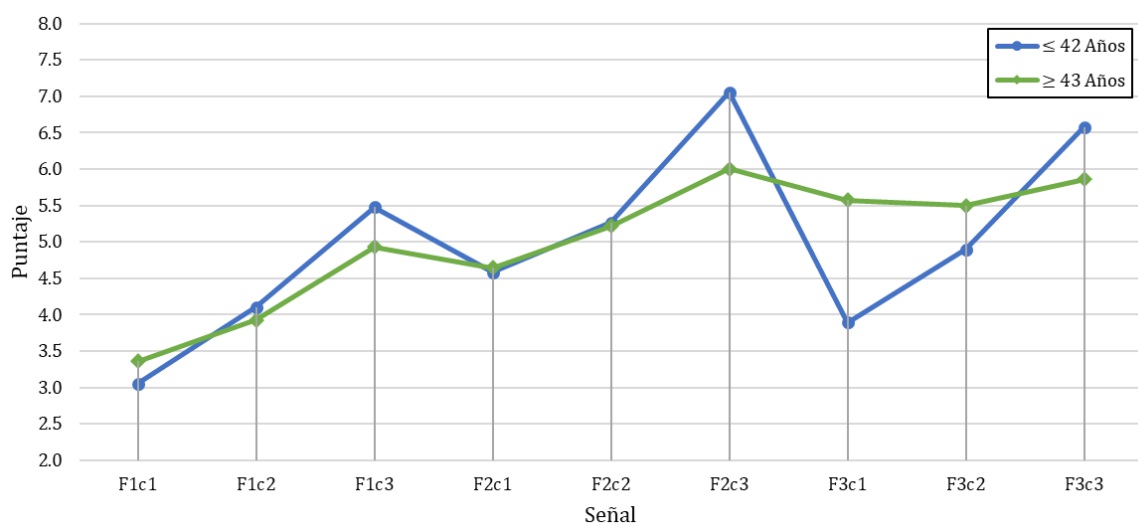


Figura 24. Puntajes según ranking de urgencia percibida por señal para dos grupos de edad.

Al analizar los puntajes obtenidos para cada grupo, en los menores de 43 años se observa un aumento de preferencia subjetiva en términos de urgencia para las señales con valor de atenuación de armónicos c3. En contrapartida, se observa una diferencia notable en la señal número 7 (*F3c1*). En el grupo de mayores de 42 años, se percibe menor diferencia entre los puntajes de las distintas señales. Además, para las primeras 5 señales no se percibe una diferencia demasiado significativa entre los grupos de edad.

Antes de proceder con el análisis de los resultados de forma global, se busca corroborar o descartar que la edad de los participantes sea un factor de influencia en la urgencia percibida.

Se realiza una prueba de normalidad de las muestras (agrupadas por edad) a partir de los valores de escala individuales. A través del test de Shapiro-Wilk, se determina que en ambos grupos y para todas las señales, se encuentra una distribución normal. A continuación, en la Figura 25, se puede apreciar el gráfico de cajas agrupadas para la muestra segmentada por edad. Además, se confirma a través del Test de Levene que la muestra no posee homogeneidad en sus varianzas ($p < 0,05$).

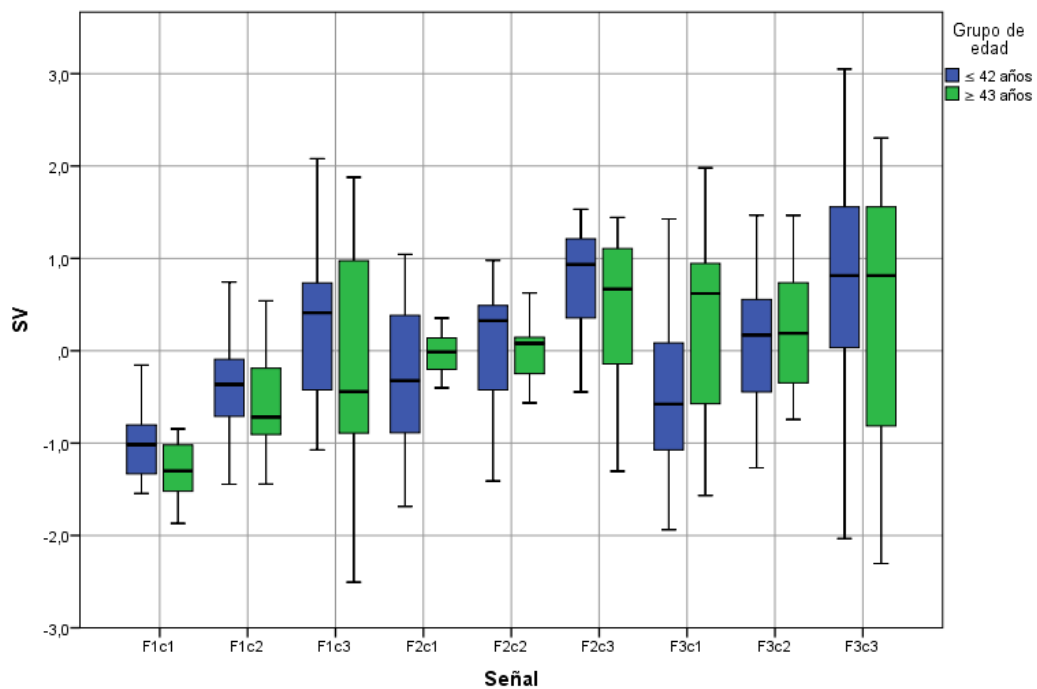


Figura 25. Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales y segmentado en ≤ 42 años (Azul) y ≥ 43 años (Verde).

Luego, para evaluar la influencia del factor de la edad, se realiza una prueba ANOVA de dos factores con una sola muestra, a modo de no provocar errores por repetición de muestras.

Los resultados del análisis de varianza dan como resultado que la edad es un factor de influencia de la urgencia percibida con un valor $F_{1,8} = 12,677$ con una significancia menor a 0,01 de $p = 0,0074$.

5.4. PRUEBA DE NORMALIDAD

A pesar de que se verificó que la edad es un factor de influencia significativa en la urgencia percibida (para el test A). Resulta de interés conocer los efectos de las variables frecuenciales sobre la urgencia percibida de forma general, sin segmentar la población por edades.

Se eliminan los valores atípicos de la muestra de 33 participantes y se realiza una prueba de normalidad. Dado que la muestra tiene menos de 50 participantes, se utiliza el test de normalidad de Shapiro-Wilk. Se verifica que la muestra posee una distribución normal en todas las señales, excepto en la señal $F2c3$, que posee un valor de significancia p de 0,008 ($< 0,05$).

Luego, se aplica el test de Levene para evaluar la homogeneidad de la varianza, que da como resultado que la muestra analizada rechaza la hipótesis de igualdad de varianzas ($p < 0,05$).

En la siguiente Tabla 5 se presentan parámetros descriptivos de la muestra y a continuación, en la Figura 26, un gráfico de tipo caja de los valores de escala por señal.

Tabla 5. Parámetros estadísticos descriptivos de los resultados individuales del test A.

Señal	Media	Rango	Curtosis	Asimetría
$F1c1$	-1,1306	1,7124	0,263	0,444
$F1c2$	-0,4554	2,1879	-0,448	0,195
$F1c3$	0,0202	4,8144	0,091	-0,332
$F2c1$	-0,2021	2,7302	-0,240	-0,114
$F2c2$	0,0652	2,7637	0,159	-0,245
$F2c3$	0,5629	2,8369	-0,116	-0,883
$F3c1$	-0,1409	3,9172	-0,976	0,135
$F3c2$	0,1254	2,7343	-0,350	0,150
$F3c3$	0,5628	5,3544	-0,747	-0,481

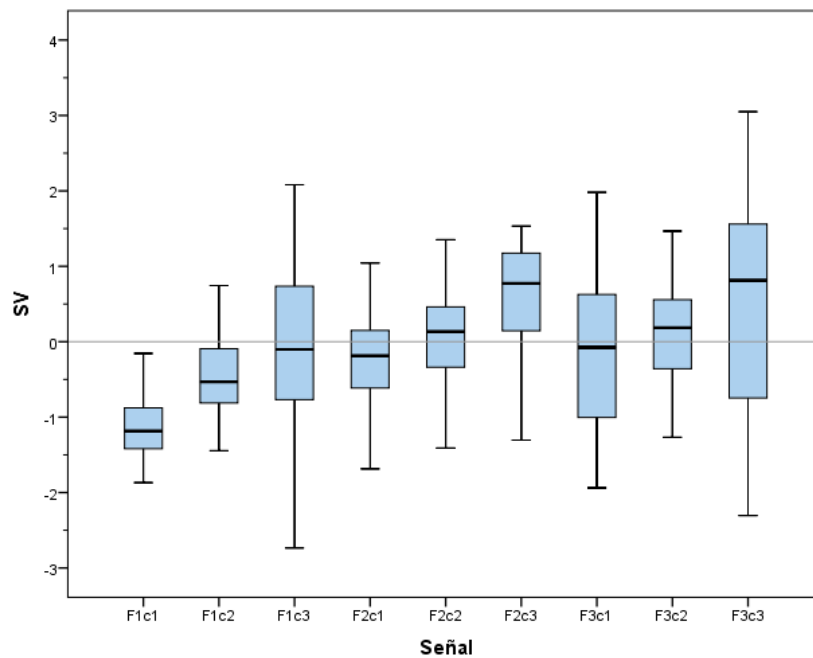


Figura 26. Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales.

En base a los resultados obtenidos, se puede apreciar que la media incrementa cuando aumenta la variable c para cada valor de F . Entre las señales con valor $F1$, $F2$ y $F3$ se puede observar un crecimiento en la media. También se evalúa el rango, es decir, la diferencia entre los valores mínimos y máximos para cada señal, las señales $F1c3$ y $F3c3$, que corresponden a los valores de $c3 = 1/2$, poseen la mayor diferencia. Por otra parte, los valores de curtosis más representativos se encuentran para las tres señales con valor de $F3$, esto significa que para dichas señales, los valores de escala se concentran mayoritariamente alrededor de la media.

5.5. ANOVA

Dado que una de las señales no posee una distribución normal, se utiliza el Test de Kruskal-Wallis para comprobar si la diferencia entre las señales es factor de influencia de los resultados. El resultado del test muestra el efecto significativo de las señales sobre la urgencia percibida ($p < 0,01$). Luego, se procede a realizar una prueba ANOVA de todas formas, ya que este tipo de pruebas resultan robustas contra desviaciones de una distribución normal [27].

A partir del test de Levene para evaluar la homogeneidad de varianza de la muestra, se deduce que la muestra analizada resulta heteroscedástica ($p < 0,05$).

Luego de comprobar la varianza de la muestra, se realiza una prueba ANOVA de múltiples vías con varias muestras por grupo, para evaluar la influencia de los parámetros F y c en los resultados. La interacción entre los factores ($F*c$) no rechaza la hipótesis nula [$F_{4,279} = 0,623$; $p = 0,647$], las influencias de los factores son independientes entre sí. Los resultados de la prueba se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. ANOVA dos vías con varias muestras por grupo para el Test A.

Origen	Suma de cuadrados	gl	F	Sig.
F	27,98	2	18,500	0,000
c	35,19	2	23,270	0,000
$F*c$	1,88	4	0,623	0,647
Error	210,98	279	-	-

Luego de comprobar la independencia de las variables, se verifica que las señales empleadas en el test resultan factores de influencia significativa en la percepción de la urgencia [$F_{8,279} = 10,261$; $p < 0,01$] según el test ANOVA con varias muestras por grupo.

Dado que la varianza muestral es no homogénea, se realiza un análisis de tipo Post-Hoc utilizando el parámetro de Games-Howell. Los resultados destacan que la señal con el mayor grado de influencia sobre las demás es la alarma con parámetros $F1c1$, seguida en menor medida por la señal $F1c2$. A continuación, en la Tabla 7 se muestran los resultados de la prueba Post-Hoc para estas alarmas.

Tabla 7. Test A. Prueba Post-Hoc con parámetro Games-Howell para las señales con mayor diferencia de medias. Se resaltan las diferencias significativas menores a 0.05 (negrita).

Señal (I)	Señal (J)	Dif. Medias (I-J)	Sig.	Señal (I)	Señal (J)	Dif. Medias (I-J)	Sig.
$F1c1$	$F1c2$	-0.675	0.000	$F1c2$	$F1c1$	0.675	0.000
	$F1c3$	-1.151	0.000		$F1c3$	-0.476	0.471
	$F2c1$	-0.929	0.000		$F2c1$	-0.253	0.765
	$F2c2$	-1.196	0.000		$F2c2$	-0.521	0.019
	$F2c3$	-1.693	0.000		$F2c3$	-1.018	0.000
	$F3c1$	-0.990	0.000		$F3c1$	-0.314	0.833
	$F3c2$	-1.256	0.000		$F3c2$	-0.581	0.012
	$F3c3$	-1.693	0.000		$F3c3$	-1.018	0.009

Analizando las varianzas de cada factor por separado, se verificó que tanto el factor de entonación F [$F_{2,247} = 16,974$; $p < 0,01$] como la atenuación de armónicos c [$F_{2,247} = 17,097$; $p < 0,01$] influyen en los resultados de la percepción de urgencia.

Para descartar cualquier tipo de error por repetición de muestras, se analizan los resultados mediante un análisis ANOVA de una sola muestra por grupo, a partir de los valores de escala globales obtenidos con el método de Gulliksen. Se verifica nuevamente que los factores F y c resultan independientes entre sí y que estos son factores de influencia en los resultados con una contribución del 34% y 61% respectivamente.

5.6. RESULTADOS GLOBALES Y MODELO DE PREDICCIÓN

A continuación, en la Figura 27 se presentan los resultados globales para cada una de las alarmas, obtenidos a través de la aproximación de los valores de escala con el método de Gulliksen.

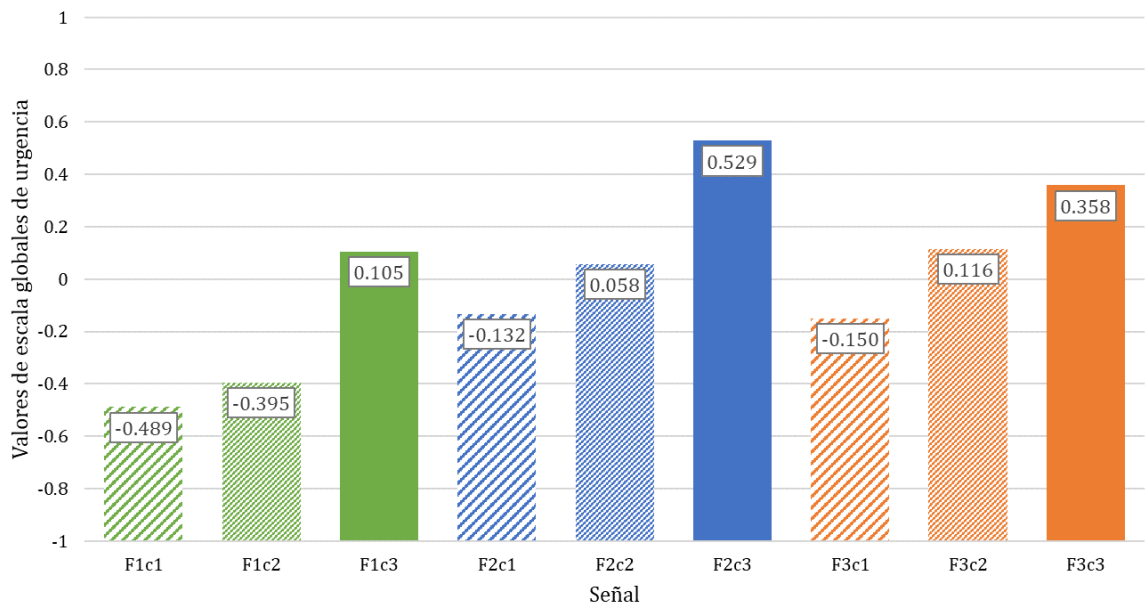


Figura 27. Valores globales de escala segmentados por señal y agrupados por valor de pitch (color) y valor de atenuación de armónicos (relleno).

Las señales que se perciben como de menor urgencia son las señales $F1c1$ y $F1c2$, en contrapartida, las señales más elegidas en términos de urgencia son las alarmas $F2c3$ y $F3c3$. Se visualiza un mayor valor de preferencia en términos de urgencia para las señales con valor de atenuación de armónicos $c3$ ($c = 1/2$). La siguiente Tabla 8 expresa las medias agrupadas por el valor de F y el valor de c .

Tabla 8. Medias de los valores de escala agrupadas por F y por c de los resultados globales del test

A.

Media agrupada por F	-0,2598	0,1517	0,1081
Media agrupada por c	-0,2568	-0,0737	0,3306

Se puede observar que, agrupando por los valores de entonación de las alarmas, la media más alta se encuentra en el grupo de alarmas de valor $F2$ (color azul en la Figura 27). Por otra parte, observando la media agrupada por la atenuación de armónicos, la media crece a medida que aumenta el valor de la variable, siendo $c3$ el grupo que posee la media más elevada (trama sólida en la Figura 27).

Esta tendencia se puede confirmar observando la Figura 28, que corresponde a un gráfico de los valores de escala versus el valor de atenuación de armónicos agrupados por valor de entonación.

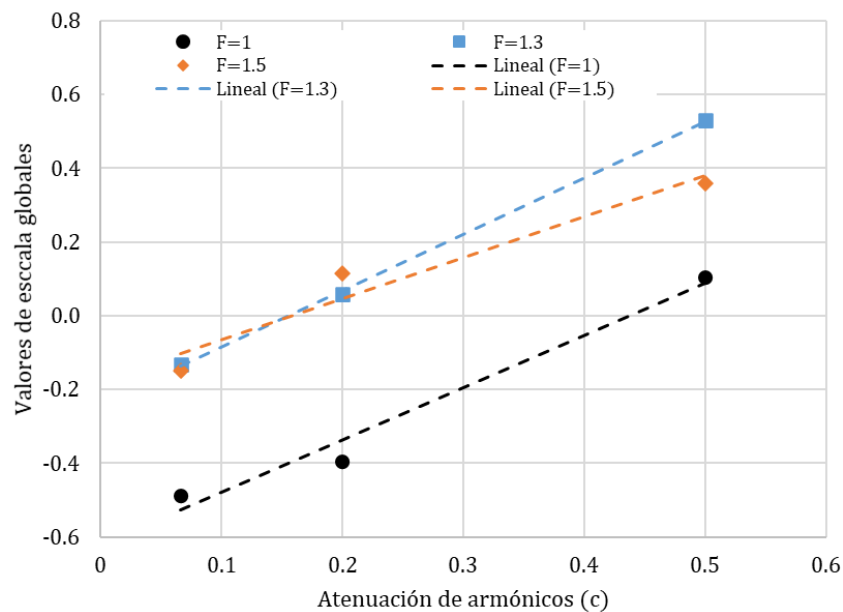


Figura 28. Valores de escala versus atenuación de armónicos agrupados por valor de F con regresiones lineales.

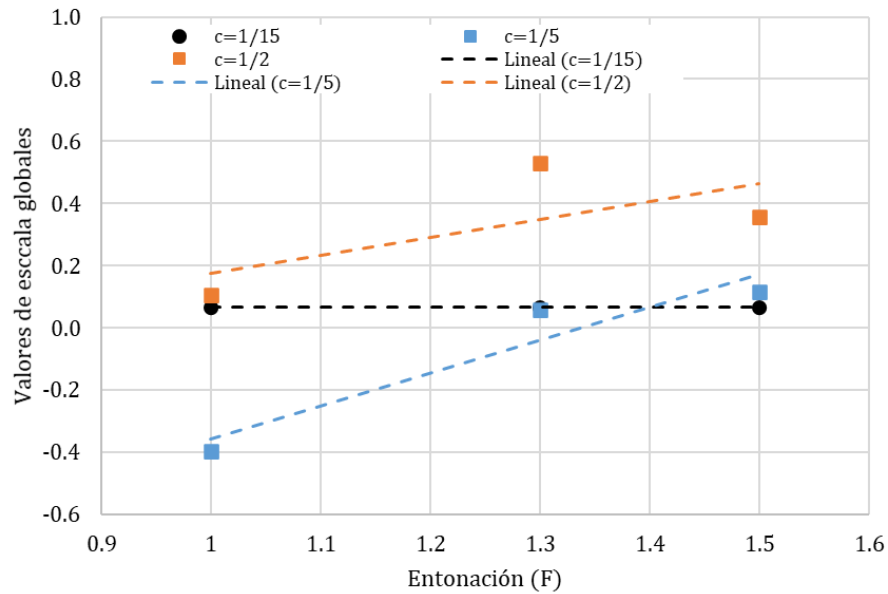


Figura 29. Valores de escala versus entonación agrupados por valor de c con regresiones lineales.

Se ejecuta un análisis de correlación entre las variables de valor de escala, entonación F y atenuación de armónicos c . Se obtiene que los cambios en la atenuación de armónicos se ven reflejados en el valor de escala, con un valor de correlación de Pearson de $r = 0,789$ y $p = 0,011$.

Por último, para obtener el modelo de predicción de la urgencia percibida, se realiza una regresión lineal sobre los resultados globales. El modelo de predicción mostrado a continuación en la ecuación (17), obtiene un valor de R^2 de 0,892 con un coeficiente de Durbin-Watson de 2,630, denotando una baja influencia de los errores en el modelo. Simultáneamente, se obtiene un factor de inflación de la varianza (VIF) igual a uno, demostrando que no hay colinealidad entre las variables utilizadas en el modelo propuesto.

$$SV = 0,786F + 1,354c - 1,342 \quad (17)$$

A continuación, en las Figuras 34 y 35, se muestra la comparación entre los valores de escala globales observados y los valores predichos a partir del modelo matemático de la ecuación (17). De esta forma, se puede constatar de manera visual su correlación.

En la Figura 30, las cruces corresponden a los valores predichos a partir del modelo. Para el caso donde $F=1$ (en color negro), se aprecia la menor diferencia entre los resultados observados y los predichos.

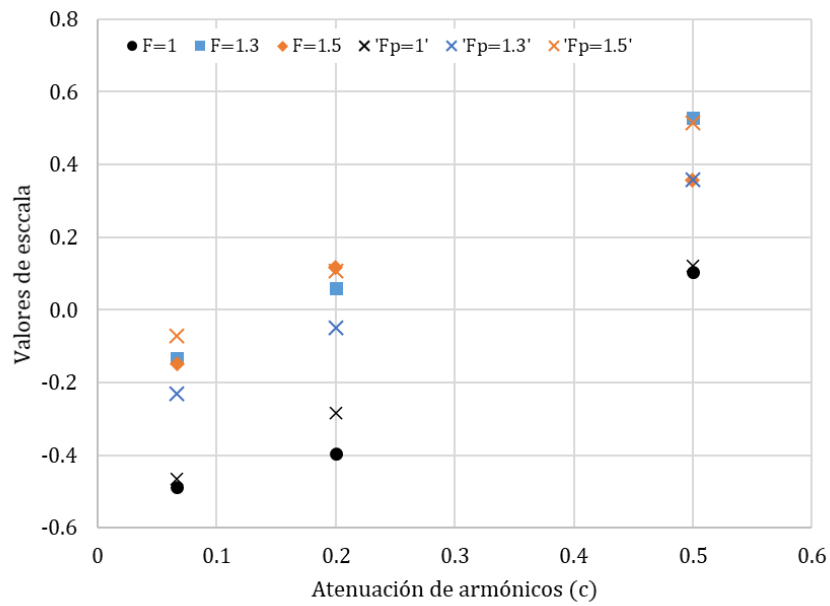


Figura 30. Valores de escala versus atenuación de armónicos agrupados por F para los resultados observados (figuras sólidas) y los valores predichos (cruces).

La representación en la Figura 31 muestra el modelo en un gráfico tridimensional, en donde el eje X es la variable F , el eje Y la variable c y el eje Z el valor de escala. De esta forma, el modelo de predicción de la urgencia se visualiza como un plano. Los puntos negros son los valores de escala observados, cuya opacidad depende de si los valores se encuentran por encima o por debajo del plano.

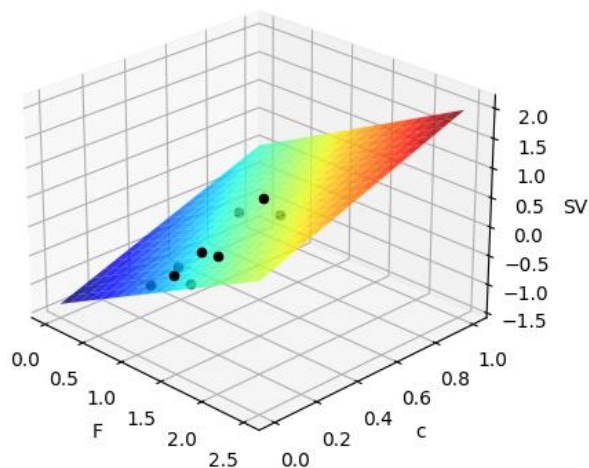


Figura 31. Valores de escala globales observados (negro) y ecuación del modelo de predicción de la urgencia (plano).

6. TEST DE VARIABLES TEMPORALES (B): RESULTADOS DE LA PRUEBA SUBJETIVA

6.1. ANÁLISIS DE LA MUESTRA

Se tiene una muestra de 34 personas de un rango de edades de entre 21 y 76 años, residentes del AMBA de las cuales el 20,6% no posee licencia de conducir.

Tal como se observa en la Figura 32, para realizar el test se utilizaron diversos tipos de auriculares. Los más elegidos son los auriculares de tipo Ear buds (26,5%) y de tipo Over-Ear (58,8%).

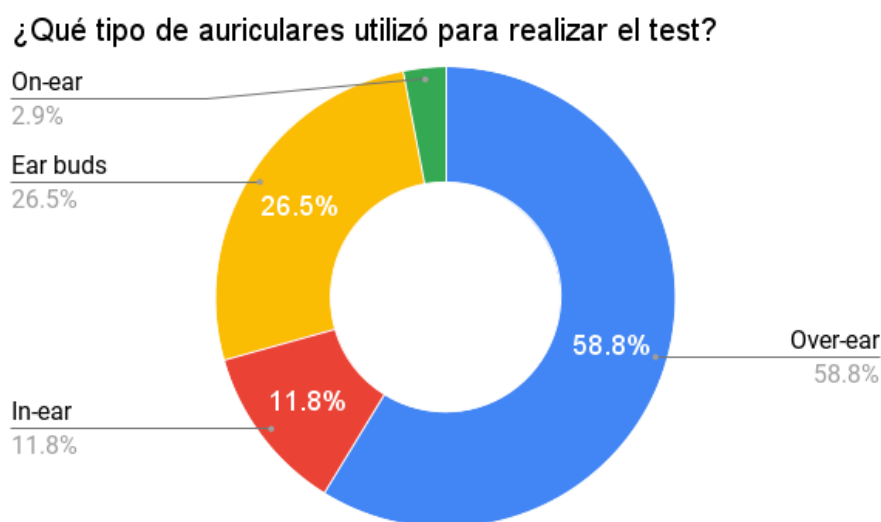


Figura 32. Tipos de auriculares utilizados para el test B.

Por otra parte, se obtuvo una amplia variedad de líneas de trenes a las cuales se sienten más cercanos los participantes, ya sea porque pasan a diario por ciertos cruces, o porque viven en la cercanía a una estación. La siguiente Figura 33 muestra los casos de la población evaluada.



Figura 33. Líneas de trenes más usuales para los participantes del Test B.

Por último, el 62,5% de los participantes calificó el lugar donde realizó las pruebas como muy poco ruidoso o poco ruidoso (1-2 puntos de escala de 5 puntos). El ruido más usual mientras realizaban el test fueron nuevamente los perros y tráfico/ruido de la calle.

6.2. VALIDACIÓN

Al igual que para el test A, como método de validación de las respuestas, el elemento a considerar es el error circular de los participantes, que se da cuando no hay un criterio uniforme para elegir.

Se establece que el valor de error circular debe estar por debajo de 0,3, siendo este idealmente 0.

De la muestra inicial de 34 sujetos, se eliminan 3 sujetos que obtienen un valor *CER* (relación de error circular) de 0,333, por encima del límite establecido. Por lo tanto, la muestra final es de 31 participantes.

A continuación, se presenta el recuento de errores circulares por participantes y luego, segmentado por triadas.

A partir de la Figura 34, se puede observar que las triadas/señales que mayor cantidad de errores circulares cometidos son la 1-4-8 (*V1TA1-V2TA1-V3TA2*) y la 1-4-9 (*V1TA1-V2TA1-V3TA3*). Recordando la Tabla 4, que especifica el valor de los parámetros objetivos de cada señal, se puede notar que las señales corresponden a tres valores distintos de velocidad y un valor de tiempo de ataque repetido. Esta particularidad en la

distribución de los errores circulares se puede relacionar con una sensación de urgencia similar entre las tres alarmas, lo que como consecuencia genera una confusión en el participante a la hora de decidir.

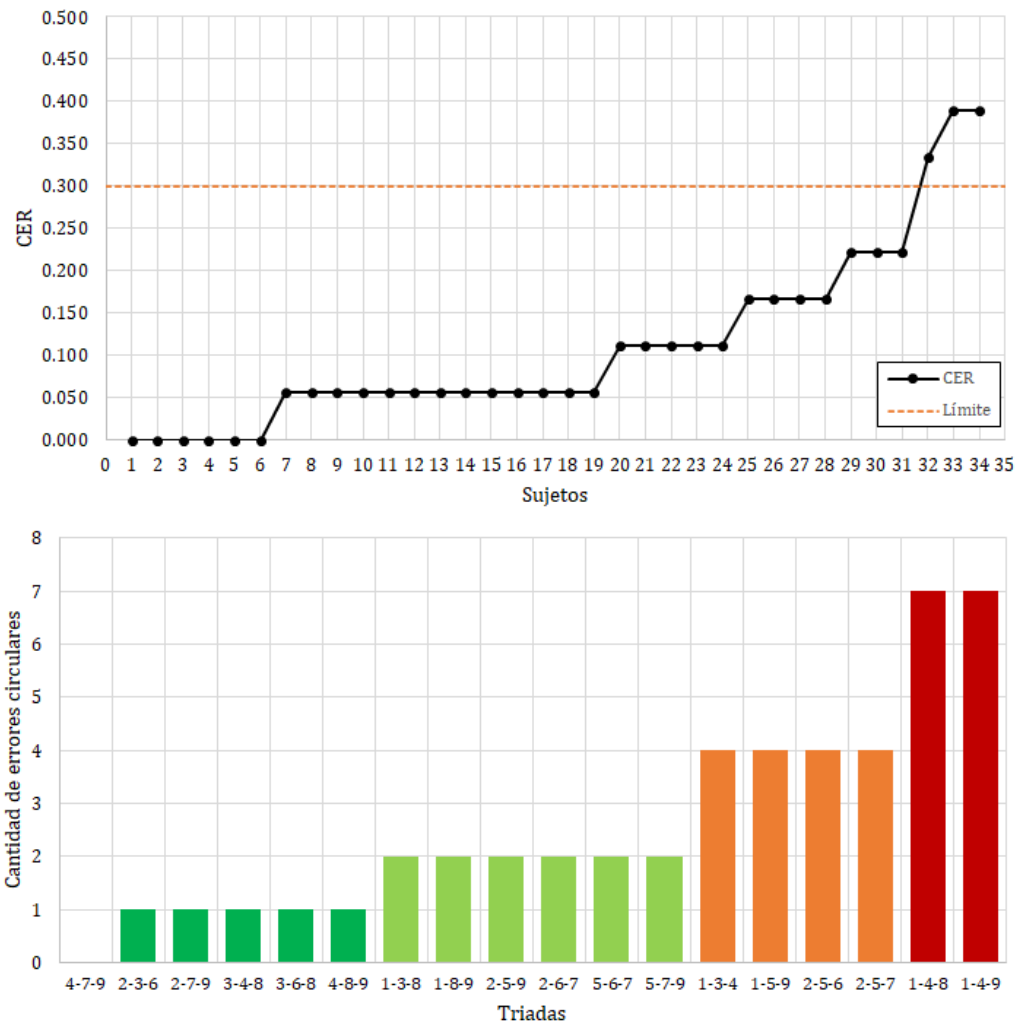


Figura 34. Error circular por participante (arriba) y cantidad de errores circulares por triada (abajo).

6.3. ANÁLISIS POR EDAD

Se analizan los valores de escalas segmentados por dos grupos de edad: el primer grupo abarca a las personas menores a 43 años y el segundo, a personas de 43 años en adelante. Esta segmentación se basa en la división de generaciones de edad, al igual que para la prueba de variables frecuenciales. De esta forma, se consiguen dos grupos segmentados con una cantidad balanceada de participantes, siendo de 18 sujetos para el grupo de menor edad y 13 sujetos para el segundo grupo.

En el siguiente gráfico de proyección solar de la Figura 35, se aprecian las generaciones y cantidad de sujetos, segmentadas por color según el grupo de edad, con un color azul para los menores de 43 años y color verde para los mayores de 42.

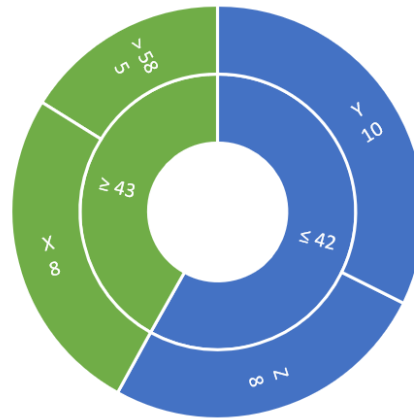


Figura 35. Gráfico de tipo proyección solar segmentado por generaciones y agrupado por color según el grupo de edad.

Para poder comparar los resultados entre grupos, se asigna el mismo sistema de puntajes utilizado en la prueba de variables frecuenciales. De igual manera, se ponderan el puntaje de acuerdo a la cantidad de sujetos por grupo. Los resultados se presentan en la siguiente Figura 36.

Al analizar los puntajes obtenidos para cada grupo, se destaca una tendencia similar para cada una de las señales en ambos grupos. Para el grupo de señales con parámetro V2, el grupo de mayor edad las percibe como de menor urgencia que el grupo de menor edad y, para las alarmas de valor V3, ocurre lo mismo, pero de manera inversa. Se registra la menor diferencia entre grupos para las alarmas que poseen menor velocidad.

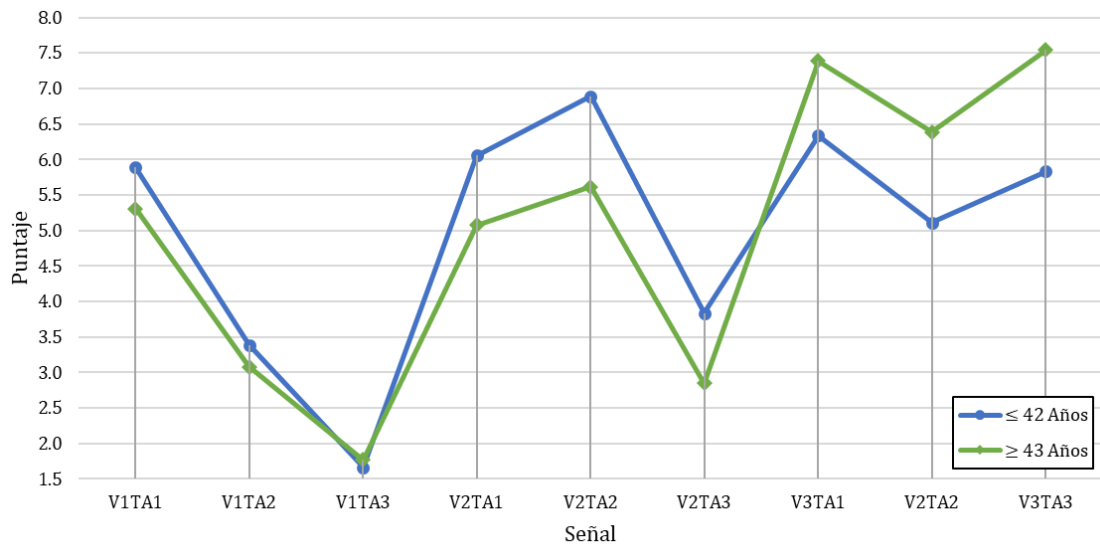


Figura 36. Puntajes según ranking de urgencia percibida por señal para dos grupos de edad.

Antes de proceder con el análisis de los resultados de forma global, se busca corroborar o descartar que la edad de los participantes sea un factor de influencia en la urgencia percibida.

Se realiza una prueba de normalidad de las muestras (agrupadas por edad a partir de los valores de escala individuales. Se determina a través del test de Shapiro-Wilk que, en ambos grupos, para todas las señales, se encuentra una distribución normal. A continuación, en la Figura 37, se puede apreciar el gráfico de cajas agrupadas para la muestra segmentada por edad. Además, se confirma a través del Test de Levene que la muestra no posee homogeneidad en sus varianzas ($p < 0,05$).

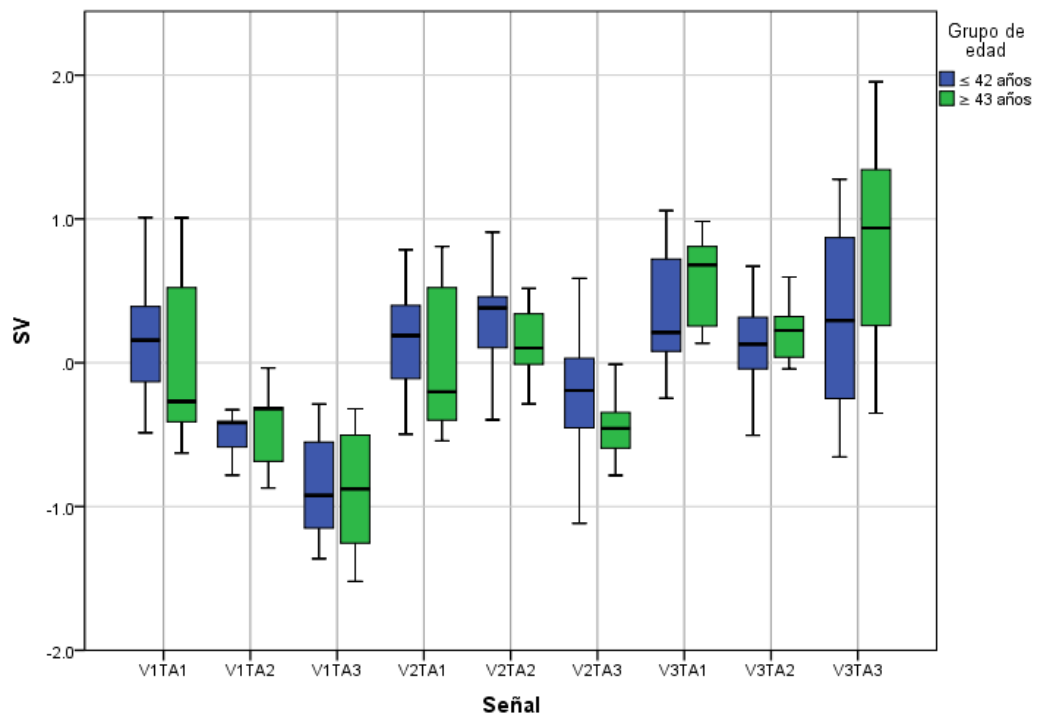


Figura 37. Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales y segmentado en ≤ 43 años (azul) y ≥ 43 años (verde).

Luego, para evaluar la influencia del factor de la edad, se realiza una prueba ANOVA de dos factores con una sola muestra, a modo de no provocar errores por repetición de muestras.

Los resultados del análisis de varianza dan como resultado que la edad no es un factor de influencia de la urgencia percibida, con un valor $F_{1,8} = 0,005$ con una significancia $p = 0,947$.

6.4. PRUEBA DE NORMALIDAD

Se eliminan los valores atípicos de la muestra de 33 participantes y se realiza una prueba de normalidad. Dado que la muestra resulta menor a 50 participantes, se realiza el test de normalidad de Shapiro-Wilk. Se verifica que la muestra posee una distribución normal en todas las señales. Junto a esto, se realiza el test de Levene para evaluar la homogeneidad de la varianza, que da como resultado que la muestra analizada rechaza la hipótesis de igualdad de varianzas ($p < 0,05$).

En la siguiente Tabla 9, se presentan parámetros descriptivos de la muestra y luego, en la Figura 38, un gráfico de tipo caja de los valores de escala por señal.

Tabla 9. Parámetros estadísticos descriptivos de los resultados individuales del test A.

Señal	Media	Rango	Curtosis	Asimetría
V1TA1	-0,1165	1,6384	-0,759	0,296
V1TA2	-0,4403	0,9144	-0,153	-0,004
V1TA3	-0,8683	1,2330	-1,326	-0,040
V2TA1	0,0993	1,3524	-1,284	0,077
V2TA2	0,2450	1,3047	-0,051	-0,134
V2TA3	-0,3328	1,7815	0,211	-0,065
V3TA1	0,4342	1,3051	-1,242	0,158
V3TA2	0,1442	1,1770	0,234	-0,355
V3TA3	0,4923	2,6095	-0,920	0,234

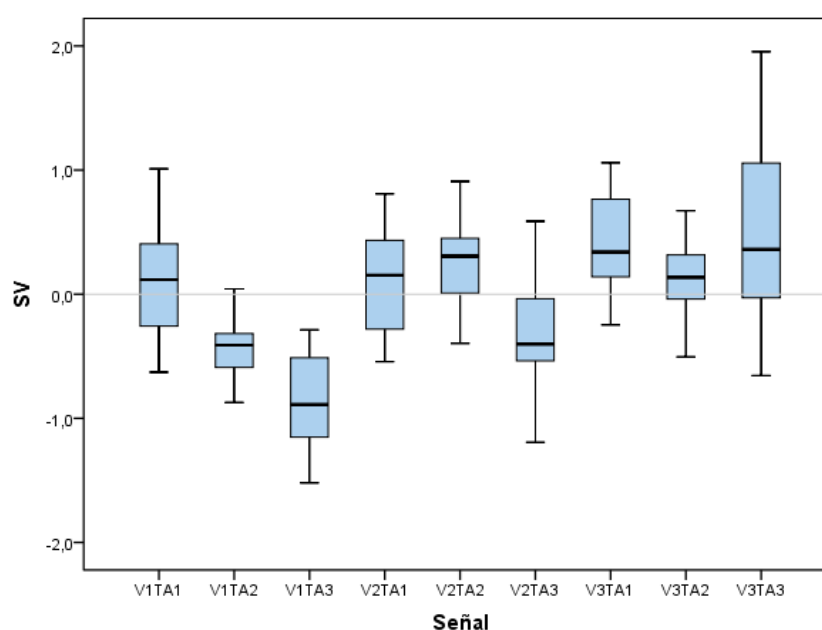


Figura 38. Diagramas de caja y bigotes de los valores de escala agrupados por señales.

Se puede observar que la diferencia entre medias es mayor para el grupo de señales con valor de velocidad de V1 (90 BPM). A su vez, se destaca la señal V1TA3 como la menos preferida en términos de urgencia.

Observando el rango de las señales, el valor más significativo es el que posee la señal V3TA3, con un valor mínimo establecido en -0,656 y un máximo en 1,954. En contrapartida, la señal V1TA2 posee un valor de rango menor a uno. Los valores de curtosis más representativos se encuentran para las tres señales con el menor valor de tiempo de ataque (TA1) y también para la alarma que resultó con la menor urgencia percibida (V1TA3), esto significa que para dichas señales los valores de escala obtenidos se concentran cerca de la media.

La muestra posee una distribución normal en todas las señales, con un valor de significancia p del test de normalidad de Shapiro-Wilk mayor a 0,05. De esta forma, para los próximos análisis que asumen una distribución normal, se analizarán todas las señales.

6.5. ANOVA

De la misma forma que para el Test A de variables frecuenciales, para evaluar la influencia de las variables de cada señal en la percepción de urgencia, se decide realizar una prueba ANOVA. Esto debido a sus resultados robustos, incluso ante desviaciones de una distribución normal [40].

A partir del test de Levene para evaluar la homogeneidad de varianza de la muestra, se deduce que la muestra analizada resulta heteroscedástica ($p < 0,05$).

Luego, se realiza una prueba ANOVA de múltiples vías con varias muestras por grupo, para evaluar la influencia de los parámetros V y TA en los resultados. La interacción entre los factores ($V*TA$) rechaza la hipótesis nula [$F_{4,270} = 17,425$; $p < 0,001$], la interacción entre factores es influyente en la percepción de urgencia.

Sin embargo, se realiza un análisis de una sola muestra por grupo, a partir de los valores de escala globales obtenidos con el método de Gulliksen. De esta forma se descarta cualquier tipo de error por repetición. La prueba ANOVA da como resultado que las variables analizadas (V y TA) resultan variables de influencia en la percepción de urgencia ($p < 0,01$), y además resultan independientes entre sí, con una contribución $p_V = 60\%$ y $p_{TA} = 39\%$. Los resultados de la prueba se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. ANOVA dos vías con una muestra por grupo para el Test B.

Origen	Suma de cuadrados	gl	F	Sig.	Contribución
V	1,91	2	430,29	0.000	60%
TA	1,24	2	281,12	0.000	39%
Error	0,01	4	-	-	

A pesar de que la interacción entre variables resulta significativa, la suma de contribuciones es casi 100%, por lo que se pueden considerar independientes entre sí. La independencia entre variables es la que permite realizar combinaciones lineales en el modelo matemático.

Luego, a través de una prueba ANOVA de varias muestras por grupo, se verifica que las señales empleadas en el test resultan factores de influencia significativa en la percepción de la urgencia [$F_{8,264} = 39,945$; $p < 0,01$].

Dado que la muestra es no homogénea, se realiza un análisis de tipo Post-Hoc utilizando el parámetro de Games-Howell. Se puede observar que la señal con mayor factor de influencia sobre las otras es la señal *V1TA2*, la *V1TA3*, la *V2TA3* y le sigue, en menor medida, la señal *V3TA1*. A continuación, en la Tabla 11 se muestran los resultados de la prueba Post-Hoc para las alarmas empleadas en el test.

Tabla 11. Test B. Prueba Post-Hoc con parámetro Games-Howell para las señales con mayor diferencia de medias. Se resaltan las diferencias significativas menores a 0.05 (negrita).

Señal (I)	Señal (J)	Dif. Medias (I-J)	Sig.	Señal (I)	Señal (J)	Dif. Medias (I-J)	Sig.
V1TA2	V1TA1	-0.557	0.000	V1TA3	V1TA1	-0.985	0.000
	V1TA3	0.428	0.000		V1TA2	-0.428	0.000
	V2TA1	-0.540	0.000		V2TA1	-0.968	0.000
	V2TA2	-0.685	0.000		V2TA2	-1.113	0.000
	V2TA3	-0.107	0.930		V2TA3	-0.535	0.000
	V3TA1	-0.875	0.000		V3TA1	-1.303	0.000
	V3TA2	-0.584	0.000		V3TA2	-1.012	0.000
	V3TA3	-0.933	0.000		V3TA3	-1.361	0.000
V2TA3	V1TA1	-0.449	0.004	V3TA1	V1TA1	0.318	0.090
	V1TA2	0.107	0.930		V1TA2	0.875	0.000
	V1TA3	0.535	0.000		V1TA3	1.303	0.000
	V2TA1	-0.432	0.003		V2TA1	0.335	0.032
	V2TA2	-0.578	0.000		V2TA2	0.189	0.365
	V3TA1	-0.767	0.000		V2TA3	0.767	0.000
	V3TA2	-0.477	0.000		V3TA2	0.290	0.022
	V3TA3	-0.825	0.000		V3TA3	-0.058	1.000

Por último, analizando las varianzas de cada factor por separado con varias muestras por grupo, se verificó que tanto el factor de velocidad *V* [$F_{2,270} = 61,785$; $p < 0,001$], como el factor de tiempo de ataque *TA* [$F_{2,270} = 24,081$; $p < 0,001$] influyen por separado en los resultados obtenidos.

6.6. RESULTADOS GLOBALES Y MODELO MATEMÁTICO

A continuación, en la Figura 39 se presentan los resultados globales para cada una de las alarmas obtenidos a través del método de Gulliksen.

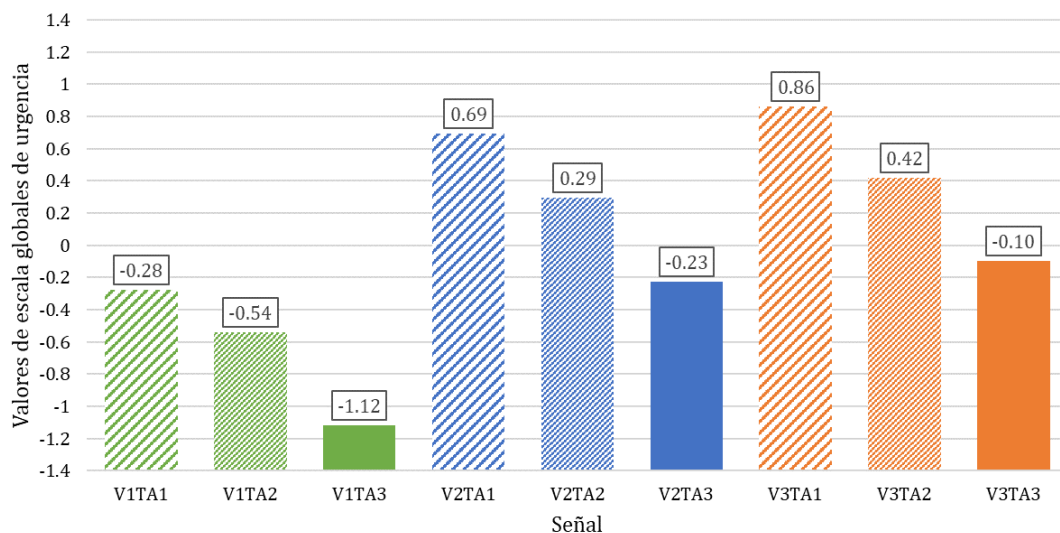


Figura 39. Valores globales de escala segmentados por señal y agrupados por valor de velocidad (color) y valor de tiempo de ataque (relleno).

Las señales que se perciben como de menor urgencia son el grupo de las señales con menor valor de velocidad (color verde), en contrapartida, las señales más elegidas en términos de urgencia son las alarmas V3TA1 y V2TA1. Se aprecia un mayor valor de preferencia en términos de urgencia para las señales con valor de velocidad $V = 220$ BPM y con $TA = 5$ ms. Para corroborar esto, la siguiente Tabla 12 expresa las medias agrupadas por cada variable.

Tabla 12. Medias agrupadas por V y por TA de los resultados globales del test A.

Media agrupada por V	-0,6456	0,2524	0,3932
Media agrupada por TA	0,4247	0,0563	-0,4810

Se verifica que la media del valor de escala global se eleva a medida que crece el valor de velocidad, la media más alta se encuentra en el grupo de alarmas de valor V3 (naranja en la Figura 39). Por otra parte, observando la media agrupada por el tiempo de ataque, la misma decrece a medida que aumenta el valor de la variable, siendo TA1 el grupo que posee la media más elevada (trama con menor densidad de relleno de la Figura 39).

Esta tendencia se puede confirmar visualmente observando la Figura 40, que corresponde a un gráfico de los valores de escala versus el valor de velocidad agrupados por valor de tiempo de ataque.

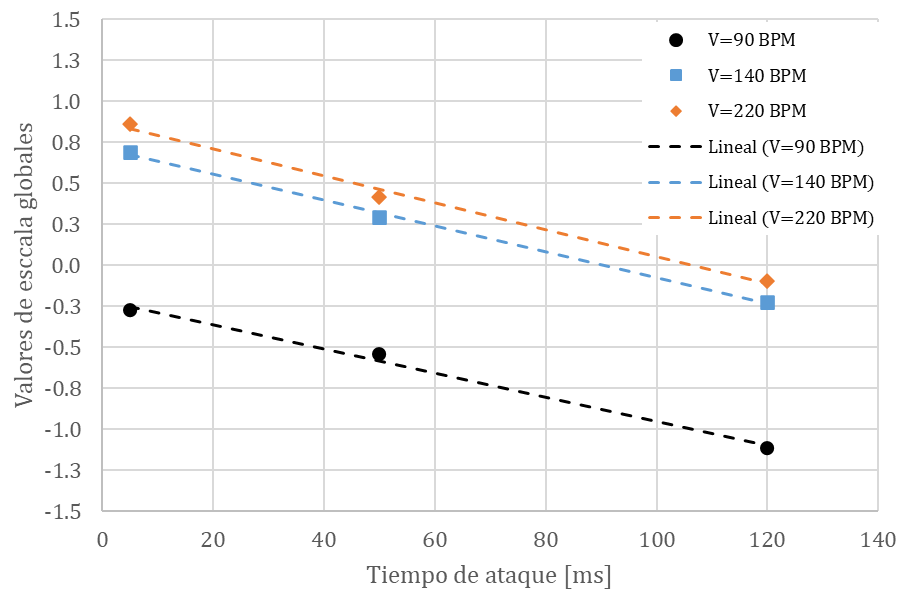


Figura 40. Valores de escala versus tiempo de ataque agrupados por valor de V con regresiones lineales.

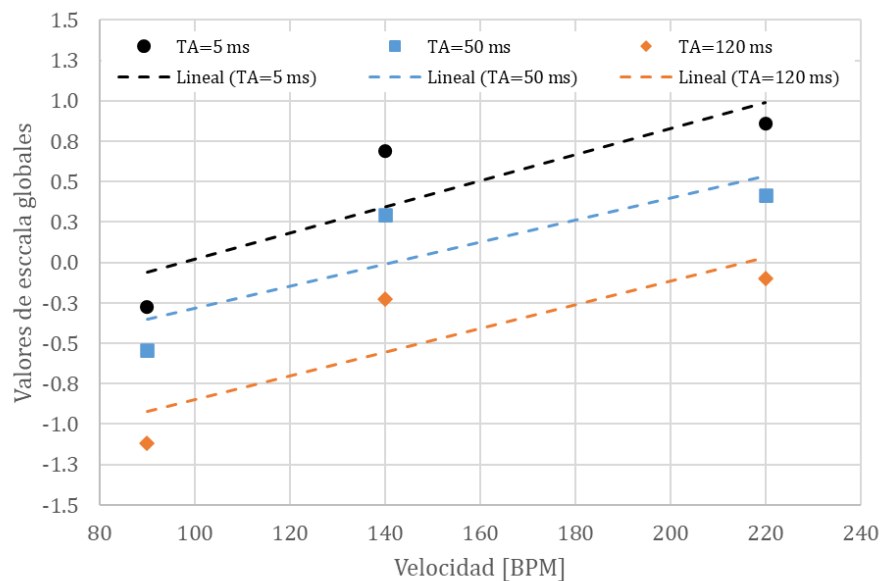


Figura 41. Valores de escala versus velocidad agrupados por valor de TA con regresiones lineales.

Se ejecuta un análisis de correlación entre las variables de valor de escala, velocidad V y tiempo de ataque TA . Se obtiene que los cambios en la velocidad se ven reflejados en el valor de escala, con un valor de correlación de Pearson de $r = 0,677$ y $p = 0,045$. Para el tiempo de ataque, la significancia se encuentra cercana al 95%, con un valor $p = 0,072$ y un valor de correlación de Pearson $r = -0,625$.

Por último, para obtener el modelo de predicción de la urgencia percibida, se realiza una regresión lineal sobre los resultados globales. El modelo matemático presentado en la ecuación (18), obtiene un valor de R^2 de 0,849 con un coeficiente de Durbin-Watson de 0,974. Este valor no resulta del todo adecuado, ya que infiere la posibilidad de que los errores son factores de influencia en el modelo propuesto. Si bien se ve una clara tendencia en los resultados obtenidos, sería necesario agregar un valor más para cada variable, a modo de disminuir la influencia de los errores y construir un modelo matemático más robusto. El modelo propuesto obtiene un valor de colinealidad $VIF = 1$, expresando que no hay multicolinealidad entre las variables.

$$SV = 0,00753V - 0,00788TA - 0,665 \quad (18)$$

A continuación, en las Figuras 42 y 43 se muestra la comparación entre los valores de escala globales observados y los valores predichos a partir del modelo matemático de la ecuación (18). De esta forma, se puede constatar de manera visual su correlación.

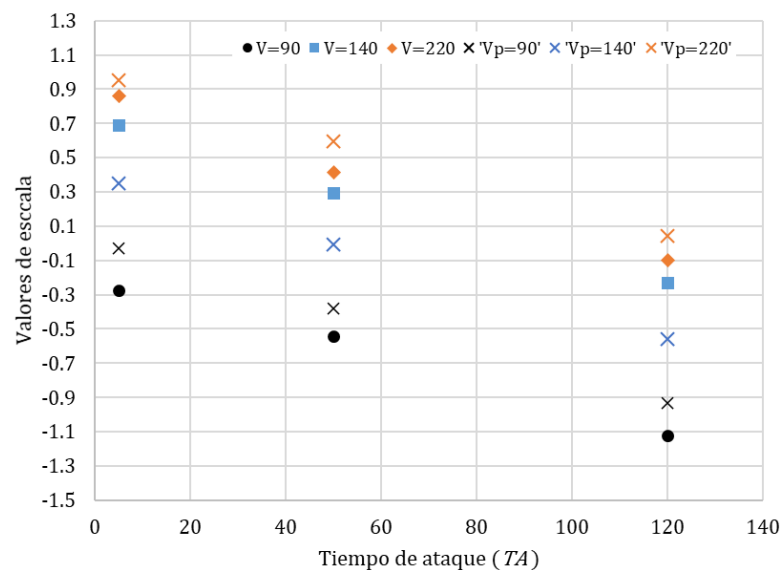


Figura 42. Valores de escala versus tiempo de ataque agrupados por V para los resultados observados (figuras sólidas) y los valores predichos (cruces).

En la Figura 42, se observan, indicados con cruces, los valores predichos a partir del modelo. El caso $V = 220$ (en color naranja) es en donde se aprecia la menor diferencia entre los valores observados y los predichos.

En la Figura 43, se representa esto en un gráfico de tres dimensiones, en donde el eje X es la variable V , el eje Y la variable TA y el eje Z el valor de escala. De esta forma el modelo de predicción de la urgencia es representado como un plano. Los puntos negros son los valores de escala observados, cuya opacidad depende de si los valores se encuentran por encima o por debajo del plano.

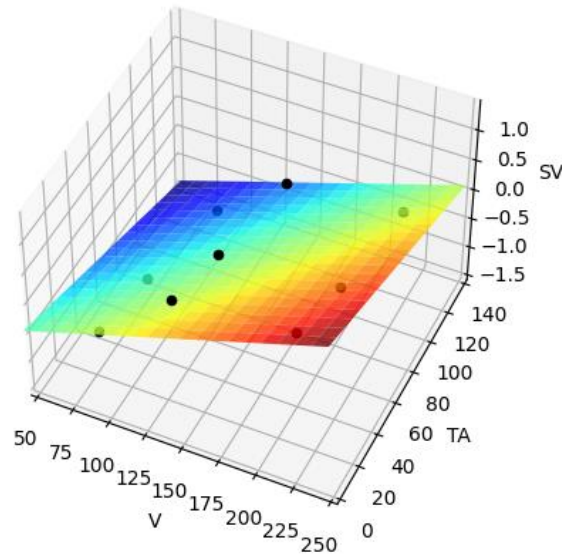


Figura 43. Valores de escala globales observados (negro) y ecuación del modelo de predicción de la urgencia (plano).

7. DISCUSIÓN

Los resultados de ambas pruebas arrojaron resultados que además de ir en sintonía con estudios anteriores, permiten el desarrollo e implementación de modelos matemáticos de predicción de la urgencia. Mientras tanto, al profundizar en los resultados, se encontraron tendencias que pueden abrir nuevas ramas de investigación a futuro. Si bien los resultados son contundentes y claros, las limitaciones del estudio son abordadas a lo largo de las discusiones.

La presente sección separa la discusión por test de variables frecuenciales (A) o temporales (B) y por análisis de edad. Luego, se encuentra una subsección dedicada al análisis de alarmas recomendadas para la república Argentina.

7.1. TEST DE VARIABLES FRECUENCIALES (A)

Al analizar los parámetros estadísticos descriptivos de la muestra se observa que para las alarmas $F1c3$ y $F3c3$, que corresponden a un valor de $c = 1/2$, la diferencia entre el valor mínimo y máximo es más significativa que para el resto de señales. Esta disparidad sugiere una marcada variabilidad en la percepción de urgencia dentro de la misma población. Es importante mencionar que en las señales con valor $c3$ es en donde los armónicos de la señal resaltan, tal como demuestra la Figura 14. Por lo tanto, la diferencia en la percepción de urgencia para estas señales puede ser producto de varias causas: el tipo de auricular empleado y su calidad de reproducción en medias/altas frecuencias; la edad y la presbiacusia (pérdida de audición en altas frecuencias que se produce de forma natural), entre otras.

También se nota que para la señal con valor $F3$, los valores de escala se concentran más cerca de la media, indicando que hay cierta igualdad de criterio entre los participantes, más allá de los valores extremos. Esto también se encuentra sujeto al tipo de auricular utilizado y su calidad para reproducir medias/altas frecuencias, ya que con valores de $F3$ los armónicos de las alarmas quedan por encima de 5 kHz. A su vez, la diferenciación entre valores de atenuación de armónicos está comprometida por la distorsión propia de cada auricular.

Se comprobó a través de pruebas ANOVA que la entonación F y la atenuación de armónicos c , son parámetros de las alarmas que alteran la urgencia percibida de las mismas.

Para la población estudiada, los valores de escala globales observados muestran que las señales con valor $F2$ son las que se perciben como de mayor urgencia, esto indica que no necesariamente un valor más alto de entonación concluye en una mayor urgencia. Si bien el modelo de predicción coloca a la señal $F3c3$ por encima de $F2c3$, la diferencia de urgencia percibida obtenida por el modelo no es significativa. Por otro lado, las alarmas con entonación de armónicos igual a $1/2$ ($c3$) presentaron los mayores valores de urgencia, esto se replica en el modelo de predicción. La preferencia observada de las alarmas con valor $F2$ por sobre $F3$, podría estar ligada al hecho de que es una alarma que resulta “usual” respecto a las alarmas que encuentran en el AMBA actualmente. Tal y como se destacó en la investigación previa, una alarma por fuera de los estándares podría resultar en una menor urgencia percibida por parte de los participantes [36].

Se lograron verificar las conclusiones a las que llegaron Edworthy et al. [14,25]. Las variables frecuenciales son también factores de influencia en la urgencia percibida para alarmas de cruces ferroviarios. Se verificó que aumentar la entonación resulta en un aumento de la urgencia, teniendo las consideraciones que suceden con el valor $F3$. Se logra comprobar que mientras menos atenuadas se encuentren las componentes armónicas, mayor es la urgencia percibida. Esto se complementa con la conclusión de que a menor cantidad de componentes armónicas presente la señal, menor es la urgencia que se percibe.

Por otra parte, al aumentar la entonación de las alarmas utilizadas, aumenta la percepción de urgencia por parte los participantes del Test. Esto se condice con la bibliografía estudiada, que coinciden en que aumentar la frecuencia fundamental o el Pitch, implica un aumento en la urgencia percibida.

7.2. TEST DE VARIABLES TEMPORALES (B)

En comparación al test de variables frecuenciales, se percibe una mayor cantidad de errores circulares en los resultados de la prueba subjetiva. Esto ocurre principalmente para las triadas de alarmas $V1TA1-V2TA1-V3TA2$ y $V1TA1-V2TA1-V3TA3$. La confusión puede darse por utilizar un valor de velocidad alto con un tiempo de ataque que no sea corto ($TA1$

y TA2) y compararlo con una señal con baja velocidad, pero con el menor tiempo de ataque, como lo es la alarma V1TA1. De esta forma se podría producir una sensación de urgencia similar entre las tres alarmas, generando una confusión en el participante a la hora de decidir entre.

El análisis de los parámetros estadísticos descriptivos revela una marcada diferencia entre valores máximos y mínimos para la señal V3TA3. Esto puede estar en sintonía con lo explicado acerca de la combinación de un alto valor de tiempo de ataque y alto valor de velocidad. En promedio los rangos son menores que los obtenidos en el test de variables frecuenciales. También se destaca una curtosis más prominente en las alarmas con valores bajos de tiempo de ataque, sugiriendo que los participantes tienden a percibir la urgencia de manera más uniforme en este tipo de alarmas.

Nuevamente, se comprobó a través de pruebas ANOVA que la velocidad V y el tiempo de ataque TA, son parámetros temporales de las alarmas que alteran la urgencia percibida.

Para la población analizada, los valores de escala globales muestran que las señales con valor V3 son las que se perciben como de mayor urgencia, indicando que a mayor velocidad mayor resulta la urgencia percibida. A su vez, las alarmas con menor tiempo de ataque resultan más urgentes a los participantes. Ambos parámetros resultan con un coeficiente de correlación de Pearson similar en magnitud, de correlación positiva para la velocidad y correlación negativa para el tiempo de ataque.

Se verifica que la velocidad es un factor que posee una influencia significativa en los resultados obtenidos. Modificar la velocidad es una forma sencilla y eficaz de aumentar significativamente la urgencia percibida de una alarma, como bien se destaca en los estudios realizados por Edworthy et al., Marshall Lee y Austria, Haas et al, [14,22,25,26]. También, se confirma, como sugieren las investigaciones de la literatura revisada, que un menor tiempo de ataque resulta en una mayor urgencia percibida [23,26].

7.3. POR EDAD

Segmentando los resultados en base a la edad de los participantes, dividido según generaciones, se comprueba que para el test de variables frecuenciales (A) ocurre una mayor diferencia entre los dos grupos que para el test B de variables temporales. Específicamente, en el test A, el análisis de varianza ANOVA indica que la diferencia generacional es un factor de influencia en la percepción de urgencia.

Resulta importante destacar que dichos resultados se obtienen para una población particular. Para verificar que la generación es un factor de influencia en la percepción de urgencia variando parámetros frecuenciales, se debería realizar un estudio independiente con mayor heterogeneidad de edades y bajo condiciones experimentales consistentes para todos los participantes. Esta metodología permitiría realizar un análisis preciso de este fenómeno, garantizando igualdad de condiciones en la prueba para cada individuo.

7.4. ANÁLISIS DE ALARMAS RECOMENDADAS PARA ARGENTINA

Si se refiere a los lineamientos proporcionados por la comisión nacional de regulación del transporte: el equipamiento emisor acústico (campana de alarma mecánica o electrónica) deberá poder emitir entre 60 y 240 golpes por minuto, tendrá que poseer la capacidad de ajustar el nivel sonoro entre 60 y 95 dB(A) y el tono de la señal sonora se ajustará a alguna de las frecuencias de la quinta octava, según norma IRAM 4036, Tabla II (preferentemente la nota sol).

Considerando esto, en la siguiente Tabla 13 se muestran los parámetros objetivos de las alarmas recomendadas, para luego introducir en el modelo matemático.

Tabla 13. Parámetros de las alarmas propuestas por normativa para generar la máxima y mínima urgencia percibida.

Casos / variables	F	c	V [BPM]	TA [ms]
Mín. urgencia	0,732	1/5	60	5
Máx. urgencia	1,382	1/5	240	5

Por las características acústicas de las alarmas tipo campana, se toma un valor de atenuación de armónicos c igual a $1/5$ y un valor de tiempo de ataque TA de 5 ms. Con estos datos y aplicando el modelo de predicción, se obtienen los valores de escala temporales SV_t y frecuenciales SV_f , expresados en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14. Valores de escala de las alarmas propuestas por normativa para generar la máxima y mínima urgencia percibida.

Casos / variables	SV_f	SV_t
Mín. urgencia	-0,496	-0,174
Máx. urgencia	0,015	1,182

Se puede observar una diferencia de 0,322 entre los valores de escala frecuenciales y una diferencia de 1,167 entre los valores de escala temporales. Esta diferencia en conjunto con el hecho de que no se trata de una norma, sino más bien de una recomendación, y que hay alarmas que se alejan de dicha recomendación, dan como resultado una diferencia de urgencia percibida que podría ser aún más significativa que la presentada.

Esta disparidad adquiere mayor relevancia al considerar que una misma línea ferroviaria de pasajeros puede estar equipada con múltiples alarmas, cada una con parámetros frecuenciales y temporales distintos. Además, se debe tener en cuenta la variable del nivel de las alarmas, que, según la literatura especializada, también ejerce influencia en la urgencia percibida [34].

8. CONCLUSIONES

En la presente tesis se obtuvo un modelo de predicción para las variables temporales y frecuenciales de las alarmas de pasos a nivel ferroviarios.

A partir de dos pruebas subjetivas con matrices de comparaciones por pares incompletas, se logró demostrar que cada uno de los cuatro parámetros estudiados son factores de influencia en la percepción de la urgencia de las señales (entonación F , atenuación de armónicos c , velocidad V y tiempo de ataque TA). También se verificó que las variables temporales generaron una mayor diferencia en la media que las variables frecuenciales.

Es importante resaltar que la investigación se centra en buscar una solución a la problemática dentro del marco de la acústica. Sin embargo, en los incidentes en cruces peatonales ferroviarios influyen factores tanto sociales y culturales como de diseño de ingeniería civil y estudio del comportamiento humano.

Para el grupo de variables frecuenciales, se comprobó que a menor atenuación de armónicos mayor es la urgencia percibida y en menor medida, a mayor entonación F , mayor es la urgencia percibida. La contribución de la atenuación de armónicos en la urgencia percibida es significativamente mayor que la de la entonación, por lo tanto, variar c resulta más efectivo para modificar la sensación de urgencia.

Además, segmentando los resultados del test A, se confirmó que para las variables frecuenciales la edad es un factor de influencia en la urgencia percibida de las alarmas. De este hallazgo se pueden abrir nuevas ramas de investigación a futuro. No obstante, esto no se observó para la prueba subjetiva de variables temporales.

Se verificó que, a mayor velocidad y menor tiempo de ataque, mayor resulta la urgencia percibida, corroborando las conclusiones de la literatura existente. La contribución de la velocidad en la urgencia percibida es significativamente mayor que la del tiempo de ataque, lo que indica que modificar el parámetro V resulta más efectivo para variar la sensación de urgencia.

También, se pudo comprobar una diferencia significativa de la urgencia percibida entre alarmas recomendadas en cruces ferroviarios. Esta diferencia, sobre todo con las variables temporales, que son las que más ponderación tienen sobre la urgencia percibida total [14], genera una discrepancia del mapeo de urgencia. Esta diferencia puede disminuir

aún más la percepción de urgencia [25] y a su vez, afectar el tiempo de reacción de los peatones [26,31].

Por último, a partir de las conclusiones obtenidas de los modelos, si se quiere generar una alarma que refleje una sensación de urgencia en los transeúntes acorde a la situación, se sugiere utilizar parámetros cercanos a $V = 220$ BPM, $TA = 5$ ms, $F = 1,5$ y $c = 1/2$. Con estos parámetros se obtiene un valor de escala de urgencia percibida frecuencial de 0,514 y un valor de escala de urgencia percibida temporal de 1,031.

9. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Si bien se ha logrado desarrollar dos modelos independientes para la predicción de urgencia, resulta fundamental comprender la interacción entre los parámetros temporales y frecuenciales. Una propuesta para investigaciones futuras sería estudiar cómo estos parámetros se relacionan, para poder generar un modelo de predicción de urgencia integrado.

No obstante, a partir de las conclusiones obtenidas, se abre la posibilidad de idear soluciones para los pasos a nivel en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). Con los modelos y conociendo la interacción entre parámetros temporales y frecuenciales, se puede diseñar una solución compatible con los sistemas de señalización actuales, que resulte eficaz y también escalable a futuro.

Por ejemplo, una opción podría ser agregar a las alarmas actuales una segunda alarma de carácter direccional y con los respectivos parámetros que permitan agudizar la reacción y urgencia de los peatones. Esta adición permitiría elevar el nivel de urgencia percibida, a la vez que reduciría el ruido ambiental para los vecinos [41,42], ya que estas alarmas secundarias podrían ser más direccionales, reduciendo la necesidad de alta intensidad en las alarmas principales. También se pueden pensar soluciones como alarmas dinámicas, que varíen sus parámetros según la necesidad de aumentar o disminuir la sensación de urgencia.

Respecto a las variables analizadas en el modelo de urgencia propuesto, existen aspectos relevantes que podrían ser objeto de estudio adicional, como la variación del nivel de la señal y su impacto en la percepción de urgencia, el tiempo de reacción asociado a esta percepción, así como la interacción entre las alarmas sonoras y visuales.

Además, se plantea la oportunidad de extender este estudio a otras áreas de interés, como las alarmas de cierre de puertas en transporte subterráneo y ferroviario, semáforos adaptados para personas con dificultades visuales, sistemas de alarmas en estacionamientos, entre otros.

Tanto este estudio como las investigaciones futuras mantienen un enfoque central en la mejora de la seguridad y la reducción de accidentes, utilizando el sonido y la acústica como herramientas principales para alcanzar estos objetivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] JST: Anuario estadístico 2022 – “Anuario estadístico 2022”. Tech. rep., Junta de Seguridad en el Transporte, Argentina (2022).
- [2] CNRT: Informe estadístico anual 2017 – “Red ferroviaria de pasajeros del área metropolitana de Buenos Aires”. Tech. rep., Ministerio de transporte, Argentina (2017).
- [3] Park, J.-T., Kang, P.-M., y Park, S.-H., Analysis of the characteristic of railroad (level-crossing) accident frequency, *Journal of the Korean Society of Safety* 29, 76–81 (2014).
- [4] Too many lives being lost at train crossings, visitado el 15/05/2022.
<https://www.bangkokpost.com/opinion/opinion/2002999/too-many-lives-being-lost-at-train-crossings>
- [5] Pratama, R. P. and Harso Supangkat, S., Smart Video Surveillance System For Level Crossing: A Systematic Literature Review, 2021 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS), 1–5 (2021).
- [6] European Union Agency for Railways (ERA). Rail accidents victims by type of accident and category of persons involved, Visitado el 15/05/2022.
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tran_sf_railvi/default/table?lang=en
- [7] IRAM 4036, Acústica. Definiciones, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina (1972).
- [8] Lathi, B. P., Green, R., Linear systems and signals, Oxford University press (2018).
- [9] Miyara F., Acústica y sistemas de sonido, UNR (2010).
- [10] Butler, J. P., y Mohler, J. G., Estimating a distribution's central moments: a specific tidal ventilation application, *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 46(1), 47–52 (1979).
- [11] ISO 1996-2:2017, Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of sound pressure levels, International Organization for Standardization, Ginebra (2017).
- [12] Cabrera, D., Jiménez, D., y Martens, W. L., Audio and Acoustical Response Analysis Environment (AARAE): a tool to support education and research in acoustics, In *Proceedings of Internoise*. Melbourne, Australia (2014).
- [13] Relationship Between Rise Time and Bandwidth for a Low-Pass System, visitado el 7/10/2022. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9817

- [14] Hellier, E. J., Edworthy, J., Loxley, S., y Dennis, P. I., Improving auditory warning design: quantifying and predicting the effects of different warning parameters on perceived urgency, *Human Factors* 35, 693–706 (1993).
- [15] Gulliksen, H., A least squares solution for paired comparisons with incomplete data, *Psychometrika*, 21(2), 125-134 (1956).
- [16] Kaiser, H. F., y Serlin, R. C., Contributions to the method of paired Comparisons, *Applied Psychological Measurement*, 2(3), 423-432 (1978).
- [17] Meredith, C., y Edworthy, J., Are there too many alarms in the intensive-care unit: An overview of the problems, *Journal of Advanced Nursing* 21, 15–20 (1995).
- [18] Marshall, E., y Baker, S., Alarms in nuclear power plant control rooms: Current approaches and future design. *Human factors in alarm design*, 183–191 (1994).
- [19] Woods, D., Cognitive demands and activities in dynamic fault management: Abductive reasoning and disturbance management, *Human factors in alarm design*, 63–92 (1994).
- [20] Boucek, G. P., Jr., Veitengruber, J. E., y Smith, W. D., Human factors guidelines for aircraft alerting systems: Aircraft alerting systems criteria study, U.S Department of Transportation. Vol. II (No. FAA-RD-76-222, II) (1977).
- [21] Patterson, R. D., Guidelines for auditory warning systems on civil aircraft, Civil aviation authority, Airworthiness division (1982).
- [22] Marshall, D. C., Lee, J. D., y Austria, P. A., Alerts for in-vehicle information systems: annoyance, urgency, and appropriateness, *Human Factors* 1, 145–57 (2007).
- [23] Nixon, C. W., Von Gierke, H. E., y Rosinger, G., Comparative annoyances of “approaching” versus “receding” sound sources, *Journal of the Acoustical Society of America*, 45, 843–853 (1969).
- [24] Edworthy, J., y Adams, A., *Warning design: A research perspective*, PA: Taylor & Francis. (1996).
- [25] Edworthy, J., Loxley, S., y Dennis, P. I., Improving auditory warning design: relationship between warning sound Parameters and Perceived Urgency, *Human Factors* 33, 205–231 (1991).
- [26] Haas, E. C., y Casali, J. G., Perceived urgency of and response time to multi-tone and frequency-modulated warning signals in broadband noise, *Ergonomics* 38, 2313–2326 (2007).

- [27] Michael, P., Single-number performance factors for hearing protectors, *Personal hearing protection in industry*, 221–274 (1982).
- [28] Johnson, D. L., y Nixon, C. W., Simplified methods for estimating hearing protection performance, *Sound and Vibration* 8, 20-27 (1974).
- [29] Bresin, R., y Battel, G. U., Articulation strategies in expressive piano performance. Analysis of legato, staccato, and repeated notes in performances of the Andante movement of Mozart's sonata in G major (K 545), *Journal of New Music Research*, 29(3), 211-224 (2000).
- [30] Hellier, E., y Edworthy, J., Quantifying the perceived urgency of auditory warnings, *Canadian Acoustics*, 17,3-11 (1989).
- [31] Suied, C., Susini, P., y Mcadams, S., Evaluating warning sound urgency with reaction times, 14(3), 201–212 (2008).
- [32] Rouch, J., y Parizet, E., Relation between perceived urgency of alarm signals and psychoacoustic parameters, 38, 2435–2439, *Proceedings of Forum Acusticum*, Lyon (2020).
- [33] Zwicker, E., y Fastl, H., *Psychoacoustics: facts and models*, 3era edición, Springer, Berlin (2007).
- [34] Haas, E. C., y Edworthy, J., Designing urgency into auditory warnings using pitch, speed and loudness, *Computing & Control Engineering Journal*, 7 (4), 193-198 (1996).
- [35] ISO/TC 7731, *Ergonomics. Danger signals for work places – Auditory danger signals*, International Organization for Standardization, Ginebra (1986).
- [36] Kaspierowicz, I., Urgencia percibida de las alarmas de cruces ferroviarios considerando los accidentes en pasos a nivel, VI Jornadas de Acústica, Audio y Sonido, Buenos Aires, Octubre (2022).
- [37] Ministerio de transporte., *Instalación de barreras semiautomáticas, paso a nivel Pueyrredón – San Martín - Señalamiento - Línea: Mitre, Rev 02*, Argentina (2021).
- [38] ISO 12913-1:2014, *Acoustics. Soundscape. Part 2: Data collection and reporting requirements*. International Organization for Standardization, Ginebra (2018).
- [39] Parizet, E., Paired comparison listening tests and circular error rates, *Acta Acustica united with Acustics*, 88, 594–598 (2002).
- [40] Lindquist, E., *Design and analysis of experiments in psychology and education*, Boston, MA: Houghton Mifflin (1953).

[41] Respuesta del GCBA por el funcionamiento de dos alarmas ferroviarias, visitado el 05/10/2023. https://defensoria.org.ar/archivo_noticias/respuesta-del-gcba-por-el-funcionamiento-de-dos-alarmas-ferroviarias/.

[42] Un reclamo vecinal que hace ruido, visitado el 05/10/2023. <https://lacomuna7.com.ar/un-reclamo-vecinal-que-hace-ruido/>.

ANEXO I. RESULTADOS PRELIMINARES.

Para poder dar con un test sólido y certero es muy importante realizar una prueba piloto con alrededor de 10 participantes. De esta forma, se puede verificar si la construcción del test subjetivo es correcta y se pueden ver las tendencias generales.

Resulta importante aclarar que todo el análisis a continuación es a partir de los valores observados sobre una muestra pequeña, los resultados pueden variar a medida que se expanda la cantidad de participantes. El objetivo principal de la presente sección es evaluar las alarmas utilizadas y el diseño del test.

a. TEST SUBJETIVO DE VARIABLES FRECUENCIALES (A)

Se tiene un total de 10 participantes de un rango etario que va desde 21 hasta 59 años, con variedad de auriculares (de tipo over-ear, in-ear y ear buds).

Se observan los errores circulares para las 18 triadas disponibles, también se calculan la cantidad de errores por triada y por participante. Por último, se calcula el valor de error circular *CER* por participante. La siguiente matriz de la Figura A1 ilustra dichas cantidades.

Triadas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Total
1-3-4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
1-3-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
1-4-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
1-4-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
1-5-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
1-8-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
2-3-6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
2-5-6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
2-5-7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
2-5-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	2
2-6-7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
2-7-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
3-4-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
3-6-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
4-7-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	3
4-8-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	4
5-6-7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
5-7-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	2
<i>d</i>	4	1	4	2	1	0	2	2	1	0	
<i>CER</i>	0.22	0.06	0.22	0.11	0.06	0.00	0.11	0.11	0.06	0.00	

Figura A1. Errores circulares (*d*) por triada y participantes de los resultados preliminares del test A.

Si bien los participantes poseen valores de la razón de error circular *CER* por debajo de 0,25, si se observan los errores por triada hay una que sobresale. El conjunto de señales 4-8-9 causa inconveniente entre los participantes del test. A partir de la Tabla 4 se puede deducir que esto ocurre para los valores de *F2-c1* contra *F3-c2* y *F3-c3*.

Comparar señales dentro de una misma categoría de frecuencia fundamental y evaluando solamente el parámetro de atenuación de armónicos puede resultar más difícil y dependiente del auricular que se esté utilizando, ya que el cambio no resulta tan brusco como al evaluar el pitch.

Para la obtención de los valores de escala globales se emplea el método de Gulliksen [26] y se utiliza como criterio de corte un valor de error menor al 0,01, esto se logra luego

de 14 iteraciones del método. Se adquieren los valores y se realiza un gráfico de barras segmentado según color (valor de pitch) y tipo de relleno (valor de atenuación de armónicos).

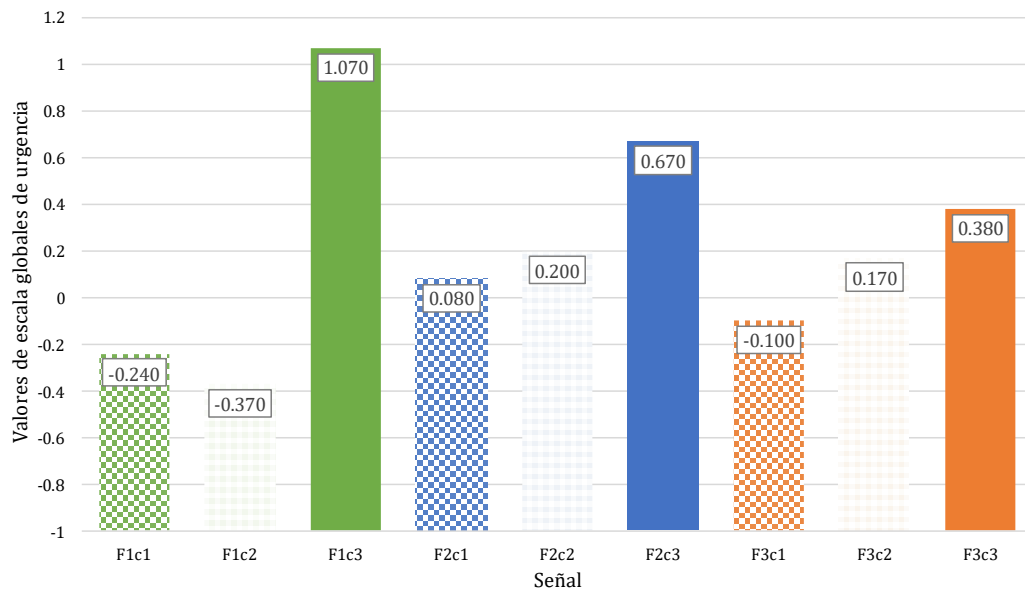


Figura A2. Valores globales de escala preliminares, segmentados por señal y agrupados por valor de pitch (color) y valor de atenuación de armónicos (relleno).

De la Figura A2 se pueden notar ciertas tendencias de los resultados:

1. La señal más elegida en términos de preferencia es la número tres.
2. Las tres señales más elegidas se corresponden con el valor de $c3$.
3. La preferencia se corresponde con los valores de atenuación de armónicos $c1$ - $c2$ - $c3$ excepto para el valor de $F1$.

Para el caso 1, dado que la mayoría de los participantes son del partido de General San Martín (por donde circula el tren que posee la alarma para la creación de la señal 1) el conocer dicha señal puede ser un factor de influencia en los resultados, a medida que se agrande la muestra y se expanda a otras localidades se observará si continua la tendencia.

b. TEST SUBJETIVO DE VARIABLES TEMPORALES (B)

Se tiene un total de 9 participantes de un rango etario que va desde 21 hasta 59 años, con variedad de auriculares (de tipo over-ear, in-ear y ear buds).

Se observan los errores circulares para las 18 triadas disponibles, también se calculan la cantidad de errores por triada y por participante. Por último, se calcula el valor de error circular por participante *CER*. La siguiente matriz de la Figura A3 ilustra dichas cantidades.

Triadas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Total
1-3-4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	2
1-3-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
1-4-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	3
1-4-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	2
1-5-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
1-8-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
2-3-6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
2-5-6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
2-5-7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
2-5-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
2-6-7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	2
2-7-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
3-4-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
3-6-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
4-7-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
4-8-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
5-6-7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0
5-7-9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1
<i>d</i>	2	1	3	7	1	1	0	1	1	
<i>CER</i>	0.11	0.06	0.17	0.39	0.06	0.06	0.00	0.06	0.06	

Figura A3. Errores circulares (*d*) por triada y participantes de los resultados preliminares del test B.

Aunque los valores de razón de error circular *CER* se encuentran por debajo de 0,2 se observa que un participante realiza una cantidad muy elevada de errores. Es por esto que el participante número 4 será excluido para realizar los valores globales de escala. Por otro lado, no se observan errores sobresalientes respecto a las triadas de señales. En comparación a la Figura A1 del test A, las señales del test de variables temporales de la Figura A3 puede que sean más fáciles de distinguir y comparar.

Para la obtención de los valores de escala globales se emplea el método de Gulliksen [26] y se utiliza como criterio de corte un valor de error menor al 0,05, esto se logra luego de 8 iteraciones del método. Se adquieren los valores y se realiza un gráfico de barras segmentado según color (valor de velocidad) y tipo de relleno (valor de tiempo de ataque).

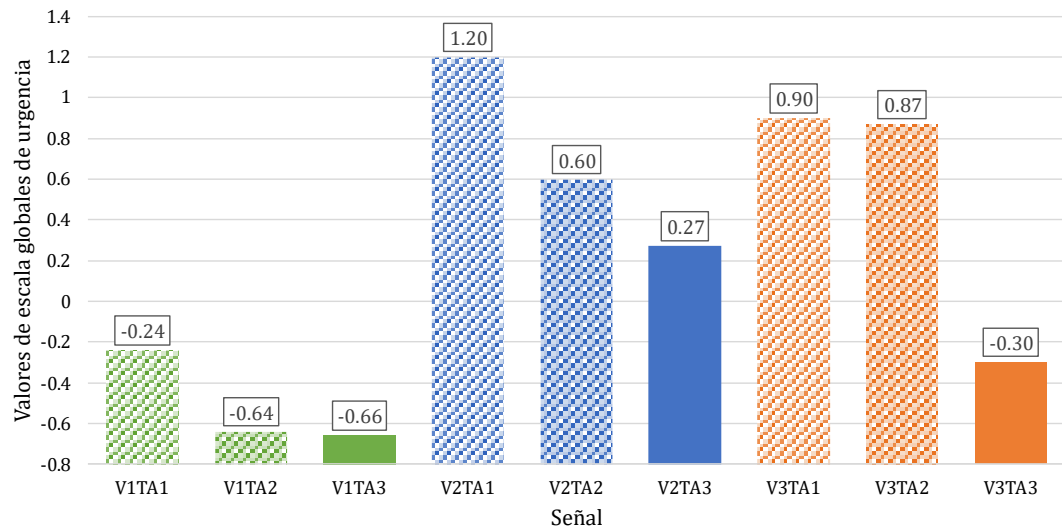


Figura A4. Valores globales de escala preliminares, segmentados por señal y agrupados por valor de pitch (color) y valor de atenuación de armónicos (relleno).

De la Figura A4 se pueden notar ciertas tendencias de los resultados:

1. La señal más preferida es la señal 4, seguidas de la señal 7 y 8.
2. El grupo de señales menos preferidas se corresponden con el valor V1.
3. La preferencia se corresponde con los valores de TA1-TA2-TA3.

Del caso 1 se puede ver un resultado muy similar para las alarmas 7 y 8, esto puede suceder debido a que a medida que se aumenta el valor de velocidad hasta 220 BPM (V3) es más difícil distinguir entre un tiempo de ataque de 5 ms (TA1) y 50 ms (TA2). La tendencia número 2 se corresponde con las conclusiones de los estudios previos desarrollados en la sección del estado del arte.

Ambos test subjetivos presentan un diseño correcto y conclusiones interesantes, por lo que se continúa obteniendo muestras para el test de comparación hasta llegar al valor la cantidad mínima establecida.