

TRABAJO FIN DE MASTER

# EVALUACIÓN DEL IMPACTO ACÚSTICO DEL CIRCUITO DE FÓRMULA 1 EN IFEMA MEDIANTE TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
PARA LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MÁSTER EN  
INGENIERÍA AMBIENTAL

FEBRERO 2026

**Iván Ruiz Coello**

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

**Ignacio Pavón**

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	4
1.1.	Contexto y motivación del estudio .....	4
1.2.	Objetivos del trabajo .....	5
1.3.	Desafíos de la evaluación de un evento futuro de automovilismo .....	5
1.4.	Justificación y relevancia del estudio .....	6
2.	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.	Gestión y evaluación de impactos .....	7
2.2.	Teoría sobre el ruido y salud .....	10
2.3.	Normativas y regulaciones .....	15
2.4.	Modelos de simulación y análisis de datos .....	16
3.	METODOLOGÍA.....	20
3.1.	Descripción del entorno: IFEMA y zonas aledañas .....	20
3.2.	Especificaciones del modelo acústico.....	22
3.3.	Creación de un Modelo Digital del Terreno .....	24
3.4.	Análisis y adquisición de datos de tráfico.....	27
3.5.	Clasificación por tipología .....	33
3.6.	Estimación de las emisiones acústicas de un Fórmula 1 .....	37
3.7.	Análisis sociodemográfico .....	43
3.8.	Áreas OCA.....	47
3.9.	Pantallas acústicas.....	48
4.	RESULTADOS .....	51
4.1.	Mapas de ruido .....	51
4.2.	Comparación con límites normativos .....	56
4.3.	Comparación de escenarios.....	60
4.4.	Población expuesta.....	62
4.5.	Estrategias de mitigación .....	66
5.	CONCLUSIONES.....	72
6.	OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	74
7.	PLANIFICACIÓN.....	75
8.	PRESUPUESTO.....	76
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	77
10.	ANEXOS.....	81

## Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Fórmula 1 en las calles de Madrid. (Browne, 2023) .....	4
Ilustración 2. Onda Sonora (Vega, 2020). .....	10
Ilustración 3. Motor V6 Turbo Híbridos. (Isaac, 2015) .....	11
Ilustración 4. Procedimiento para la evaluación del impacto acústico en el entorno urbano. ....	19
Ilustración 5. Localización del distrito de Barajas. ....	20
Ilustración 6. Barrios que integran el área de estudio. ....	20
Ilustración 7. Área de estudio y circuito de F1. ....	21
Ilustración 8. Zona de recorte de las carreteras de la BTN al área de estudio. ....	24
Ilustración 9. MDT del área de estudio. ....	25
Ilustración 10. Simplificación de entramado viario. ....	26
Ilustración 11. Líneas de autobús en el entorno del IFEMA .....	31
Ilustración 12. Árbol de clasificación de vías. ....	34
Ilustración 13. Elección de glorietas representativas. ....	35
Ilustración 14. Clasificación final del entramado viario. ....	36
Ilustración 15. Distribución de posiciones de medición en circuito. (Dolder et al., 2013) .....	38
Ilustración 16. Ubicación de las zonas de medición del artículo de Xu et al., (2024). ....	39
Ilustración 17. Foto callejera de los puntos de medición. ....	40
Ilustración 18. Foto aérea de los puntos de medición. ....	40
Ilustración 19. Distribución de la población por secciones censales. ....	46
Ilustración 20. Zonificación acústica correspondiente al área de estudio. ....	47
Ilustración 21. Localización de las pantallas acústicas existentes. ....	49
Ilustración 22. Diseño de la pantalla acústica de la M-40 en CadnaA. ....	50
Ilustración 23. Diseño de la pantalla acústica de la M-11 en CadnaA. ....	50
Ilustración 24. Mapa de ruido Periodo Diurno sin operatividad del circuito. ....	52
Ilustración 25. Mapa de ruido Periodo Diurno con operatividad del circuito. ....	53
Ilustración 26. Mapa de ruido Periodo de Carrera sin operatividad del circuito). ....	54
Ilustración 27. Mapa de ruido Periodo de Carrera con operatividad del circuito. ....	55
Ilustración 28. Mapa de áreas de superación del VLI para el Periodo Diario. ....	57
Ilustración 29. Mapa de áreas de superación del VLI para el Periodo de Carrera. ....	59
Ilustración 30. Mapa de variación de los niveles sonoros. ....	61
Ilustración 31. Procedimiento de cálculo de niveles registrados en fachada. ....	63
Ilustración 32. Representación 3D de la exposición acústica en fachadas de la calle Silvano durante el periodo diario con el circuito operativo. ....	63
Ilustración 33. propuesta de emplazamiento de nuevas pantallas acústicas. ....	66
Ilustración 34. Mapa de ruido Periodo Diurno con operatividad del circuito y pantallas acústicas. .	68
Ilustración 35. Mapa de ruido Periodo Carrera con operatividad del circuito y pantallas acústicas. 69	

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Contexto y motivación del estudio

Los circuitos urbanos de Fórmula 1 representan un desafío significativo en términos de planificación y sostenibilidad dentro del entorno metropolitano. A diferencia de los trazados permanentes que, por lo general, se emplazan en la periferia de las ciudades, estos circuitos se desarrollan dentro del tejido urbano de grandes metrópolis, lo que implica una adaptación del espacio existente para albergar un evento de gran escala, con repercusiones tanto logísticas como ambientales. En este contexto, la ciudad de Madrid ha anunciado la incorporación de un nuevo Gran Premio de España a partir de 2026, con un trazado ubicado en las inmediaciones de IFEMA bajo el nombre de "MADRING". (MADRING., s. f.)

La confirmación del circuito urbano de Fórmula 1 en Madrid ha generado un amplio debate en el ámbito social, económico y ambiental. Si bien el evento representa una oportunidad estratégica para la ciudad, al impulsar el turismo, la inversión y la proyección internacional de Madrid, también plantea interrogantes relacionados con la repercusión sobre el entorno urbano. Los automóviles de estas competiciones pueden tener un enorme impacto ambiental dadas sus características de funcionamiento. Son monoplasas que tienen una gran cantidad de emisiones debido a su diseño y combustible empleado (Oliva Gómez, 2024); sin embargo, no solo generan contaminación ligada a la emisión de gases de efecto invernadero, sino que también tienen un notable impacto acústico. El ruido producido puede afectar significativamente a la calidad de vida de los residentes, la actividad empresarial y el ecosistema urbano en general. La falta de estudios previos específicos sobre el impacto acústico del circuito ha dado lugar a una controversia pública, con posturas favorables centradas en los beneficios económicos y opiniones críticas que advierten sobre las posibles afecciones medioambientales y sociales (Rodríguez, 2025).

*Ilustración 1. Fórmula 1 en las calles de Madrid. (Browne, 2023)*



En este contexto, resulta fundamental realizar un análisis riguroso que permita cuantificar y caracterizar el impacto acústico del Gran Premio sobre su entorno, proporcionando evidencia científica para la toma de decisiones y el diseño de medidas de mitigación. Este estudio tiene como finalidad aportar datos objetivos y verificables que permitan anticipar las implicaciones del Gran Premio de Fórmula 1 en Madrid, garantizando el cumplimiento del marco jurídico establecido por la Ley 37/2003 del Ruido y el Real Decreto 1367/2007 que desarrolla dicha ley. Mediante la integración de modelización predictiva y análisis sociodemográfico, este trabajo se constituye como un instrumento técnico capaz de aportar una base científica para favorecer una gestión sostenible del evento en términos de impacto acústico y bienestar ciudadano.

## 1.2. Objetivos del trabajo

El principal objetivo de este trabajo es evaluar el impacto acústico que podría generar la celebración del Gran Premio de Fórmula 1 en el circuito urbano de MADRING en Madrid, que está previsto para el año 2026. Para ello, se utilizarán técnicas de modelización acústica con el fin de prever los niveles de ruido en el entorno urbano circundante al circuito.

En primer lugar, se busca cuantificar las emisiones acústicas generadas por los monoplazas de Fórmula 1 durante el evento, tomando como base datos existentes sobre emisiones acústicas en circuitos urbanos similares y las características técnicas de los vehículos. Esta cuantificación es esencial para establecer un punto de partida en el análisis de los niveles de ruido potenciales. Una vez obtenidos dichos valores, el trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo predictivo del impacto acústico en el área de influencia del circuito, utilizando herramientas de modelización espacial como ArcGIS Pro y CadnaA. El modelo permitirá generar representaciones precisas de cómo se distribuirán los niveles de ruido en la zona, lo que facilitará la identificación de áreas potencialmente afectadas.

Un aspecto fundamental del estudio consistirá en la evaluación de la población expuesta a niveles de ruido que podrían superar los umbrales establecidos por la normativa, identificando las zonas residenciales y comerciales cercanas al trazado del circuito. De este modo, se determinará el alcance del impacto acústico sobre los residentes y otros grupos vulnerables.

Además, se llevará a cabo un análisis detallado para verificar la conformidad con la normativa acústica vigente en la ciudad de Madrid por medio de indicadores de ruido. A tenor de los resultados obtenidos, se propondrán medidas de mitigación para reducir el impacto acústico, siguiendo las mejores prácticas de gestión acústica aplicables para un evento de estas características.

## 1.3. Desafíos de la evaluación de un evento futuro de automovilismo

La evaluación del impacto acústico de un evento que aún no se ha celebrado implica una serie de limitaciones técnicas derivadas, principalmente, de la falta de datos empíricos. En este caso concreto, la planificación del Gran Premio de Fórmula 1 en Madrid presenta incertidumbres sustanciales tanto en el diseño definitivo del trazado como en las características operativas del evento, lo que condiciona la precisión del análisis acústico.

Un primer obstáculo relevante es la limitada disponibilidad de información técnica específica sobre las fuentes emisoras. La industria de la Fórmula 1 se caracteriza por un alto grado de confidencialidad, lo que restringe el acceso a datos acústicos precisos sobre los monoplazas actuales, como sus niveles de presión sonora en distintas condiciones de funcionamiento, curvas de frecuencia o patrones de directividad. Esta falta de transparencia impide emplear valores empíricos directamente medidos sobre el modelo de vehículo previsto para la temporada 2026. Ante esta limitación, se ha optado por recurrir a estimaciones basadas en información técnica publicada en estudios previos de circuitos urbanos, así como en literatura especializada sobre acústica del automóvil de alto rendimiento. Cabe destacar que existe otro factor limitante ligado a estos estudios previos; el cambio de motor que tuvo lugar en 2014 reduce en gran medida el número de estudios precedentes útiles para el análisis, ya que las emisiones acústicas actuales no son las mismas que las previas a dicho año, sino que son notablemente inferiores.

Adicionalmente, el trazado del circuito y su entorno urbano inmediato no se encuentran completamente definidos. Variables como la ubicación exacta de las infraestructuras auxiliares, la configuración definitiva de las gradas, el flujo de público y la planificación de actividades complementarias suponen factores de incertidumbre que afectan a la modelización. Por ello, el estudio se ha desarrollado sobre un escenario de referencia aproximado, sujeto a revisión en función de futuras actualizaciones oficiales.

Por último, cabe destacar que el enfoque del presente trabajo se centra exclusivamente en la modelización del ruido generado por los monoplazas durante las sesiones oficiales de competición, al tratarse de la fuente emisora dominante. Otras fuentes de ruido asociadas al evento (logística, público, actividades paralelas) quedan fuera del alcance del análisis, aunque se reconocen como relevantes en un estudio integral del impacto acústico.

### 1.4. Justificación y relevancia del estudio

El circuito urbano MADRING se desarrollará en un entorno urbanizado, próximo a zonas residenciales, comerciales y equipamientos públicos. La proximidad de fuentes emisoras de alto nivel sonoro a estas áreas plantea un riesgo potencial de superación de los umbrales acústicos establecidos en la normativa vigente en materia de ruido ambiental, como la Ley 37/2003, del Ruido, y la Directiva 2002/49/CE relativa a la evaluación y gestión del ruido ambiental. La experiencia reciente en la Comunidad de Madrid con el Circuito del Jarama evidencia la complejidad de compatibilizar este tipo de actividades con el entorno urbano. Dicho trazado, inaugurado en 1967 y actualmente rodeado por zonas residenciales, ha sido objeto de diversos procedimientos administrativos y judiciales por superar los niveles sonoros permitidos y por deficiencias en su licencia ambiental (Juristas-Ruidos, 2024; El Economista, 2024; El País, 2025).

A pesar de la magnitud del evento, la resolución del Informe de Impacto Ambiental (Comunidad de Madrid, 2024) relativa al circuito de carreras de Fórmula 1 en Madrid, ha determinado que el proyecto se someta únicamente a un procedimiento simplificado, eludiendo la Evaluación de Impacto Ambiental Ordinaria y su correspondiente Declaración de Impacto Ambiental (DIA). No obstante, esta decisión posee un carácter condicionado: la viabilidad del trámite simplificado depende exclusivamente de que el Ayuntamiento de Madrid autorice la suspensión de los índices de calidad acústica, amparándose en el Art. 9 de la Ley 37/2003. Esta resolución admite de forma explícita que, sin dicha exención legal, los niveles de ruido previstos (que el propio informe oficial sitúa por encima de los 80 dB) en áreas residenciales críticas como Valdefuentes, Canillas o La Piovera, obligarían a un proceso de evaluación mucho más riguroso y participativo.

Frente a esta situación, en la que la administración reconoce un impacto acústico significativo, el citado Informe de Impacto Ambiental alude a un estudio acústico del promotor. Sin embargo, al tratarse de un procedimiento simplificado, los documentos no están obligados a ser públicos en su totalidad, limitando el conocimiento del ciudadano a la breve información que aporta la resolución (Comunidad de Madrid, 2024, pp. 12-13). Ante este escenario de limitada transparencia, el presente estudio se constituye como un informe técnico independiente con el fin de exponer al detalle las afecciones reales y los motivos técnicos que obligarían al evento a someterse a una EIA Ordinaria en caso de no producirse la suspensión de los índices de calidad acústica. De este modo, la investigación aporta la profundidad técnica ausente en el expediente público proporcionando el rigor necesario para cuantificar el impacto sobre la población y verificar la suficiencia de las medidas de mitigación proyectadas.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Gestión y evaluación de impactos

#### Concepto general

La celebración de un evento automovilístico de gran magnitud en el recinto ferial de IFEMA, Madrid, supone una fuente potencialmente significativa de impactos acústicos sobre el entorno urbano. El carácter temporal del circuito, su proximidad a zonas residenciales y la elevada afluencia de público y vehículos convierten la gestión del ruido en uno de los principales retos ambientales del proyecto.

Si bien el evento genera efectos de diversa naturaleza (emisiones, tráfico o residuos), todos ellos presentan una relación directa o indirecta con la variable acústica. El tráfico intensivo incrementa la exposición al ruido viario, las emisiones de motores se asocian al funcionamiento de los vehículos en distintas fases del evento y la disposición espacial de infraestructuras y espectadores condiciona la propagación sonora.

Entre los impactos más relevantes destacan:

- **Ruido:** los monoplazas alcanzan niveles sonoros superiores a 110 dB a corta distancia. Este nivel de presión acústica, sumado al ruido procedente de helicópteros, megafonía o público, puede superar ampliamente los límites establecidos por la normativa en entornos urbanos, tal como se analiza en el apartado 2.3.
- **Tráfico y congestión:** el aumento de flujo vehicular genera una fuente acústica adicional continua, especialmente durante el acceso y la evacuación del recinto. Por el contrario, mientras se lleve a cabo la carrera, todas las vías próximas apenas tendrán tráfico.
- **Infraestructura temporal:** la instalación de gradas, vallas y estructuras metálicas puede modificar la reflexión y propagación del sonido, afectando a los patrones de distribución del ruido.
- **Actividades auxiliares:** ensayos, mantenimiento y transporte logístico contribuyen al nivel sonoro global, incluso fuera de los horarios de carrera.

En conjunto, estos factores evidencian la necesidad de realizar una evaluación acústica previa que permita anticipar la magnitud y distribución espacial del ruido, establecer medidas de mitigación efectivas y garantizar la compatibilidad del evento con la calidad de vida de la población del entorno.

#### Tipos de impactos: directos e indirectos.

Los impactos acústicos derivados de un evento de gran magnitud pueden clasificarse en directos e indirectos, según su origen y la forma en que afectan al entorno y a la población. Esta distinción resulta esencial para diseñar estrategias de mitigación eficaces, especialmente en un entorno urbano complejo como el de IFEMA, donde los niveles sonoros y su propagación están condicionados por la morfología urbana y la presencia de actividades sensibles.

### **Impactos directos**

Los impactos directos son aquellos que se producen de forma inmediata durante el desarrollo del evento y que se relacionan directamente con las fuentes de ruido principales. Entre los más relevantes destacan:

- Ruido generado por los monoplazas y vehículos de apoyo, que constituye la fuente sonora predominante y puede alcanzar niveles superiores a los 110 dB en pista. Este impacto afecta tanto al interior del recinto como a las zonas colindantes, dependiendo de las condiciones de propagación acústica.
- Emisiones acústicas de maquinaria auxiliar y operaciones logísticas, incluyendo grúas, generadores, transporte técnico y pruebas previas, que contribuyen a elevar el nivel sonoro global incluso fuera del horario de competición.
- Instalación de infraestructuras temporales, como gradas, pantallas o vallados, que alteran la reflexión y absorción del sonido, modificando la distribución espacial del ruido.
- Tráfico interno y externo asociado al evento, cuya presencia constante durante los días previos y posteriores al mismo añade una fuente continua de ruido rodado en el entorno inmediato.

### **Impactos indirectos**

Los impactos indirectos se manifiestan fuera del espacio o del tiempo inmediato del evento, y suelen derivarse de la interacción entre el ruido, la movilidad y la dinámica urbana. Entre ellos destacan:

- Incremento del tráfico en vías adyacentes, que genera ruido viario adicional, especialmente durante las fases de acceso y evacuación del público.
- Exposición poblacional prolongada al ruido ambiental, que puede afectar al bienestar y la calidad de vida de los residentes y trabajadores cercanos a IFEMA.
- Perturbaciones en entornos sensibles, como centros educativos, hospitales o espacios naturales próximos, donde el aumento de los niveles acústicos puede superar los límites establecidos por la normativa.
- Percepción social del ruido, un impacto indirecto que se traduce en quejas vecinales o en una valoración negativa del evento si no se comunican adecuadamente las medidas de control y mitigación.

En este contexto, la evaluación acústica previa adquiere un papel fundamental para identificar la magnitud y el alcance de estos impactos. La simulación y el modelado digital permiten anticipar los niveles de presión sonora en distintos puntos del entorno urbano, optimizar el diseño del trazado y de las zonas de público, y aplicar medidas preventivas como pantallas acústicas o limitaciones horarias. De este modo, la gestión del ruido se convierte en el eje central de la planificación ambiental, garantizando la compatibilidad del evento con la calidad acústica del entorno y la aceptación social del proyecto.

## Antecedentes de evaluación en eventos de motor

La historia del Circuito del Jarama (San Sebastián de los Reyes, Madrid) representa un caso de referencia para el análisis acústico de eventos de motor en entornos urbanos densamente poblados. En la sentencia 233/2024, de 8 de julio, dictada por el Juzgado Central de lo Contencioso-Administrativo n.º 11, se declaró nula la licencia de actividad del circuito, que había sido otorgada por silencio administrativo positivo, al no haberse evaluado adecuadamente las repercusiones acústicas sobre la población local. En dicha resolución se alude a mediciones vecinales que registraron valores entre 70 y 97 dBA en zonas residenciales próximas, superando los límites legalmente permitidos (Juristas Contra el Ruido, 2025). Este precedente evidencia la necesidad de incorporar la evaluación acústica como elemento central de la planificación ambiental de cualquier evento de motor, garantizando la compatibilidad entre la actividad y el entorno urbano.

La experiencia histórica en torno al Circuito del Jarama y otros recintos de motor próximos a áreas urbanizadas ofrece un marco de referencia directo para evaluar los riesgos acústicos del trazado propuesto en IFEMA. En el Jarama, la convivencia prolongada con urbanizaciones cercanas ha derivado en conflictos judiciales y administrativos centrados en el exceso de ruido y en la insuficiente valoración de sus efectos sobre la salud y el bienestar de los residentes. Estas decisiones judiciales resultan especialmente relevantes para la planificación acústica, pues demuestran la importancia de realizar estudios predictivos rigurosos, definir límites operativos claros y establecer protocolos de control que eviten impactos inadmisibles.

El propio reglamento operativo del Jarama establece límites acústicos explícitos para distintos tipos de jornadas: alrededor de 90 dB(A) para sesiones estándar y hasta 112 dB(A) en jornadas no silenciosas (Circuito del Jarama, 2019). Esta diferenciación refleja cómo la gestión interna del ruido condiciona la admisión de vehículos, el calendario de actividades y el cumplimiento normativo. La existencia de estos umbrales, y la controversia en su ejecución, constituye un antecedente técnico útil para la planificación del modelo acústico propuesto en el recinto ferial, donde deberán considerarse escenarios de emisión, horarios de funcionamiento y medidas de mitigación (pantallas, disposición de gradas, control del tráfico auxiliar).

En los últimos años, los litigios e investigaciones por ruido en el Jarama han adquirido relevancia nacional, con actuaciones de la Fiscalía por posibles delitos medioambientales y sentencias que anulan licencias otorgadas sin evaluación adecuada. Estas experiencias ofrecen dos lecciones prácticas (Economist & Jurist, 2025; El País, 2025; ElDiario.es, 2024):

- La evaluación acústica de eventos de motor debe ser técnicamente sólida y jurídicamente trazable.
- La planificación debe integrar medidas preventivas verificables, como la limitación de fuentes emisoras, la optimización del trazado y la gestión del horario de las pruebas.

Por último, las experiencias internacionales en circuitos europeos como Silverstone (Reino Unido), Monza (Italia) o Paul Ricard (Francia), demuestran la utilidad de combinar modelos de propagación basados en la norma ISO 9613, mapas de exposición poblacional y medidas estructurales de mitigación acústica (pantallas, rediseño de tribunas, limitación de acceso a vehículos más ruidosos). Estos antecedentes permiten contextualizar la metodología propuesta para el presente estudio y justifican las decisiones técnicas adoptadas en la modelización del impacto sonoro del evento.

## 2.2. Teoría sobre el ruido y salud

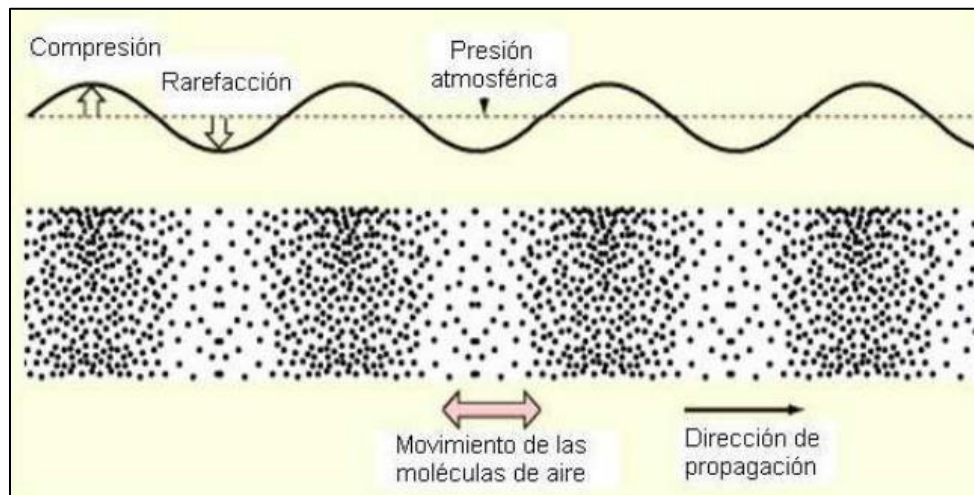
### Definición y características

El ruido, propiamente dicho, es considerado como la “contaminación acústica” que tiene lugar en un entorno debido a una fuente sonora. Sin embargo, a pesar de la gran diversidad de definiciones que se puedan atribuir al término de contaminación, este trabajo se apoyará en la definición enunciada por Albert (1997), quien designa como contaminación a la *“introducción o presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes o sustratos a los que no pertenecen o en cantidades superiores a las propias de dichos sustratos, por un tiempo suficiente y bajo condiciones tales que sean capaces de interferir con la salud y la comodidad de las personas, dañar los recursos naturales o alterar el equilibrio ecológico de la zona.”*

En este contexto, es importante establecer una distinción entre sonido y ruido, ya que, aunque ambos comparten una misma naturaleza física —vibraciones que se propagan a través de un medio—, difieren sustancialmente en su percepción y en sus efectos.

El sonido es una onda mecánica que se transmite a través de un medio material, como el aire, el agua o los sólidos, y que puede ser percibida por el oído humano (Vér et al., 2005). Desde una perspectiva objetiva, se trata simplemente de una fluctuación de presión (compresión-rarefacción) a lo largo del tiempo que está motivada por una perturbación, tal y como refleja la Ilustración 2. Sin embargo, cuando se introduce la percepción humana, el sonido puede adquirir un valor informativo, estético o funcional. Así, sonidos como la música, una conversación o el canto de un ave pueden ser considerados agradables o útiles, y no se asocian con molestias o efectos negativos.

Ilustración 2. Onda Sonora (Vega, 2020).



Dentro de las características del sonido, como refleja Vega (2020), la propia frecuencia de las ondas sonoras generadas establece una clasificación conforme al rango audible o cercano a éste:

- **Infrasonidos:** Son ondas con frecuencias inferiores a los 15 Hz. Están por debajo del umbral auditivo humano, pero animales como los elefantes los utilizan para comunicarse.
- **Sonido audible:** Corresponde al rango comprendido entre los 15 Hz y los 20.000 Hz, que es el que puede detectar el oído humano. Este rango varía según la edad y el estado del

sistema auditivo; por ejemplo, los niños pueden percibir frecuencias más altas que los adultos mayores.

- **Ultrasonidos:** Se trata de frecuencias superiores a los 20.000 Hz. No son audibles para las personas, pero sí para especies como los murciélagos o los delfines, que los emplean en sus sistemas de ecolocalización.

La propagación del sonido se produce mediante procesos sucesivos de compresión y rarefacción del medio. La velocidad del sonido puede variar notablemente en función del medio en que se produzca dicha propagación (Tabla 1), ya que depende de sus propiedades físicas. Entre los factores más relevantes se encuentran la densidad del material, la temperatura e incluso la humedad del medio.

Medio de propagación	Velocidad del sonido (m/s)
<b>Caucho</b>	54
<b>Aire</b>	344
<b>Agua</b>	1483
<b>Acero</b>	5060

Tabla 1. Variación de la velocidad de propagación del sonido en distintos medios. (Vega, 2020)

Por otro lado, se entiende como ruido aquel sonido que resulta no deseado, molesto o incluso perjudicial para quien lo percibe (Basner et al., 2014). Esta valoración no es absoluta, sino que depende de diversos factores como el contexto, la intensidad, la frecuencia, la duración del estímulo, así como de la sensibilidad individual. De este modo, se puede esclarecer que el ruido no deja de ser una forma de sonido, pero con una connotación negativa en función de cómo sea percibido. Por ejemplo, el rugido de un motor de Fórmula 1 puede generar entusiasmo en el público de un circuito, mientras que para los residentes de una zona urbana cercana al evento puede suponer una fuente clara de molestia. En términos de frecuencia, los Fórmula 1 utilizan los motores V6 actuales, que pueden llegar a operar a 15.000 rpm (Serrano Aparicio, 2022) emitiendo 750 Hz.

En consecuencia, el ruido trasciende su naturaleza física para convertirse en un problema ambiental y de salud pública, especialmente cuando se produce de forma continua o a niveles elevados. Su impacto puede afectar al bienestar humano, al equilibrio del entorno e incluso a la calidad de vida (Jarosińska et al., 2018).

## Fuentes de ruido en eventos de Fórmula 1

En los eventos deportivos de motor como la Fórmula 1, el ruido es una de las características más representativas, pero también una de las más problemáticas desde el punto de vista ambiental y urbano. Las fuentes de emisión sonora son variadas, y los niveles alcanzados pueden superar con creces los umbrales considerados seguros para la salud humana.

Las principales fuentes de ruido en un Gran Premio de Fórmula 1 incluyen:

- **Motores de los monoplazas:** Desde 2014, los monoplazas usan motores híbridos V6 turbo, que han reducido notablemente el ruido respecto a los V8. Aun así, alcanzan niveles de hasta 110 dB, valores que fueron medidos durante la pretemporada de 2017 en Montmeló por Ferrari y Mercedes (Alvarez, 2017), mientras que Renault y Honda rondaban los 104–105 dB (TheBestF1, 2017). El motor es sin duda la principal fuente de



Ilustración 3. Motor V6 Turbo Híbridos. (Isaac, 2015)

ruido debido en gran medida al alto régimen de revoluciones en que estos operan, pudiendo llegar al 15.000 rpm en los casos más extremos (Serrano Aparicio, 2022). Sin embargo, estos motores, por lo general, carecen de silenciadores ya que el principal objetivo de los mismos es maximizar el flujo de aire y obtener la mayor eficiencia energética posible.

- **Fricción neumático-asfalto:** La interacción entre los neumáticos y el pavimento genera un ruido constante, especialmente en frenadas o curvas. En vehículos convencionales, se han registrado niveles de hasta 96,8 dBA a 80 km/h sobre asfalto estándar, y próximos a 93.7 dBA para un asfalto poroso (Morcillo et al., 2008). Teniendo en cuenta que los Fórmula 1 alcanzan velocidades mucho mayores y utilizan neumáticos con gran adherencia, es razonable estimar que esta fricción juegue un papel importante, aunque con mucha menor repercusión acústica que el propio motor.
- **Ruido ambiental del evento:** Otras fuentes incluyen la megafonía o actuaciones musicales complementarias, en donde determinados estudios muestran que conciertos de este tipo y su sistema acústico asociado pueden abarcar desde los 85 a los 100 dB(A) (Rubio Infante, 2015). A su vez, el público, especialmente durante momentos clave de la carrera, puede generar niveles de ruido que oscilan entre 80 y 95 dB, según estudios realizados en eventos de gran envergadura como partidos de la NFL (Zamfir et al., 2013) e incluso llegar a un nivel promedio de exposición al ruido de 100,5 LAeq (dBA) como sucedió en un partido de fútbol en la liga inglesa (Swanepoel y Hall, 2010).

Además, la presencia inevitable de los helicópteros de retransmisión, por ejemplo, modelos como los Airbus AS350 registran niveles entre 84 y 94 dB según datos oficiales de la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA, 2022).

### Efectos del ruido sobre la salud

Numerosos estudios han evidenciado que la exposición prolongada a niveles elevados de ruido no solo genera molestias, sino que puede derivar en consecuencias fisiológicas y psicológicas relevantes (Ruiz Casal, 1997; Gómez, 2011; Jiménez et al., 2015).

Entre los efectos más comunes se encuentran el estrés, la alteración del sueño, la disminución del rendimiento cognitivo (especialmente en niños), e incluso riesgos cardiovasculares como hipertensión o enfermedades coronarias (Babisch, 2011). Las personas expuestas de manera continua a altos niveles de ruido pueden experimentar insomnio y aumento de la agresividad, lo que afecta no solo su bienestar físico, sino también su desempeño mental y sus relaciones sociales.

En base a investigaciones llevadas a cabo por organismos como el Servicio de Comunidades y Vecindarios de la Ciudad de Toronto (Fong y Johnston, 2000) y expertos como Berglund (1998) y Babisch (2011), se han identificado múltiples efectos negativos que la exposición prolongada al ruido puede tener sobre la salud humana. Estos efectos incluyen:

## A. Deterioro auditivo

- **Pérdida o trastorno:** La exposición prolongada a niveles elevados de ruido puede generar pérdidas auditivas progresivas. Se considera que niveles continuos de hasta 75 dBA no generan daño irreversible, pero exposiciones de 85 dBA durante largos periodos de tiempo sí pueden provocar una pérdida permanente con el paso del tiempo.
- **Hipoacusia:** La hipoacusia es la disminución de la capacidad auditiva, que puede afectar a uno o ambos oídos. Puede ser parcial o total, permanente y acumulativa. En el caso específico de la hipoacusia inducida por ruido (HIR), esta es una forma de hipoacusia sensorio-neural que se desarrolla gradualmente como consecuencia de la exposición prolongada a niveles altos de ruido mayores de 85 dB SPL (Hernández Sánchez y Gutiérrez Carrera, 2006). Según la Sociedad Española de Médicos de Atención Primaria (SEMERGEN), se establecen diferentes grados de hipoacusia reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 2. Grado de hipoacusia y capacidad auditiva (Morales Escobar y Gómez Gabaldon, 2024).

Pérdida de Audición (dB)	Frecuencia (Hz)						Capacidad auditiva
	125	250	500	1000	2000	4000	
10	<b>Audición normal</b>						Se pueden oír sonidos suaves por encima de 20 dB.
20							
30	<b>Hipoacusia leve</b>						Entre 20 y 40 dB en el mejor oído. Cuesta entender en entornos ruidosos
40							
50	<b>Hipoacusia moderada</b>						Entre 40 y 70 dB en el mejor oído. Cuesta entender en entornos ruidosos
60							
70							
80	<b>Hipoacusia severa</b>						Entre 70 y 90 dB en el mejor oído. Hay necesidad de prótesis auditivas o de un implante coclear
90							
100	<b>Hipoacusia profunda</b>						Por encima de los 90 dB. No se perciben sonidos
110							
120							

## B. Perturbación del sueño

- I. **Insomnio:** El ruido reduce la calidad y duración del sueño, incluso a niveles moderados. Las interrupciones del sueño se traducen en somnolencia, irritabilidad y reducción del rendimiento físico e intelectual (Sarrajs y de Castro Manglano, 2007). En relación al evento, estaría principalmente ligado con los descansos de mediodía, o más conocidos como “siesta”.
- II. **Deterioro Sistema Inmunológico:** Algunos estudios reflejan la repercusión que puede generar la perturbación del sueño con respecto a una serie de efectos inmunosupresores (Medina et al., 2015). La exposición continua al ruido,

especialmente durante el descanso, alterando los niveles de leucocitos y reduciendo la eficacia del sistema inmunológico.

### **C. Enfermedades cardiovasculares**

Se trata de uno de los enfoques menos considerados, pero, tal y como exponen Escobar y División (2016) en su artículo “*Ruido y enfermedad cardiovascular*”, el ruido del tráfico aumenta en gran medida el número de hospitalizaciones por ictus, especialmente en adultos y ancianos. Este efecto se debe a mecanismos fisiológicos como la activación del sistema nervioso autónomo, el aumento de hormonas del estrés (cortisol y noradrenalina), o la inflamación crónica de bajo grado, todos ellos vinculados al desarrollo de enfermedades cardiovasculares como la hipertensión o la aterosclerosis.

### **D. Salud mental**

Además de la problemática generada en el sistema auditivo y cardiovascular, la exposición al ruido también tiene un profundo impacto sobre la salud mental, siendo el estrés y la ansiedad dos de sus manifestaciones más frecuentes. Esta exposición provoca la activación continuada del denominado eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal (HPA), lo que provoca un incremento de los niveles de cortisol y otras hormonas relacionadas con el estrés, generando una sobrecarga en el sistema nervioso. (Martin et al., 2009)

A nivel cerebral, el ruido puede alterar el funcionamiento del sistema límbico, especialmente de estructuras como la amígdala y el hipocampo, que son claves en la regulación emocional y la respuesta al estrés. El desequilibrio en estos sistemas puede derivar en una mayor vulnerabilidad psicológica, preocupación excesiva o problemas de concentración favoreciendo como consecuencia la aparición de trastornos de ansiedad. (Ulibarri Martínez, 2015)

### **E. Otros efectos**

Asimismo, existen otros efectos relacionados con la exposición al ruido, como puede ser el asociado con problemas en el embarazo. Tal y como informó la campaña de UGT de Castilla y León en mayo de 2010, son numerosos los experimentos que muestran una correlación (esencialmente negativa) entre el ruido y el embarazo. Con la temática de dicha campaña volcada sobre la amenaza que el ruido podría presentar sobre los trabajadores (Diez González, 2010), el informe evaluó que dicha exposición podía provocar, en los casos más extremos, amenazas de aborto en las trabajadoras embarazadas, riesgos de parto prematuro o casos de hipoacusia irreversible del feto. En este sentido, la Directiva (UE) 2020/367 refuerza la necesidad de estas valoraciones al establecer métodos de evaluación de los efectos nocivos del ruido y definir los riesgos para la salud basados en relaciones dosis-efecto. A modo de regular esta problemática, el artículo 26, de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales recoge la obligación de las empresas de evaluar el grado, la naturaleza y el tiempo de exposición de las trabajadoras embarazadas al ruido.

## 2.3. Normativas y regulaciones

El marco jurídico que regula el ruido ambiental a nivel europeo y nacional es esencial para definir los criterios de evaluación, los indicadores acústicos y los objetivos de calidad que condicionarán cualquier actividad potencialmente ruidosa en entornos urbanos.

### Legislación general sobre ruido ambiental.

A nivel europeo, la **Directiva 2002/49/CE** (Unión Europea, 2002) establece la estructura de referencia para la evaluación y gestión del ruido ambiental. Introduce indicadores normalizados como Lden o Lday, promueve la elaboración de mapas estratégicos y exige la identificación de aglomeraciones y población expuesta.

Para asegurar la coherencia en toda la Unión Europea, esta directiva fue desarrollada por la Directiva Delegada (UE) 2015/996 de la Comisión (Unión Europea, 2015), que establece el Método Común de Evaluación del Ruido Ambiental (CNOSSOS-EU). Se trata del marco obligatorio para el cálculo de ruido de fuentes como el tráfico rodado en la elaboración de los mapas estratégicos, lo cual obliga a la uniformidad en la caracterización de fuentes sonoras.

Aunque la Directiva y CNOSSOS-EU no regulan directamente eventos temporales como la F1, sí proporcionan los principios base sobre la evaluación de la exposición, la caracterización del territorio y la obligación de informar a la ciudadanía. Además, el marco metodológico de cálculo de propagación sonora se complementa con normas técnicas, como la ISO 9613-2:2024 (International Organization for Standardization, 2024), empleadas habitualmente en simulaciones predictivas de detalle como es el caso del presente estudio.

En España, la **Ley 37/2003, del Ruido**, constituye la norma troncal en materia de acústica ambiental. Define las competencias, introduce los objetivos de calidad acústica (OCA) y establece que cualquier actividad susceptible de generar niveles sonoros elevados debe ser evaluada, controlada y autorizada conforme a criterios técnicos. La ley incorpora expresamente la necesidad de considerar zonificaciones acústicas, horarios, tipologías de fuentes y caracterización del entorno receptor.

El desarrollo reglamentario de la Ley del Ruido se articula principalmente a través de dos Reales Decretos con objetivos complementarios:

Por un lado, el **Real Decreto 1513/2005**, enfocado en la evaluación y gestión del ruido ambiental, se alinea con la Directiva Europea estableciendo la metodología para la elaboración de Mapas Estratégicos de Ruido y los Planes de Acción para grandes aglomeraciones e infraestructuras, como es el caso de Madrid. Esta norma define los indicadores acústicos normalizados (Lden, Ld, Le, Ln) que se utilizan como marco metodológico general para la evaluación de la exposición al ruido de la población circundante a la infraestructura.

Por otro lado, el **Real Decreto 1367/2007** desarrolla la Ley en lo referente a la zonificación acústica, los objetivos de calidad y las emisiones acústicas, constituyendo la herramienta esencial para el control directo y la protección del ciudadano. Esta norma establece los criterios para la zonificación acústica del territorio, asignando Objetivos de Calidad Acústica (OCA) que no deben superarse en áreas sensibles como zonas residenciales y sanitarias.

## Aplicación Específica para Eventos Temporales (F1)

No obstante, la aplicación directa de los Objetivos de Calidad Acústica (OCA) generales explicados en el Artículo 14 (Objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a áreas acústicas) y desarrollados en la Tabla A del Anexo II del RD 1367/2007 (Anexo 3), presenta una limitación metodológica para eventos de carácter temporal. Dichos objetivos se evalúan mediante promedios anuales; por lo tanto, la integración del nivel sonoro de un evento de tres días en un promedio anual subestimaría la verdadera magnitud del impacto real percibido por la población.

Para realizar una evaluación rigurosa, este estudio adopta el enfoque de considerar el circuito como una "nueva actividad deportivo-recreativa". Bajo este criterio, regulado en el Artículo 24 (Valores límite de inmisión aplicables a nuevas actividades), se exige que la actividad no transmita al ambiente exterior niveles superiores a los establecidos en la Tabla B1 del Anexo III de dicho Real Decreto (Anexo 4).

Para la verificación del cumplimiento, se aplica el criterio de inspección del Artículo 25.1.b, que establece que se considera que una actividad cumple los valores límite cuando se respetan, simultáneamente, las dos condiciones siguientes:

1. Criterio de Promedio Diario (+3 dB): Ningún valor promedio diario ( $L_{K_{eq,día}}$ ) debe superar en 3 dB los límites fijados en el Anexo 4. Este cálculo implica normalizar el ruido del evento al periodo diurno completo (12 horas).
2. Criterio de Evento Específico (+5 dB): Ningún valor medido durante el tiempo específico de emisión del evento ( $L_{K_{eq,Ti}}$ ) debe superar en 5 dB los límites fijados en el Anexo 4. Este criterio evalúa el ruido durante las horas reales de carrera, sin promediar con periodos de silencio.

En consecuencia, el estudio evaluará el impacto acústico verificando el cumplimiento de los siguientes umbrales máximos admisibles en las fachadas de los receptores sensibles:

- Uso Residencial (Límite base Anexo 4: 55 dBA):
  - Caso Diario: No superar los 58 dBA ( $L_{A_{eq,día}}$ ).
  - Caso Evento: No superar los 60 dBA ( $L_{A_{eq,evento}}$ ).

Cualquier superación de estos valores confirmará un impacto acústico incompatible con los límites legales establecidos para actividades.

## 2.4. Modelos de simulación y análisis de datos

### 1) Modelización acústica y digital del terreno

La simulación se basa en la aplicación de principios físicos de propagación sonora (atenuación geométrica, absorción atmosférica, reflexiones y difracción) sobre una representación tridimensional precisa del entorno: el Modelo Digital del Terreno (MDT). El MDT sirve como la base geométrica imprescindible para el cálculo, incorporando la topografía de detalle, los

volúmenes edificatorios (fachadas y viviendas circundantes) y las características de la superficie del terreno. El alto grado de precisión en la definición geométrica del MDT determinará la correcta propagación del sonido y el efecto de apantallamiento o reflexión en un entorno complejo como el de la ciudad.

Para llevar a cabo la predicción, se emplean metodologías estandarizadas como la ISO 9613-2 para el cálculo de atenuación y el Método Común de Evaluación del Ruido Ambiental (CNOSSOS-EU), establecido por la Directiva 2015/996, como referencia obligatoria para la modelización del ruido de las infraestructuras de transporte. La gestión, el procesamiento de datos espaciales y la creación del MDT se llevan a cabo mediante software GIS avanzado como ArcGIS Pro. Posteriormente, el cálculo acústico y la generación de mapas de ruido se ejecutan en plataformas especializadas de ingeniería acústica como CadnaA (Computer Aided Noise Abatement), que integra los algoritmos de propagación normativos (como ISO 9613-2 y CNOSSOS-EU) y utiliza el MDT para la simulación.

## **2) Estimación de emisiones de vehículos**

La modelización precisa del impacto acústico requiere una caracterización inicial de las fuentes móviles, los monoplazas. A diferencia del tráfico rodado convencional, cuyo ruido está dominado por la interacción neumático-pavimento, la emisión sonora en la Fórmula 1 proviene principalmente del motor y el escape de alta prestación.

La emisión acústica de los monoplazas es altamente variable a lo largo del trazado debido a las constantes aceleraciones y frenadas. Sin embargo, ante la ausencia de informes técnicos, documentos oficiales o información detallada que caractericen la potencia acústica ( $L_w$ ) específica del monoplaza en cada tipo de tramo de un circuito (curva lenta, curva rápida, recta), resulta metodológicamente necesario unificar la fuente sonora y considerarla constante en toda la longitud del trazado.

Por lo tanto, la metodología adoptada se centra en la obtención de datos empíricos representativos capturados durante condiciones reales de carrera, en lugar de modelos teóricos detallados de cada sección. Para obtener datos representativos, se toman como referencia estudios de campo que capturan el ruido en condiciones reales de carrera. Por ejemplo, el trabajo de Xu, Gan, & Erfanian (2024), que registró los niveles de presión sonora ( $L_p$ ) durante el Gran Premio de Fórmula 1 de Singapur de 2023, ofrece una base empírica realista. El valor de presión sonora media registrada en pista debe ser adoptado con precaución, seleccionando las mediciones más precisas y menos afectadas por obstáculos.

La caracterización de la fuente para la simulación acústica se realiza mediante el indicador potencia acústica ( $L_wA$ ). Esta métrica representa la energía acústica total que la fuente emite por unidad de tiempo (la causa del ruido) y es una propiedad intrínseca de la fuente, independiente de las condiciones ambientales o la distancia de medición. En contraste, el nivel de presión sonora ( $L_p$ ) es una medida del efecto en el campo sonoro, dependiente de la distancia, barreras y reflexiones, siendo lo que capta el sonómetro. En consecuencia, el nivel de potencia acústica ( $L_wA$ ) es el parámetro de entrada utilizado para los modelos de propagación.

La conversión de  $L_p$  (medido a una distancia  $r$ ) a  $L_w$  se fundamenta en el modelo de propagación en campo libre, tal como describen Rossing (2007) y Beranek (2006). Aunque el modelo teórico de una fuente puntual en campo libre completo se rige por la propagación esférica [ $L_p = L_w - 10\log_{10}(Q) - 20\log_{10}(r) - 11$ ], en un entorno como un circuito (campo semilibre con reflexión parcial sobre el asfalto), el factor de atenuación debe incorporar una corrección. El modelo general se expresa como:

$$L_p = L_w - 10\log_{10}(Q) - 10\log_{10}(r) - 11$$

Donde  $Q$  es el factor de directividad ( $Q=2$  para un campo semilibre, lo que implica un incremento de aproximadamente 3 dB respecto al campo libre completo).

No obstante, en lugar de realizar una conversión directa del nivel de potencia puntual a una potencia por unidad de longitud mediante una división simple por la distancia total, se adopta el modelo de fuente lineal finita incoherente. Este modelo incorpora una corrección precisa a través del concepto de longitud efectiva ( $\ell$ ). Esta longitud no corresponde necesariamente a la dimensión física del tramo, sino que se determina geoméricamente en función del ángulo de visión bajo el cual el receptor percibe la fuente. La relación entre la longitud del segmento y la distancia al receptor se establece mediante funciones trigonométricas (arcotangente), lo que permite ajustar la energía emitida en función de la perspectiva del observador:

$$L_{w,\text{lineal}} = L_w - 10\log_{10}(\ell) = L_w - 10\log_{10}\left(2 * \tan^{-1} \frac{L}{2r}\right)$$

### 3) Análisis espacial y exposición poblacional

La modelización del entorno acústico se fundamenta en el empleo del software especializado CadnaA (Computer Aided Noise Abatement). Esta herramienta incluye los estándares internacionales para la predicción del ruido ambiental y permite integrar de manera simultánea diversas fuentes emisoras. En este entorno, se combinan los datos de tráfico rodado convencional con la emisión acústica excepcional de los monoplazas, asignando a cada fuente sus características de potencia sonora e intermitencia temporal.

El software ejecuta el cálculo de propagación basándose en el Modelo Digital del Terreno (MDT). CadnaA tiene en cuenta variables físicas como la absorción atmosférica, el efecto del suelo y la difracción en las aristas de los edificios. El resultado final de esta fase es la generación mapas de isófonas de alta resolución, que representan la distribución de la presión sonora en toda la superficie analizada.

Una vez obtenidos estos resultados técnicos, la fase de diagnóstico se traslada al entorno ArcGIS Pro. Este software permite realizar un procesamiento avanzado de la cartografía acústica para evaluar el cumplimiento normativo. Mediante herramientas de análisis espacial, se delimitan con precisión las superficies que superan los umbrales máximos de ruido permitidos por la legislación vigente (Apartado 2.3), permitiendo cuantificar la magnitud del impacto territorial en función de los límites legales establecidos.

El análisis se profundiza al correlacionar el impacto acústico con fuentes de información demográfica y socio-territorial (INE, 2024). Al superponer los mapas de ruido sobre las capas de las secciones censales y las áreas residenciales del catastro, es posible determinar el impacto directo sobre la ciudadanía. Con ello es posible identificar no solo la extensión del ruido, sino también el número de habitantes que se verán expuestos a niveles de inmisión superiores a los recomendados durante la celebración del evento.

Ilustración 4. Procedimiento para la evaluación del impacto acústico en el entorno urbano.



Fuente: Elaboración propia

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Descripción del entorno: IFEMA y zonas aledañas

Con el objetivo de comprender mejor la relevancia del estudio, este apartado se centrará en realizar una descripción detallada del ámbito de estudio, apoyada con una cartografía representativa de los diferentes elementos, infraestructuras y áreas, tanto residenciales, empresariales o recreativas, que rodean el entorno del circuito.

En términos generales, el Gran Premio tendrá lugar en las zonas aledañas del recinto del IFEMA, área situada al noreste de la ciudad de Madrid, más concretamente en el distrito de Barajas (21) (Ilustración 5).

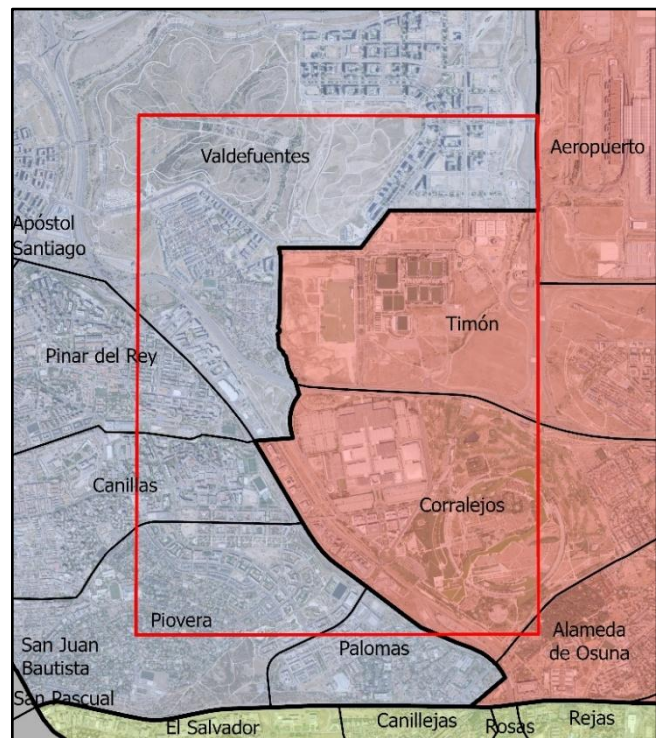
Ilustración 5. Localización del distrito de Barajas.



Fuente: Elaboración propia

Los barrios que albergarán todas las infraestructuras ligadas al circuito serán Timón y Corralejos. Sin embargo, debido a las características del estudio cuya finalidad es analizar una fuente sonora, los límites del ámbito de estudio no están claramente definidos. Por este motivo, el área de estudio también recogerá parte del distrito de Hortaleza (16), y algunos de sus respectivos barrios como Palomas, Piovera, Canillas, Pinar del Rey y Valdefuentes.

Ilustración 6. Barrios que integran el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

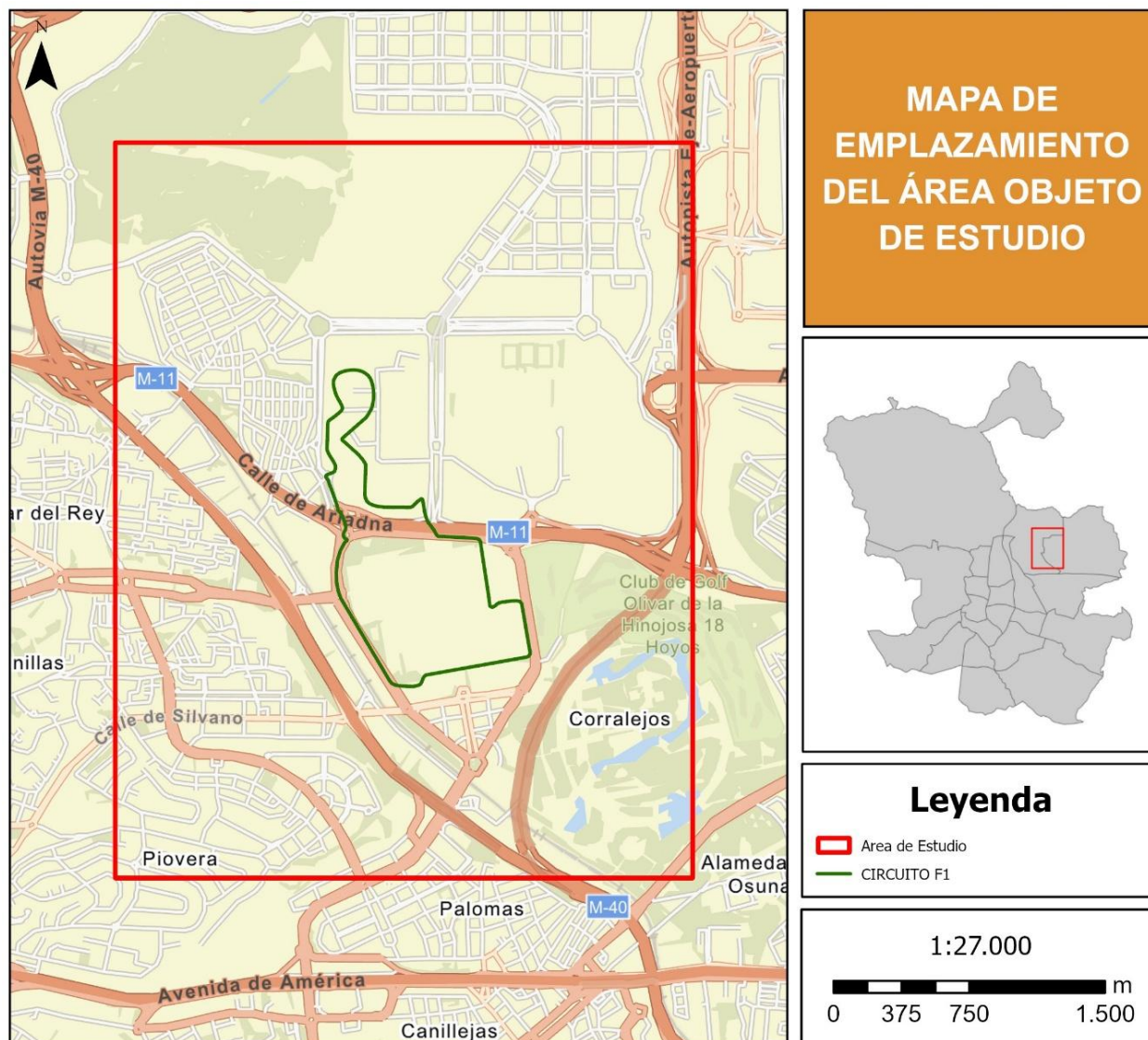
El análisis del impacto acústico y con ello, todos los pasos a seguir para la obtención de los resultados se llevarán a cabo dentro de un área de 3,19 km de ancho y 4,07 km de largo aproximadamente, unos 13 km<sup>2</sup>. Se trata de un rectángulo (Ilustración 7) cuyos vértices se ven reflejados en la Tabla 3:

Tabla 3: Coordenadas geográficas de los vértices del área de estudio.

VERTICE	LONGITUD	LATITUD
Superior izquierda	445890,7 E	4482487, 21 N
Superior derecha	449080,19 E	4482487, 21 N
Inferior izquierda	445890,7 E	4478417,87 N
Inferior derecha	449080,19 E	4478417, 87 N

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 7. Área de estudio y circuito de F1.



Fuente: Elaboración propia

## 3.2. Especificaciones del modelo acústico

- **Parámetros y suposiciones**

Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en la elaboración de un estudio de impacto acústico, si no el más importante, es definir un intervalo temporal sobre el que se van a realizar las mediciones. Existen múltiples opciones para medir la repercusión de los monoplazas, pero en este caso se evaluará de dos maneras. En primera instancia se medirá esencialmente la LAeq de la carrera, ya que representa la exposición real al ruido durante el evento tanto para espectadores como para residentes de la zona.

Según Mike Seymour, redactor de la página oficial de la Fórmula 1 el circuito mantendrá un tiempo de vuelta estimado cercano a 1 minuto y 32 segundos (Fórmula 1, 2024). Sin embargo, lo que determina el número de vueltas que se dan a la pista viene marcado por una distancia estandarizada mínima y próxima a los 305 kilómetros (unas 190 millas), a excepción del GP de Mónaco, que no supera los 260 kilómetros (Clark, 2024).

Conociendo que el trazado rondará los 5,4 km de longitud, y con los datos anteriormente mencionados, es posible obtener la duración completa de la carrera por medio de un simple cálculo matemático:

$$\frac{305 \text{ km}}{5,4 \text{ km}} = 56,48 \text{ vueltas} \approx 57 \text{ vueltas}$$

$$57 \text{ vueltas} \times 1 \text{ min } 32\text{seg} (92\text{seg}) = 5244 \text{ seg} \approx 1\text{h } 27\text{min}$$

Con carga de combustible, degradación de los neumáticos, paradas de pit stop reglamentarias y los posibles coches de seguridad que puedan aparecer durante la carrera, lo normal es que la carrera se alargue hasta aproximadamente las 2 horas.

Asimismo, se analizará el LAeq diario, obteniendo el valor para el periodo normativo en el que se desarrolle la carrera, que en condiciones normales debería ser a las 15:00, correspondiente al Ld o periodo diurno (07:00–19:00). Esto permitirá comparar los resultados con los límites legales establecidos por la normativa de protección acústica.

- **Escenarios de análisis**

Para la realización del estudio del impacto sonoro que tendrá el circuito de F1 se empleará una comparación de dos modelos de diseño en el área de IFEMA.

- El primero de ellos será un modelo actual, con las bases topográficas existentes (carreteras, edificios, curvas de nivel) con el objetivo de tener un escenario base que aporte información de cuáles son los niveles sonoros dentro del área de estudio un día normal. Estos niveles sonoros se obtendrán teniendo en cuenta la totalidad de las carreteras existentes, ya que el modelo se verá alimentado con parámetros (Caudal de vehículos, velocidades, vehículos pesados...) que permitan reflejar un escenario lo más real posible.
- El segundo será un diseño idéntico al primero, pero en este caso se incluirá el diseño del circuito de F1, con los respectivos valores de emisión acústica que puedan tener los coches de F1.

- **Limitaciones del estudio**

### **Incertidumbre en la caracterización de las fuentes acústicas**

El obstáculo principal es la falta de datos empíricos directos sobre la fuente emisora dominante, el monoplaza:

- Confidencialidad de la industria: La industria de la Fórmula 1 mantiene un alto grado de confidencialidad sobre los parámetros de funcionamiento de las unidades de potencia V6 híbridas, lo que restringe el acceso a la información precisa sobre los niveles de presión sonora y el espectro acústico de los vehículos previstos para la temporada 2026.
- Estimación necesaria: Esta falta de transparencia obliga a recurrir a estimaciones basadas en estudios previos de circuitos urbanos e información técnica publicada, en lugar de utilizar valores medidos directamente sobre el modelo de vehículo.
- Simplificación de la fuente móvil: Para la modelización, la fuente sonora se simplifica asimilándola a una fuente lineal constante a lo largo del recorrido. Esta aproximación resulta necesaria ante la falta de datos sobre la potencia acústica en cada tramo (aceleraciones, frenadas, curvas), aunque implica una simplificación del fenómeno acústico real.

### **Limitaciones Geométricas, de Tráfico y Operacionales**

La simulación predictiva se basa en un escenario de referencia que debe lidiar con la falta de datos definitivos de la operación:

- Trazado y entorno no definitivo: El diseño final del circuito y la configuración del entorno urbano inmediato (ubicación exacta de las infraestructuras auxiliares o gradas) no están completamente definidos, lo que obliga al estudio a basarse en un escenario de referencia aproximado sujeto a futuras actualizaciones.
- Simplificación de la infraestructura viaria: La simplificación geométrica de las carreteras a ejes viarios únicos para facilitar la modelización con CadnaA no representa con exactitud toda la infraestructura viaria, lo que puede introducir pequeñas desviaciones en la propagación del ruido de fondo.
- Inexactitud en la categorización del tráfico: No se dispone de datos de caudal vehicular para todas las calles, dado que los aforadores no permanentes se sitúan en puntos estratégicos. Esto significa que la categorización de las calles por tipología y la asignación de caudales y velocidades se realiza mediante extrapolación, lo que resta precisión al modelo de ruido de fondo.
- Tráfico y movilidad del evento no estimadas: No se conoce cómo va a acudir la población al circuito, por lo que no se pueden estimar los flujos de tráfico inducidos, los tiempos de espera ni las aglomeraciones de personas. Esto impide un análisis integral del impacto acústico indirecto asociado a la movilidad del público.

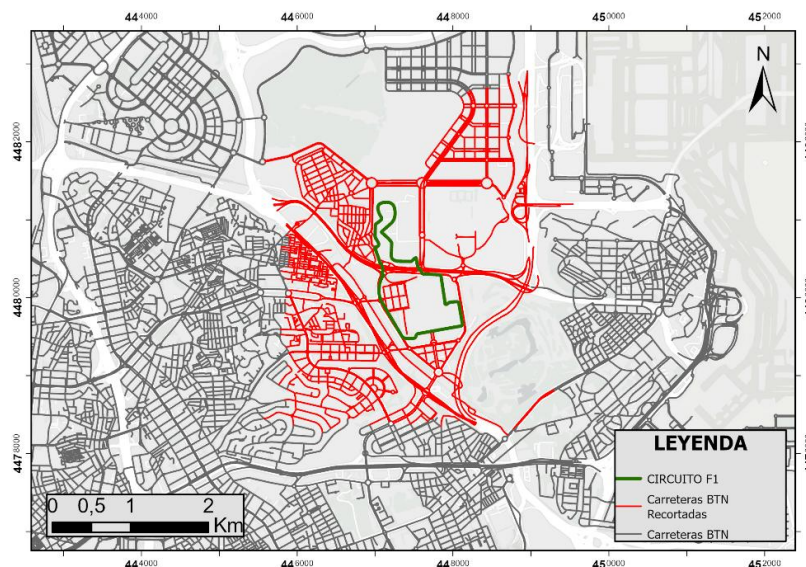
### Exclusiones y limitaciones del contexto ambiental

- Exclusión de fuentes secundarias: El estudio se centra únicamente en el ruido de los monoplazas, sin contemplar otras fuentes como la logística, el público, la megafonía o las actividades paralelas.
- Influencia aeroportuaria no contemplada: La presencia del Aeropuerto de Madrid-Barajas en las proximidades del área de estudio tampoco se ha contemplado, lo que podría alterar notablemente el nivel de ruido de fondo o las mediciones en un estudio empírico posterior.
- Imprecisión en la cuantificación poblacional: Al tratarse de un área de estudio cuyos límites cortan las secciones censales (la unidad más pequeña con datos de población), las aproximaciones de población podrían conllevar un pequeño error en la cuantificación final. Sin embargo, se han tratado los datos censales considerando la distribución y el porcentaje de cada sección censal dentro del área de estudio.

### 3.3. Creación de un Modelo Digital del Terreno

Un Modelo Digital del Terreno (MDT) consiste en una representación tridimensional de la superficie terrestre obtenida a partir de datos topográficos. Su principal finalidad en este estudio es reproducir de manera precisa el relieve y los principales elementos que influyen en el comportamiento acústico, como pendientes, edificaciones o infraestructuras viarias. Estos elementos proporcionan en su conjunto una base geométrica a partir de la cual el software CadnaA es capaz de calcular la propagación del ruido del tráfico en el área de análisis.

Para la elaboración del MDT se ha utilizado la Base Topográfica Nacional (BTN) correspondiente a la hoja 38043. De este conjunto cartográfico únicamente se han seleccionado las capas necesarias para el estudio acústico: carreteras y urbano, curvas de nivel y edificaciones. Estos datos, en un formato tipo shapefile se importan a CadnaA y posteriormente se recortan al área de estudio, delimitado por un rectángulo de dimensiones 3,2km x 4,1km alrededor del circuito.

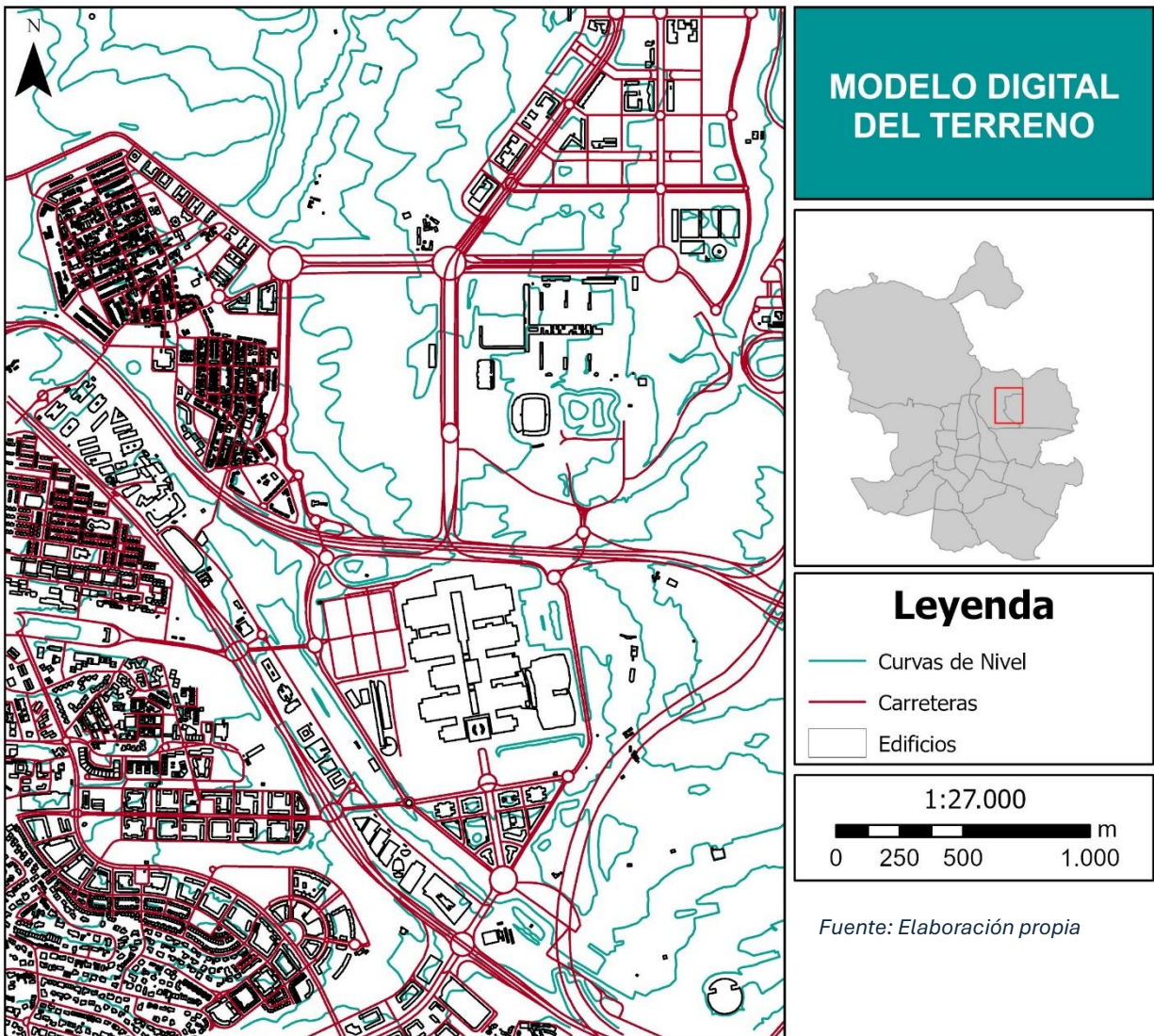


*Ilustración 8. Zona de recorte de las carreteras de la BTN al área de estudio.*

*Fuente: Elaboración propia*

Con el recorte ya realizado y la eliminación de todos los edificios, curvas de nivel y carreteras que quedan fuera del área de estudio, el modelo digital del terreno sería similar a la Ilustración 9:

Ilustración 9. MDT del área de estudio.

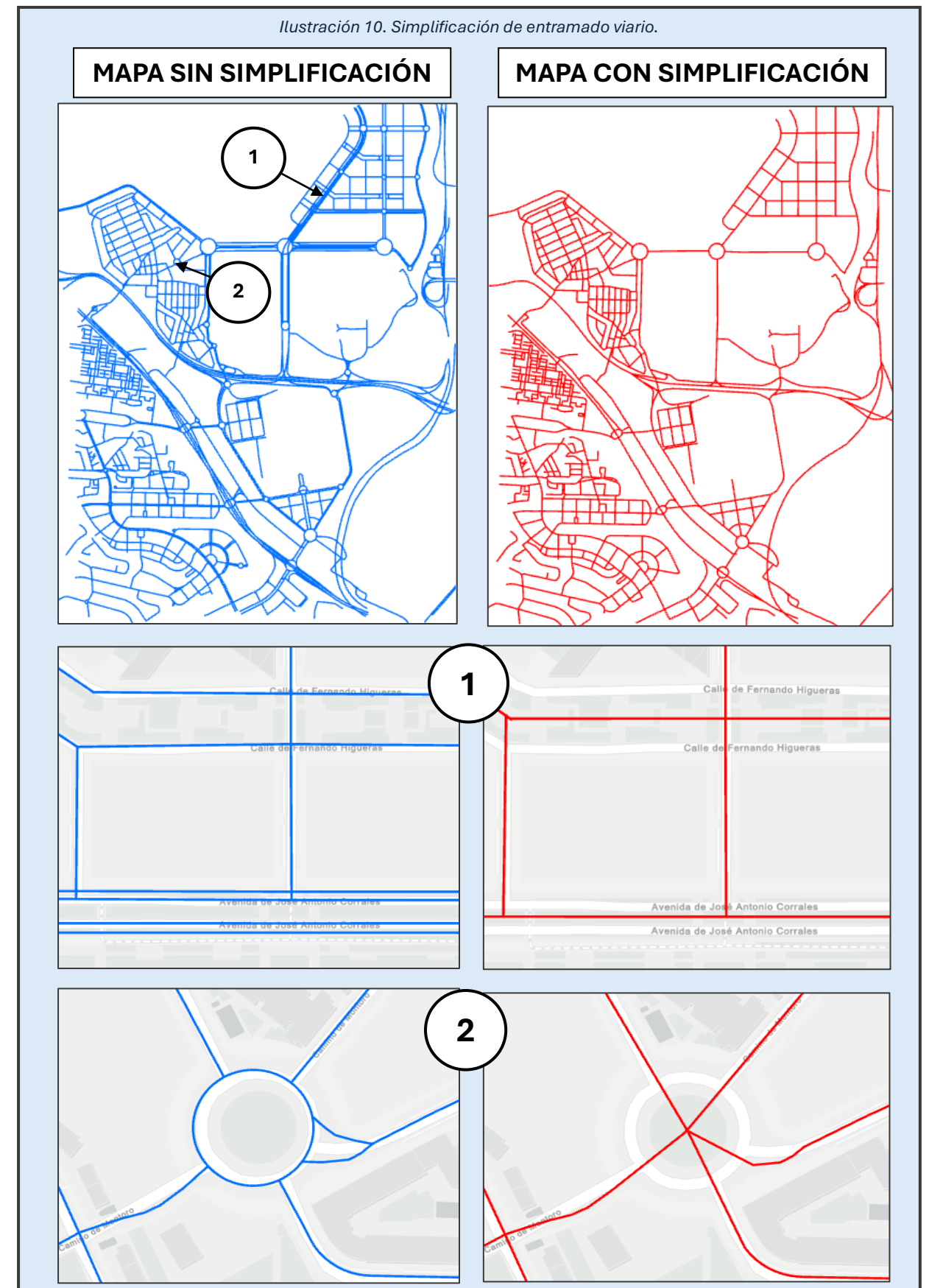


Sin embargo, con el fin de facilitar la modelización del tráfico y la asignación de aforos vehiculares, las carreteras de dos o más carriles se han de representar como un único eje viario, al que posteriormente se asocia un único valor de intensidad de circulación.

Asimismo, se realiza el mismo procedimiento para las rotondas secundarias o poco significativas, ya que su influencia acústica es mínima en comparación con los ejes principales.

Este modo de simplificaciones se resume en la siguiente Ilustración 10.

Ilustración 10. Simplificación de entramado viario.



### 3.4. Análisis y adquisición de datos de tráfico

La finalidad de este apartado consistirá en la recopilación de los datos necesarios de aforo vehicular. Para realizar la simulación precisa con CadnaA es necesario obtener los datos del número de vehículos por hora que circulan por el entramado viario del área de estudio, el porcentaje de los mismos que son vehículos pesados, y las velocidades a las que circulan. En este apartado, se procederá a la recopilación de datos de aforo vehicular de años anteriores, desglosados por tipos de vías (principales y secundarias), y se analizarán aspectos como las velocidades medias y el número de vehículos para cada categoría de carretera. En este caso, se considerarán vías principales a las carreteras M-40, M-11 y Calle Silvano.

- **NÚMERO DE VEHÍCULOS**

Vías principales: El Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible publica datos de las intensidades medias diarias (IDM) de las principales vías de la ciudad por medio de aforadores permanentes. Estos datos representan el número medio de vehículos que pasan por una sección de la vía en un día. Además, también se exponen las intensidades medias horarias, para conocer cuál es la intensidad de tráfico en cada hora del día. Para el área del IFEMA hay publicados datos de las autovías M-11 y M-40, y desglosados en intensidades horarias para vehículos ligeros, pesados y totales que fueron recogidas en el año 2023. (MITMA, 2023)

Para la obtención de un valor representativo lo más real posible se ha optado por analizar las fichas relativas al mes de septiembre. En concreto se han utilizado los IDM de los domingos del mes de septiembre del año 2023 (fecha en la que tendrá lugar la carrera de 2026).

M-40		
IDM Domingo de Septiembre	Total	84068
	Ligeros	82599
	Pesados	1469

Tabla 4. Intensidad Media Diaria M-40.

M-11		
IDM Domingo de Septiembre	Total	38987
	Ligeros	38495
	Pesados	492

Tabla 5. Intensidad Media Diaria M-11.

Dado que el periodo de simulación consta de dos escenarios (carrera y diario) los datos del IDM se evaluaron en función de las intensidades horarias por medio de coeficientes correctivos. Estos coeficientes son independientes para cada calzada, por lo que el valor final de tráfico se ha realizado promediando los resultados, que se exponen por hora y calzada (Anexo 1 y 2). El cálculo general corresponde a la siguiente fórmula:

$$\text{Caudal vehicular} = \text{IDM} \times \text{Promedio del porcentaje horario}$$

El IDM puede referirse al total de vehículos, únicamente a vehículos ligeros o únicamente a vehículos pesados, conforme a los datos del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. En cuanto al promedio del porcentaje horario, este varía en función del escenario que nos encontramos; mientras que para el escenario de la carrera se obtiene el promedio de las 15:00 y las 16:00 de la tarde, el promedio diario se evalúa con la media de vehículos que circulan entre las 07:00 de la mañana y las 19:00 de la tarde. Los resultados obtenidos son los siguientes:

	<b>Caudal vehicular (vehículos/hora)</b>			
<b>TIPOLOGÍA</b>	<b>M-40</b>		<b>M-11</b>	
	<b>Carrera</b>	<b>Diario</b>	<b>Carrera</b>	<b>Diario</b>
Total	4330	4591	2017	2103
Ligeros	4254	4519	1990	2077
Pesados	76	72	27	26

Tabla 6. Caudal horario de las principales vías.

Del mismo modo, también existen una serie de aforadores permanentes distribuidos por toda la ciudad y cuyos datos son publicados por el Ayuntamiento de Madrid en el Portal de Datos Abiertos (s.f.). Estos, a pesar de que no diferencian entre la tipología de vehículos, ofrecen datos tanto mensuales como horarios. Uno de ellos, la estación número 57, se encuentra en la Calle Silvano, que forma parte del área de estudio. Se utilizarán los datos de los meses de septiembre de los años 2023 y 2024, y se promediará el tráfico vehicular horario exclusivamente para los domingos del mes, con el objetivo de obtener un valor promedio lo más realista posible.

Para obtener el valor representativo de este tipo de aforador, se ha seguido el mismo procedimiento mencionado anteriormente. En este caso, se han calculado los promedios del tránsito vehicular horario, considerando los dos sentidos de circulación y la distribución horaria de cada escenario. Este cálculo solo se ha podido realizar para el total de vehículos, dado que son los únicos datos disponibles proporcionados por el Ayuntamiento. La manera de estimar el porcentaje de pesados se ha realizado con la consideración de la red de autobuses de la EMT y sus frecuencias de paso, proceso que será explicado más adelante. De igual manera, los resultados finales obtenidos responden a esta tabla:

	<b>Caudal vehicular (vehículos/hora)</b>	
<b>TIPOLOGÍA</b>	<b>CALLE SILVANO</b>	
	<b>Carrera</b>	<b>Diario</b>
Total	686	564
Ligeros	676	555
Pesados	10	9

Tabla 7. Caudal horario de la Calle Silvano.

**Vías secundarias:**

La mayoría de las carreteras que conforman el área de estudio carecen de aforadores permanentes que aporten un valor representativo; sin embargo, existen múltiples de aforadores no permanentes capaces de medir en puntos específicos el número de vehículos que circulan. El mayor inconveniente de esta medición son los periodos que miden este tipo de aforadores, ya que por lo general son periodos cortos en días o meses sueltos, por lo que son mucho menos representativos que los aforadores permanentes. Además, al estar en ubicaciones concretas, es necesario extrapolar los datos al resto de carreteras que no presentan aforadores de acuerdo con las características y velocidades de las vías.

El análisis se ha realizado con las mediciones tomadas en el mes de septiembre de 2023, en todos aquellos aforadores ubicados dentro de los límites del área de estudio. Se distribuyen en distintas localizaciones (Anexo 7) y cada uno mide en horarios independientes, por lo que el valor final refleja el promedio horario en cada aforador no permanente. Una vez tratados los datos y excluidos los no representativos, el resultado ha sido el que se muestra en la Tabla 8.

AFORADOR	Caudal vehicular (vehiculos/hora)	
	Carrera	Diario
1081	330	345
1082	83	88
1087	48	44
183	272	259
307	267	230
308	117	161
399	385	416
400	485	488
467	45	39
468	48	68
47	500	647
5	782	907
517	332	343
518	340	348
628	1117	1006
629	1238	1209
643	364	335
645	132	139
652	142	119
653	195	190
901	397	403
902	357	362
998	535	436
<b>Total</b>	<b>370</b>	<b>373</b>

Tabla 8. Caudal horario de los aforadores No Permanentes.

- **VELOCIDADES**

**Vías principales:** Del mismo modo que sucede con el número de vehículos, los datos sobre las velocidades a las que circulan y el porcentaje de vehículos pesados se encuentran en las fichas proporcionadas por los mapas de tráfico del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. A partir de estas fichas es posible obtener las velocidades tanto de vehículos ligeros como pesados en las autovías M-11 y M-40. En este caso la Calle Silvano se ha obtenido siguiendo los pasos de las vías secundarias.

**Vías secundarias:** La Dirección General de Tráfico (DGT, 2018) es quien establece las normativas de velocidad en función de las características de cada calle y los requerimientos de transporte y urbanos. De este modo tanto el distrito de Barajas como el de Hortaleza cumplen con lo establecido en esta directiva en donde:

- **Calles principales:** Su velocidad máxima es de 50 km/h y son aquellas vías con dos o más carriles por sentido de circulación como es el caso de la Avenida de Machupichu o la Calle de la Ribera del Loira
- **Calles secundarias:** Su velocidad máxima es de 30 km/h y son aquellas vías de un único carril por sentido o un carril único unidireccional. Un claro ejemplo son las calles de Fernando Higuera o de Pedroñeras.
- **Zonas peatonales y entornos escolares:** Son vías en donde existe una prioridad peatonal debido a que no existe diferenciación entre la calzada y la acera o bien se encuentran próximas a colegios e institutos.

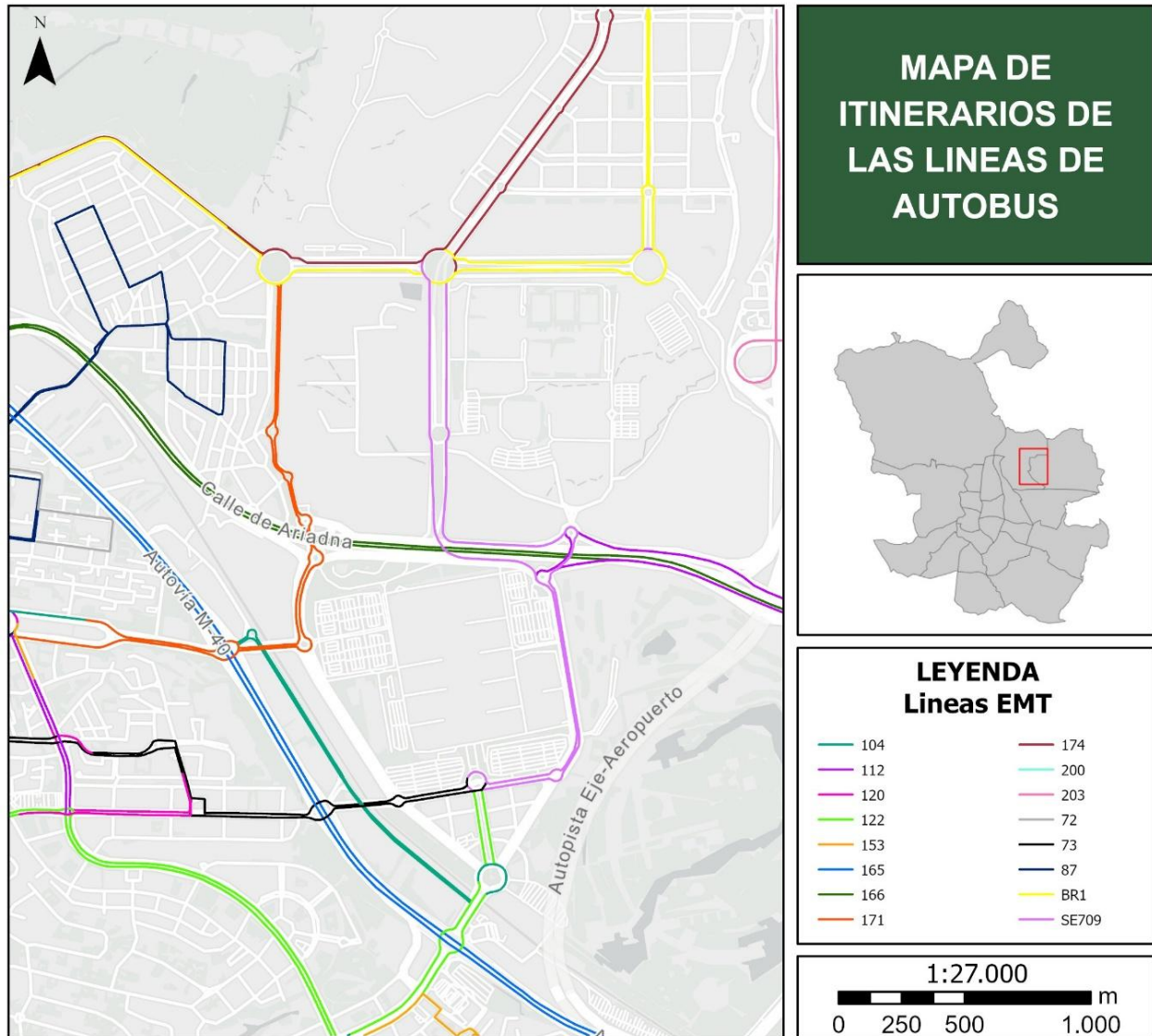
- **PORCENTAJE DE VEHICULOS PESADOS**

Los vehículos pesados producen un impacto acústico mayor que los vehículos convencionales, atribuible a sus dimensiones y al ruido mecánico y del motor (Morales Pérez, 2009). Por ello evaluar el caudal de vehículos pesados que circulan por cada carretera es necesario para obtener una simulación realista del entorno del proyecto.

Como se ha explicado anteriormente, los aforadores permanentes de la M-40 y la M-11 aportan datos cuantitativos del porcentaje de vehículos pesados que transitan con respecto al total. Sin embargo, esto no sucede a la hora de estudiar la calle Silvano y el resto de vías secundarias, cuyos aforadores únicamente registran en número total de vehículos que circulan, sin hacer una distinción entre ligeros y pesados.

Dado que se desconoce cuál es el porcentaje real de vehículos pesados, se ha procedido a realizar una estimación considerando a los autobuses como único medio de transporte pesado. La red de autobuses de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT Madrid) es una empresa que opera la red de autobuses urbanos de Madrid y ofrece, mediante su portal “Navega por Madrid”, cuáles son los itinerarios que siguen las líneas de autobús.

Ilustración 11. Líneas de autobús en el entorno del IFEMA



Fuente: Elaboración propia

Una vez identificadas todas las calles por las que circulan las líneas de autobús, se procede a calcular la frecuencia de paso de los mismos. Para ello, el portal ofrece datos de cada línea específica en base a los minutos que transcurren en el intervalo de paso entre dos autobuses de la misma línea. Estos datos distinguen entre días laborables, sábados y festivos. En base a los datos de días festivos (correspondientes a domingos) se calcula cuál es la frecuencia de autobuses que pasan por cada hora, para así poder ser comparados con los caudales vehiculares obtenidos a partir de los aforadores. La Tabla 9 muestra cómo se ha calculado en primera instancia la media en minutos en base a la frecuencia máxima y mínima estimada, y posteriormente la frecuencia de autobuses por hora que pasan por cada línea.

Tabla 9. Frecuencias de paso de las líneas de autobús.

LINEA	FRECUENCIA DE PASO (min)		Media Total	FRECUENCIA DE PASO
	Festivos (Domingo)			(Veces/Hora)
	Min	Max		
104	21	25	23	2,61
112	23	35	29	2,07
120	18	35	26,5	2,26
122	24	32	28	2,14
125	16	27	21,5	2,79
153	20	38	29	2,07
165	25	40	32,5	1,85
166	40	60	50	1,20
171	21	25	23	2,61
172				
172SF	20	30	25	2,40
174	26	35	30,5	1,97
200	15	25	20	3,00
203	17	30	23,5	2,55
72	17	31	24	2,50
73	18	30	24	2,50
87	18	27	22,5	2,67
BR1	19	30	24,5	2,45
N2	20	45	32,5	1,85
N27	30	35	32,5	1,85
N3	20	45	32,5	1,85
SE709	15	15	15	4,00
T11				

Fuente: Elaboración propia

Conociendo las calles por las que circulan es posible calcular de manera aproximada el número de vehículos pesados que pasan por cada una. En este caso se va a mostrar un ejemplo de la Avenida Machupichu, que tiene un aforador no permanente (643) que refleja un caudal de 335 veh/h en el promedio de las 07:00 – 19:00 y que además tiene 4 líneas de autobús de doble sentido (112, 120, 122 y 153). El cálculo se realizaría de la siguiente forma:

$$Av. Machupichu = (2,07 + 2,26 + 2,14 + 2,07) \times 2 \text{ sentidos} = \mathbf{17,08 \text{ buses/hora}}$$

$$\frac{17,08 \text{ bus/hora}}{335 \text{ veh/hora}} = 0,051 = \mathbf{5,1\% \text{ de vehiculos pesados}}$$

### 3.5. Clasificación por tipología

#### Calles

Gracias a los registros de aforos proporcionados tanto por la DGT como por el ayuntamiento es posible conocer el comportamiento del tráfico en un número considerable de vías. Sin embargo, no todas cuentan con datos específicos, lo que complica su incorporación directa al modelo de simulación acústica.

Para solventar esta limitación, se ha optado por diseñar un sistema de agrupación que permita clasificar las calles en categorías homogéneas. De este modo, a cada grupo se le asignan valores medios de intensidad, velocidad y composición vehicular, evitando así la necesidad de disponer de aforos individuales para todas ellas.

- **Criterios de agrupación:**

La definición de las categorías se ha basado en una serie de variables determinantes en el comportamiento del tráfico y, por extensión, en la emisión acústica:

- **Intensidad de tráfico:** diferencia entre calles con un caudal elevado y aquellas de flujo más reducido.
- **Velocidad máxima permitida:** Diferenciando entre la velocidad máxima a la que se puede circular en función de la tipología de la calle.
- **Número de carriles disponibles:** indicador de la sección viaria y del potencial de absorción del tráfico.
- **Presencia de vehículos pesados:** factor relevante en la generación de ruido, debido al impacto sonoro superior de los pesados frente a los ligeros.

- **Resultado de la clasificación**

En primer lugar, se ha excluido a las principales arterias del distrito de la clasificación (M-40, M-11, Calle Silvano y Calle Aconcagua), dado que concentran los mayores volúmenes de tráfico y disponen de datos suficientemente fiables.

El resto de vías se han organizado en base a categorías jerárquicas en función de los criterios de agrupación:

- **Categoría 1:** vías con un caudal medio superior a 350 vehículos/hora en el periodo diurno (07:00 – 19:00).
- **Categoría 2:** vías con un caudal inferior a dicho umbral. Dentro de esta categoría se establecen dos subdivisiones:
  - **Categoría 2A:** calles con dos o más carriles por sentido, todas con una velocidad límite de 50km/h.
  - **Categoría 2B:** calles con menos de 2 carriles por sentido, en las cuales la mayoría presentan una velocidad máxima de 30km/h.

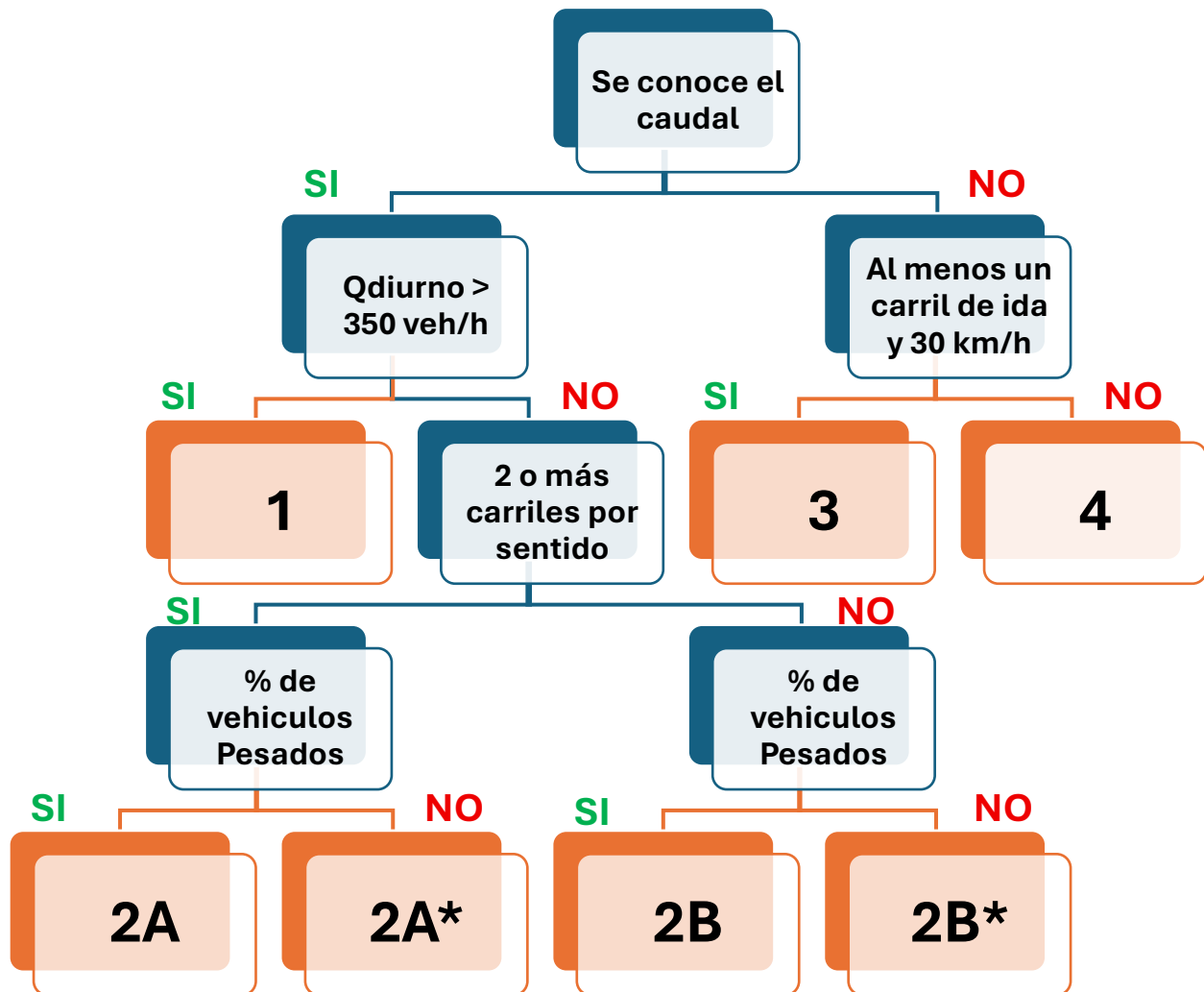
- **Categorías 2A\* y 2B\***: mantienen las mismas condiciones de número de carriles que 2A y 2B, pero sin circulación de vehículos pesados al no existir líneas de EMT en dichas calles.

A estas categorías se han añadido dos grupos específicos que permiten incluir vías con características singulares:

- **Categoría 3**: calles con un único carril unidireccional y una limitación de 30 km/h.
- **Categoría 4**: calles peatonales en las que no existe caudal de vehículos y por lo tanto no pueden integrarse en las categorías anteriores.

Toda esta categorización jerárquica se ve reflejada en el siguiente árbol:

Ilustración 12. Árbol de clasificación de vías.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 10 muestra los criterios de agrupación:

Tabla 10. Criterios de agrupación de vías.

Categoría	Caudal diario (veh/h)	Carriles	Velocidad	% vehículos pesados
1	> 350			
2A	< 350	> 4	50	SI
2A*	< 350	> 4	50	NO
2B	< 350	2	30	SI
2B*	< 350	2	30	NO
3	< 350	1	30	
4	0	0	0	NO

Fuente: Elaboración propia

## Glorietas

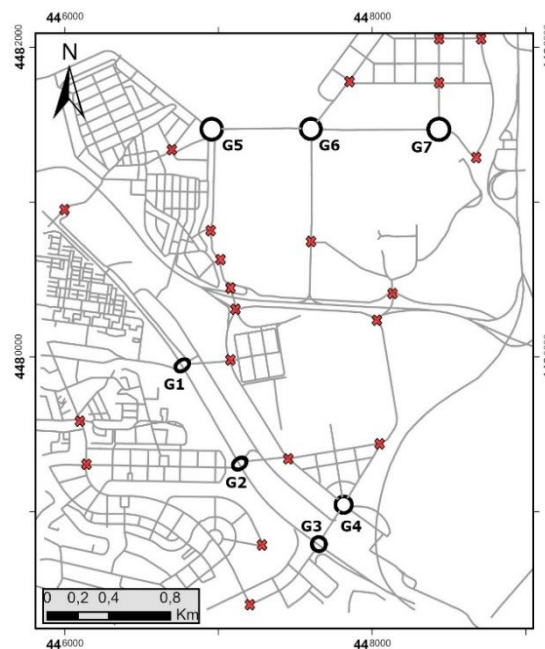
Existen una gran cantidad de glorietas en el área de estudio. Algunas de ellas, dado su pequeño tamaño e insignificante flujo, han sido simplificadas según se ha explicado en el apartado 3.2. En la Ilustración 13 aparecen representadas con una cruz roja.

No obstante, se han identificado 7 glorietas que sí deben ser consideradas en el análisis acústico, ya que presentan un elevado caudal vehicular y, por tanto, contribuyen de forma significativa a los niveles de ruido en su entorno inmediato. Estas glorietas actúan como puntos de concentración y redistribución del tráfico, siendo potenciales focos de emisión sonora relevantes dentro del ámbito de estudio.

Dado que no existen datos exactos de cuál es el caudal de vehículos que circula por cada una de ellas, la estimación se ha realizado a partir de las vías de entrada y salida a dichas glorietas. El proceso ha consistido en promediar los diferentes caudales para calcular de manera aproximada un flujo que pueda ser representativo de cada rotonda.

Estas rotondas también adquieren su propia categorización, siendo cada una de ellas individual, con un caudal y porcentaje de vehículos acorde a sus características:

Ilustración 13. Elección de glorietas representativas.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Clasificación de glorietas

Glorieta	Caudal (Veh/H)		% pesados		VLKV	VPKW
	CARRERA 15:00-17:00	LDAY 07:00-17:00	CARRERA 15:00-17:00	LDAY 07:00-19:00		
G1	590	662	1,77%	1,58%	50	50
G2	611	495	0,00%	0,00%	50	50
G3	753	720	0,69%	0,72%	50	50
G4	331	326	8,04%	8,17%	50	50
G5	347	340	4,27%	4,16%	50	50
G6	398	442	4,31%	3,88%	50	50
G7	271	265	6,33%	6,47%	50	50

Fuente: Elaboración propia

### Resultado de la clasificación

En base a los criterios establecidos en los anteriores apartados, el resultado de la clasificación muestra una agrupación de todas las calles del área de estudio en un total de 9 categorías (Ilustración 14). Las calles principales se agrupan en una sola categoría al igual que sucede con las glorietas, sin embargo, cada una de estas infraestructuras viarias cuentan con sus propios datos de caudales, por lo que se trabajarán de manera individual de aquí en adelante. Las 7 categorías restantes son el resultado de la Tabla 10. De este modo, la distribución cartográfica quedaría de la siguiente manera:

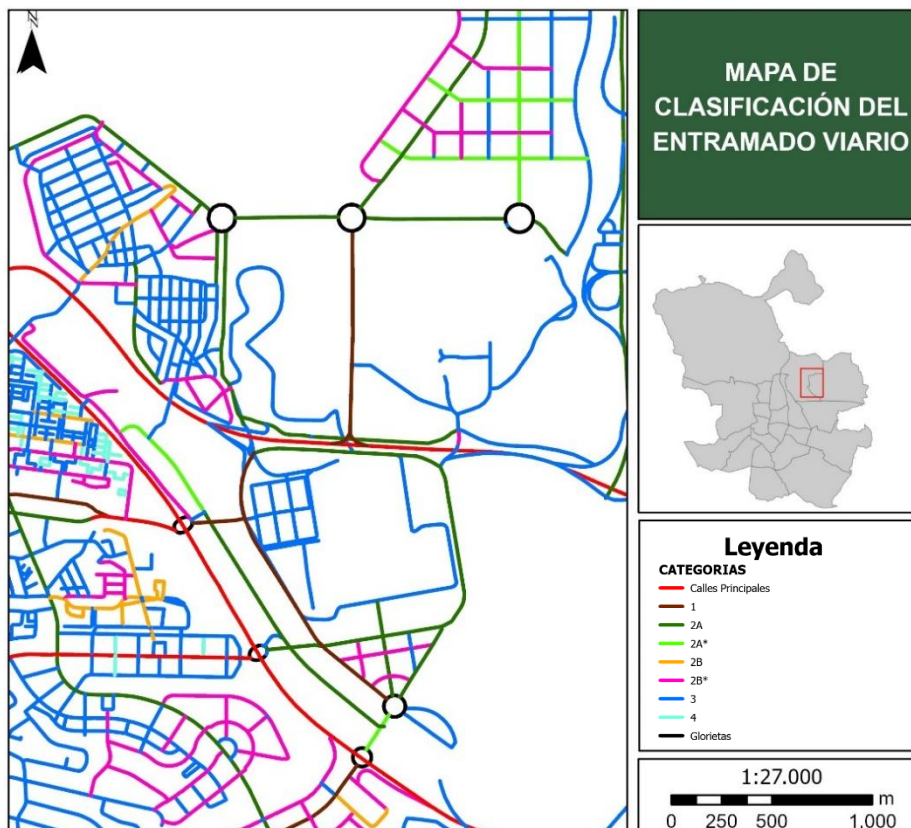


Ilustración 14. Clasificación final del entramado viario.

Fuente: Elaboración propia

### 3.6. Estimación de las emisiones acústicas de un Fórmula 1

En los últimos años, la tecnología de los monoplazas de Fórmula 1 ha experimentado una transformación significativa en materia de propulsión y emisiones acústicas. Hasta 2013, los vehículos utilizaban motores V8 atmosféricos de 2.4 L. Sin embargo, desde la temporada 2014, la Federación Internacional del Automóvil (FIA) introdujo los motores híbridos V6 turboalimentados de 1.6 L, que incorporan sistemas de recuperación de energía (ERS) y turbocompresores capaces de alterar sustancialmente el espectro acústico del vehículo. (J.M. Vinuesa, 2024)

Tras una exhaustiva revisión bibliográfica, se ha constatado que existen muy pocos estudios publicados posteriores a 2014 que analicen los niveles de emisión acústica de los monoplazas de Fórmula 1 en condiciones reales de competición. El motivo de la falta de información pública es incierto, aunque podrían estar relacionadas con alguno de los siguientes factores:

- **Cambio de enfoque en la investigación:** Tras la transición a los motores híbridos, la atención de la FIA y de la comunidad científica se centró en la eficiencia energética y la sostenibilidad en cuanto a emisiones contaminantes, dejando en segundo plano el estudio del ruido generado por los monoplazas.
- **Restricciones de acceso y confidencialidad:** Las escuderías y la propia FIA mantienen una estricta confidencialidad sobre los parámetros de funcionamiento de las unidades de potencia, lo que dificulta la obtención de datos fiables sobre sus emisiones sonoras. Así mismo, también existen limitaciones de acceso a potenciales zonas de medición durante los Grandes Premios.
- **Menor interés mediático y científico:** La reducción del nivel sonoro global de los motores híbridos disminuyó el interés público y académico por el análisis acústico, desplazando la investigación hacia aspectos medioambientales y de rendimiento energético.

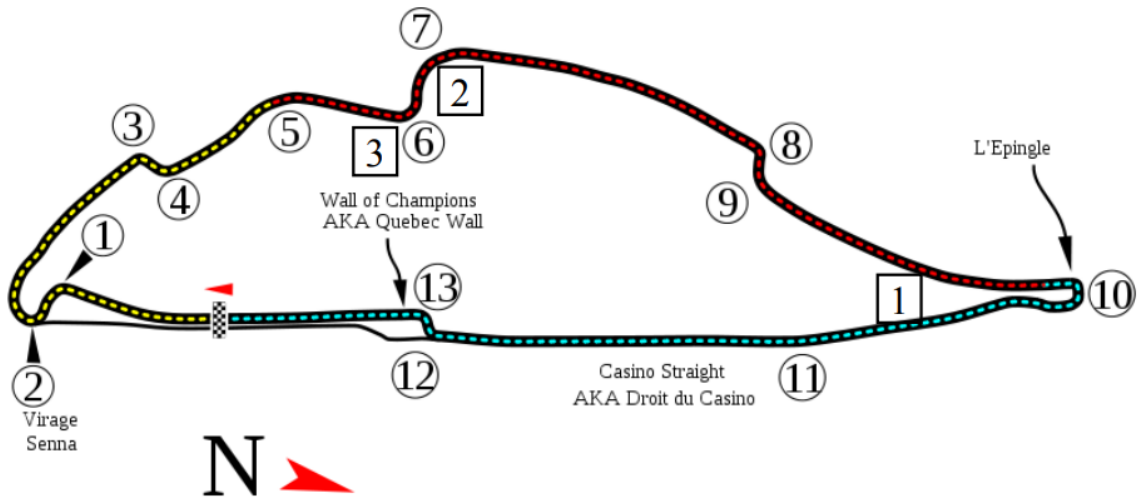
La finalidad de este apartado es obtener valores representativos de las emisiones acústicas de un vehículo de Fórmula 1, determinando los niveles de potencia sonora ( $L_w$ ) a partir de los niveles de presión sonora ( $L_p$ ) reportados en bibliografía, considerando al menos tres configuraciones de conducción: curva lenta, curva rápida y recta. Dado que existen pocas publicaciones sobre las emisiones de los motores introducidos a partir de 2014, el estudio complementará estos datos con información de motores anteriores, que disponen de registros más completos, para permitir comparaciones. Con ello se obtendrá un valor para una fuente lineal equivalente que emite dB/m bajo condiciones de velocidad constante, proporcionando así una base sólida y reproducible para el análisis acústico de los vehículos F1.

#### Motores V8

El estudio realizado por Dolder et al. (2013) recopiló datos de niveles de presión sonora durante el Gran Premio de Montreal 2013. Las mediciones se realizaron en tres posiciones de la pista, seleccionadas por la proximidad del público y la dinámica de los monoplazas:

- P1: Después de la curva 10 a lo largo de la recta más larga. Se trata de un punto de aceleración en plena recta.

- P2: Salida de la chicane, los coches van 120km/h de paso, existe un edificio a 20 m.
- P3: Inicio de la misma chicane, los coches se encuentran en una fuerte deceleración.



Las curvas de la pista se indican con círculos, y las posiciones de medición se indican con cuadrados.  
 Ilustración 15. Distribución de posiciones de medición en circuito. (Dolder et al., 2013)

Los resultados arrojaron datos esperados (Tabla 12), el punto con mayor presión sonora y por consiguiente mayor exposición al ruido correspondía al tramo de recta, donde los monoplazas adquieren una mayor velocidad. Seguidamente el punto 2, aquí los coches a pesar de circular a una velocidad baja se encuentran saliendo de curva por lo que es un tramo de aceleración y por tanto los niveles de presión siguen siendo considerables. Por último, el punto 3 mantiene los  $L_p$  más bajos, esto se debe en gran medida a la zona de frenado en la que está ubicado, además de encontrarse en un área con alta densidad de vegetación que puede distorsionar la medición.

Posición de medición	Distancia al centro de pista	L <sub>Amax</sub>	L <sub>Aeq</sub>	L <sub>w</sub>
<b>P1</b>	≈ 10 m	139,2	110,4	141,4
<b>P2</b>	≈ 34 m	127,5	103,1	144,7
<b>P3</b>	≈ 20 m	120,5	97,6	134,6

Tabla 12. Mediciones en 3 posiciones y cálculo del  $L_w$  obtenido a partir de Dolder et al. (2013).

Sin embargo, para conocer en qué posición el motor del F1 genera más potencia sonora se ha calculado la  $L_w$ , ya que este valor tiene en cuenta la distancia a la que se ha realizado la medición. El cálculo se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$L_w = L_p + 20 \log_{10}(r) + 11$$

En donde:

- $L_w$  es el nivel de potencia sonora [dB].
- $L_p$  es el nivel de presión sonora medido [dB] (Se usará  $L_{Aeq}$ ).

- $r$  es la distancia al centro de la fuente en metros.
- El 11 dB corresponde a la corrección por referencia a 1 m y propagación esférica en aire libre.

El resultado muestra un dato que a priori no cuadra con lo esperado, ya que, si todo siguiera una lógica, el mayor nivel de potencia sonora debería registrarse en el P1 debido a que es el tramo con mayor aceleración y velocidad de los 3. Sin embargo, el P2 refleja un valor de 144,7 dB, considerablemente alto para el tramo en el que está ubicado.

La explicación reside en la presencia de un edificio situado a 20m que refleja parte del sonido de los automóviles, lo que contribuye a que la potencia acústica efectiva ( $L_w$ ) sea mayor en esa posición. No es el único factor, pero sí ayuda a explicar por qué P2 puede registrar máximos de  $L_w$  incluso estando más lejos de la pista que P1.

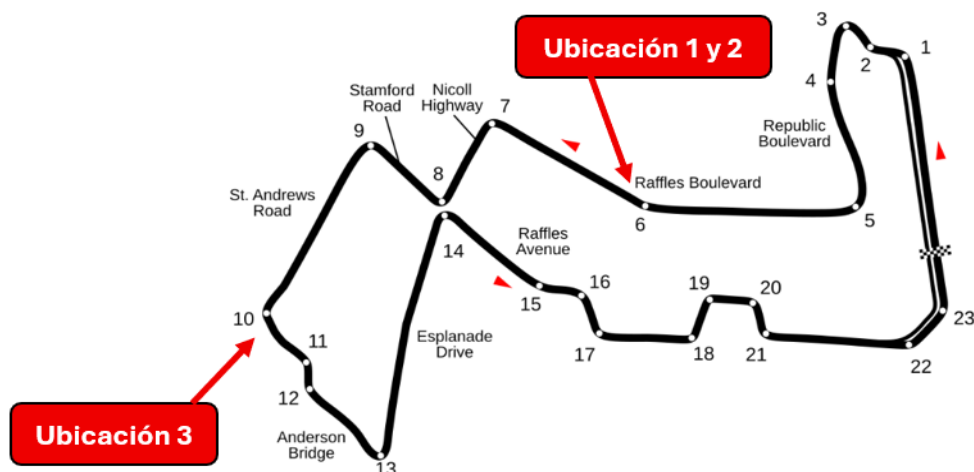
Este estudio es un claro ejemplo de que, a pesar de tener muchos datos, estimar el sonido de una fuente sonora es algo realmente complicado ya que existen numerosos factores que pueden influir en la medición. Las condiciones óptimas serían las reproducidas por una cámara anecoica, en donde se dan las condiciones ideales de campo libre (ausencia de reflexiones y ruido de fondo). Sin embargo, no hay registros ni datos de este tipo de mediciones para un F1 por lo que para este estudio la obtención de los datos se debe realizar siempre de manera aproximada.

## Motores V6

Para caracterizar el comportamiento acústico de los monoplazas actuales, se ha tomado como referencia el estudio de Xu, Gan, & Erfanian (2024), en el que se midieron los niveles de presión sonora durante el Gran Premio de Fórmula 1 de Singapur de 2023. El trabajo registró mediciones en 2 distintas zonas del circuito y en diferentes periodos del evento, utilizando registros del sistema de adquisición de datos SQobold y del sonómetro Larson-Davis (SLM).

Las ubicaciones de los puntos de medición eran 3 (Ilustración 16). La tercera de ellas se encontraba entre el Antiguo Edificio del Parlamento y el Victoria Hall (una zona de curva), pero cuyos datos se registraron únicamente para las carreras de Super y Porsche, dado que en la carrera de Fórmula 1 se instalaron maderas que impidieron realizar una medición adecuada.

Ilustración 16. Ubicación de las zonas de medición del artículo de Xu et al., (2024).



Las ubicaciones 1 y 2 presentaban mejores características; ambas estaban ubicadas en el Raffles Boulevard, en las proximidades del centro comercial Millenia Walk. La ubicación 1 se situaba a la misma altura a unos 15 metros del eje de la pista, mientras que la Ubicación 2 se situaba en un paso elevado encima del circuito.



Ilustración 17. Foto callejera de los puntos de medición.

Fuente: Google Earth

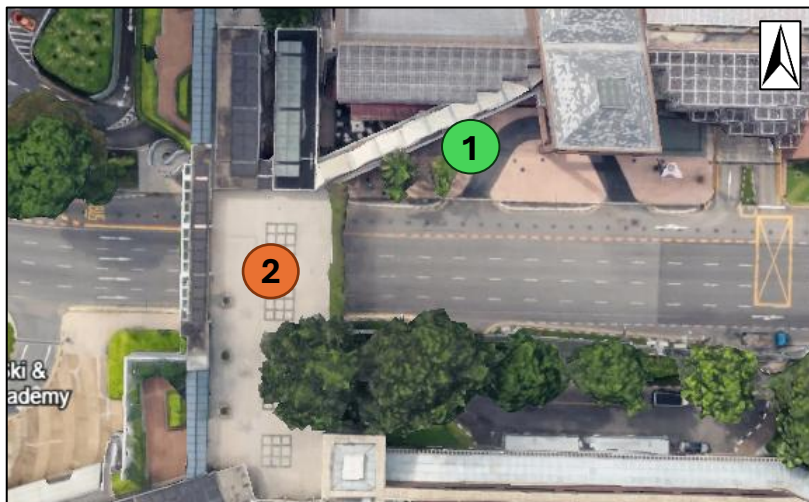


Ilustración 18. Foto aérea de los puntos de medición.

Fuente: Google Earth

Analizando el emplazamiento de los sonómetros en las ubicaciones, se ha estimado que la ubicación 2 podría no ser adecuada para el estudio dado que, además de ser un paso elevado y actuar el suelo del mismo como obstáculo, también existían muros a ambos lados de 3 metros de altura que pudieron alterar la medición obtenida.

De este modo, se consideró la ubicación 1 como la medición más precisa y fiable para analizar los decibelios que emiten los monoplazas. Este punto de medición, como se ha mencionado, se encuentra al mismo nivel que la propia pista y la distancia al centro de la misma es de unos 15 metros aproximadamente. Sin embargo, cabe destacar que existía una pequeña valla metálica de poco grosor y apenas 2 metros de altura que actuaba como obstáculo para la línea de visión directa de los monoplazas.

Los resultados obtenidos se clasifican en 2 según el tipo de sonómetro utilizado. Mientras que el SQobold mide LAeq simulando el sistema binaural (recrear la forma en que los seres humanos

percibimos el sonido con nuestros oídos), el SLM realiza la medición del LAeq de manera directa. De este modo se han recabado los siguientes datos:

Tabla 13. Niveles de presión sonora registrados durante la carrera de F1 en Singapur. (Xu et al., 2024)

Nivel de presión sonora promedio						
Sitio de grabación	Duración (seg)	SLM	Sqobold (dBA)		Diferencia Absoluta (dBA)	
		LAeq/dBA	Capítulo 1	Capítulo 2	Capítulo 1	Capítulo 2
Ubicación 1	915	96,6	96,8	98,8	0,2	2,2

Teniendo en cuenta que el SLM proporciona una medición más directa y comparable con los estudios previos (como Dolder et al., 2013), se adopta el valor de LAeq = 96.6 dBA como referencia para el cálculo del nivel de potencia sonora ( $L_w$ ).

Para determinar el nivel de potencia sonora ( $L_w$ ) a partir de los niveles de presión sonora ( $L_p$ ) medidos en el circuito, se ha adoptado el modelo general de propagación en campo libre descrito por Rossing (2007) y Beranek (2006), expresado según:

$$L_p = L_w - 10\log_{10}(Q) - 20\log_{10}(r) - 11$$

donde:

- $L_p$  es el nivel de presión sonora medido (dB).
- $L_w$  es el nivel de potencia sonora (dB).
- $r$  es la distancia entre la fuente y el receptor (m).

$Q$  es el factor de directividad, que representa la porción del espacio hacia la cual la fuente emite energía acústica. Sin embargo, un vehículo en movimiento a lo largo de un tramo actúa de forma más adecuada como fuente lineal (propagación cilíndrica). En ese caso la dependencia con la distancia es  $-10\log_{10}(r)$  en lugar de  $-20\log_{10}(r)$ .

$$L_p = L_w - 10\log_{10}(Q) - 10\log_{10}(r) - 11$$

Además, en un campo libre completo (propagación esférica),  $Q = 1$ , mientras que en un entorno semilibre como el caso del circuito, donde el sonido se refleja parcialmente sobre el asfalto,  $Q = 2$ . Esto equivale a un incremento de aproximadamente 3 dB en el nivel de presión sonora medido. El modelo adoptado para este estudio se expresa como:

$$L_w = L_p + 10\log_{10}(r) + 11 - 10\log_{10}(Q)$$

Sustituyendo  $Q = 2$ , se obtiene la forma simplificada:

$$L_w = L_p + 10\log_{10}(r) + 8$$

Considerando una distancia media de medición de 15 m, y a partir del valor medio registrado  $L_p = 96.6$  dBA, se obtiene:

$$L_w = 96.6 + 10\log_{10}(15) + 11 - 3 = \mathbf{116,4 \text{ dB}}$$

Este valor representa el nivel de potencia sonora puntual de un monoplaza de Fórmula 1 con motor híbrido V6 durante una fase de aceleración.

Sin embargo, el comportamiento acústico de un vehículo en movimiento no puede asimilarse a una fuente puntual fija, ya que el monoplaza emite ruido de forma continua a lo largo del trazado. En términos de modelización acústica, esto implica que el vehículo actúa como una fuente móvil o, de forma equivalente, como una fuente lineal distribuida a lo largo del recorrido que realiza.

La conversión del nivel de potencia sonora  $L_w$  a una representación lineal resulta necesaria para describir correctamente el campo sonoro acumulado generado durante el desplazamiento del vehículo. Este enfoque permite integrar el efecto del ruido en movimiento sobre los receptores cercanos y aplicar metodologías de predicción sonora en entornos viales o urbanos, tal como recomiendan Attenborough et al. (2007) y CNOSSOS-EU (2015).

No obstante, en lugar de realizar una conversión directa del nivel de potencia puntual a una potencia por unidad de longitud mediante una resta del tipo  $-10\log_{10}(L)$ , se adopta el modelo de fuente lineal finita incoherente, que ya incorpora la corrección por longitud efectiva de la fuente a través del término geométrico  $2 * \arctan(L/(2r))$ .

De este modo, el nivel de potencia sonora puntual se convierte en potencia sonora lineal mediante la expresión:

$$L_{w,\text{lineal}} = L_w - 10\log_{10}\left(2 * \tan^{-1}\frac{L}{2r}\right)$$

donde  $L$  representa la longitud efectiva del tramo en el que el vehículo mantiene condiciones acústicas aproximadamente constantes (velocidad y régimen de motor). Dadas las características de la recta del Raffles Blvd. del circuito de Singapur, se ha considerado que la longitud efectiva en la que tuvo lugar la medición es de aproximadamente 300 metros de trayectoria con velocidad constante, lo que implementándolo en la fórmula se obtendría:

$$L_{w,\text{lineal}} = 116,7 - 10\log_{10}\left(2 * \tan^{-1}\frac{300}{2 * 15}\right) = \mathbf{111,7 \text{ dB}}$$

Con este valor se puede representar la emisión acústica media de pista para una carrera de monoplazas con motor híbrido V6 en condiciones reales de competición, constituyendo el parámetro base para la simulación acústica del trazado urbano de Madrid.

Para establecer una comparación jurídicamente válida con los Objetivos de Calidad Acústica (OCA) definidos por la OPCAT, es necesario normalizar el nivel de ruido equivalente modelado durante la actividad al periodo completo de referencia diurno ( $T_{\text{diurno}} = 12$  horas). El valor de emisión acústica modelado para la actividad en pista fue de  $L_{Aeq, \text{act}} = 111.7 \text{ dB}$  (durante  $T_{\text{carrera}} = 2$  horas). La corrección se calcula de la siguiente manera:

$$L_{w,\text{dia}} = L_{w,\text{carrera}} + 10\log_{10}\left(\frac{T_{\text{carrera}}}{T_{\text{dia}}}\right) = 111,7 \text{ dB} + 10\log_{10}\left(\frac{2}{12}\right) = \mathbf{103,9 \text{ dB}}$$

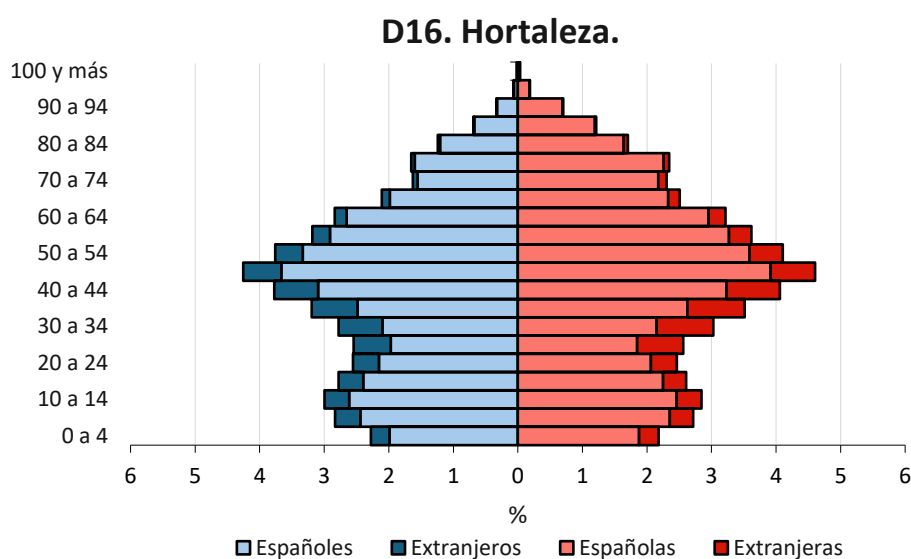
Este sería el nivel sonoro continuo equivalente resultante para el periodo diurno correspondiente al día de la carrera.

### 3.7. Análisis sociodemográfico

Este apartado presenta el estudio de la estructura sociodemográfica del área de estudio, la cual comprende los barrios de Palomas, Piovera, Canillas, Pinar del Rey y Valdefuentes, pertenecientes al distrito de Hortaleza, y los barrios de Timón y Corralejos, del distrito de Barajas. El análisis se centra en la distribución por sexo y la estructura de la población por grupos de edad (población joven, adulta y mayor). Se utilizan datos censales y pirámides de población para caracterizar a la población residente, que han sido obtenidos del Instituto Nacional de Estadística.

#### Distritos y Barrios

En primer lugar, se analizarán las pirámides de población de ambos distritos:



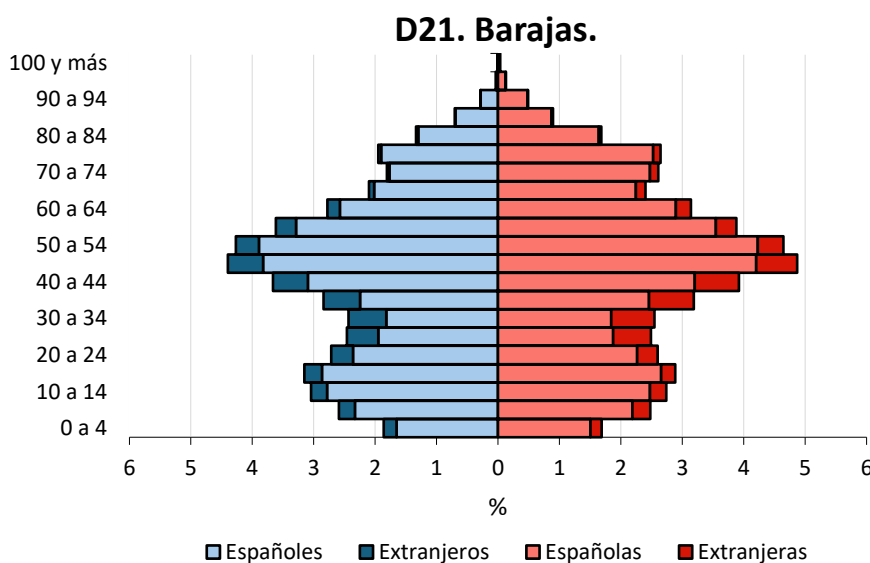
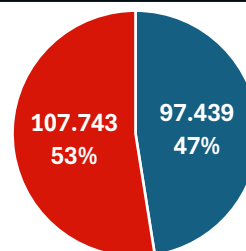
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE.

Población

**205.182**

Densidad de Población

**7.429 hab/km<sup>2</sup>**



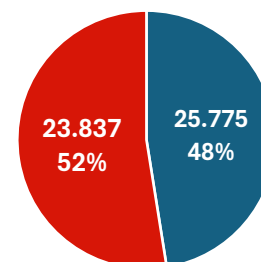
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE.

Población

**49.612**

Densidad de Población

**1.189 hab/km<sup>2</sup>**



Las pirámides poblacionales de Hortaleza (D16) y Barajas (D21) muestran que ambos distritos poseen una estructura demográfica regresiva y envejecida, típica de la transición demográfica completa, caracterizada por una base estrecha (baja natalidad) y un mayor porcentaje que concentra la población adulta y madura. En Hortaleza, la pirámide tiene forma de campana con el mayor peso demográfico en los tramos de 40 a 64 años, reflejando un envejecimiento más pronunciado y una mayor feminidad (53% mujeres). En términos de densidad, hay aproximadamente 7.429 habitantes por kilómetro cuadrado, lo que es una cifra bastante alta pero acorde con entornos urbanos. Barajas, aunque también es envejecido, muestra una concentración ligeramente mayor en las edades productivas (35-59 años) y una menor proporción de mayores, con una distribución por sexo similar (52% mujeres). En este caso la densidad poblacional de Barajas es significativamente más baja (1.189 hab/km<sup>2</sup>), lo que refleja su carácter de distrito con amplias zonas no urbanizadas o de menor edificación.

El análisis sociodemográfico de los barrios que conforman estos dos distritos y que se encuentran dentro del área de interés revela patrones de población heterogéneos.

### Distribución por Sexo

En términos de distribución por sexo, ambos distritos siguen la tendencia general de las grandes capitales con un ligero predominio femenino. Hortaleza presenta un 52,51% de mujeres sobre su población total, mientras que Barajas se sitúa en un 51,95%. Sin embargo, esta feminidad es más acentuada en los barrios tradicionales de Hortaleza, como Pinar del Rey (54,04%) y Canillas (53,53%), lo cual a menudo se correlaciona con un mayor envejecimiento, dado que la esperanza de vida femenina es superior. Por el contrario, los barrios de Corralejos (50,70%) en Barajas y Palomas (50,95%) en Hortaleza son los que exhiben una proporción más equilibrada entre hombres y mujeres.

Tabla 14. Distribución de la población por sexo en el área de estudio.

Distrito/Barrio	Hombres	Mujeres	Población Total	% Hombres	% Mujeres
<b>Hortaleza</b>	<b>97.439</b>	<b>107.743</b>	<b>205.182</b>	<b>47,49%</b>	<b>52,51%</b>
Palomas	3.442	3.576	7.018	49,05%	50,95%
Piovera	7.422	8.033	15.455	48,02%	51,98%
Canillas	18.793	21.647	40.440	46,47%	53,53%
Pinar del Rey	24.503	28.810	53.313	45,96%	54,04%
Valdefuentes	35.738	37.376	73.114	48,88%	51,12%
<b>Barajas</b>	<b>23.837</b>	<b>25.775</b>	<b>49.612</b>	<b>48,05%</b>	<b>51,95%</b>
Timón	5.878	6.522	12.400	47,40%	52,60%
Corralejos	3.827	3.936	7.763	49,30%	50,70%

\*La tabla solo refleja aquellos barrios que intervienen en el área de estudio. Quedan excluidos los barrios Apóstol Santiago (Hortaleza) y Alameda de Osuna, Casco Histórico de Barajas y Aeropuerto (Barajas).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE.

### Estructura de la Población por Edad

La estructura de la población en función de los grandes grupos de edad (Joven: 0-14, Adulta: 15-64, Mayor: 65+) es el factor más distintivo en el estudio. El distrito de Hortaleza se caracteriza por un fuerte contraste interno entre sus barrios. Por un lado, se identifica un eje de población

envejecida y consolidada en barrios como Pinar del Rey y Canillas, donde el porcentaje de población mayor supera significativamente a la población joven, arrojando índices de envejecimiento (IE) superiores al 2,24, calculados a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Envejecimiento} = \frac{\text{Población} \geq 65 \text{ años}}{\text{Población} \leq 14 \text{ años}}$$

Por otro lado, el barrio de Valdefuentes rompe completamente con esta tendencia, destacándose como un foco de población joven y en expansión. Valdefuentes presenta el mayor porcentaje de población joven de todo el estudio (20,88%) y un índice de envejecimiento favorable del 0,76, lo que implica que la población de menores de 15 años supera a la de mayores de 65 años, un patrón típico de zonas de nueva urbanización con reciente asentamiento de familias jóvenes.

El distrito de Barajas muestra una estructura más homogénea, caracterizada por una alta concentración de la población adulta o productiva (15-64 años), especialmente en el barrio de Timón (70,99%). A pesar de esta fuerte base laboral, la estructura de edad de Barajas en su conjunto es de tipo madura-envejecida. El barrio de Corralejos, con un índice de envejecimiento del 0,83, presenta el equilibrio más dinámico dentro del distrito, señalando una mayor vitalidad demográfica, aunque sin alcanzar el nivel de Valdefuentes.

Tabla 15. Distribución de la población por edades en el área de estudio.

Distrito/Barrio	Joven (0-14)	Adulta (15-64)	Mayor (65+)	% Joven	% Adulta	% Mayor	Índice de Envejecimiento*
Hortaleza	32.521	132.895	39.766	15,9%	64,8%	19,4%	1,22
Palomas	1.128	4.397	1.493	16,1%	62,7%	21,3%	1,32
Piovera	2.380	9.771	3.304	15,4%	63,2%	21,4%	1,39
Canillas	4.288	26.516	9.636	10,6%	65,6%	23,8%	2,25
Pinar del Rey	5.707	34.614	12.992	10,7%	64,9%	24,4%	2,28
Valdefuentes	15.264	46.220	11.630	20,9%	63,2%	15,9%	0,76
Barajas	7.144	34.285	8.183	14,4%	69,1%	16,5%	1,15
Timón	1.666	8.804	1.930	13,4%	71,0%	15,6%	1,16
Corralejos	1.305	5.378	1.080	16,8%	69,3%	13,9%	0,83

\*La tabla solo refleja aquellos barrios que intervienen en el área de estudio. Quedan excluidos los barrios Apóstol Santiago (Hortaleza) y Alameda de Osuna, Casco Histórico de Barajas y Aeropuerto (Barajas).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE.

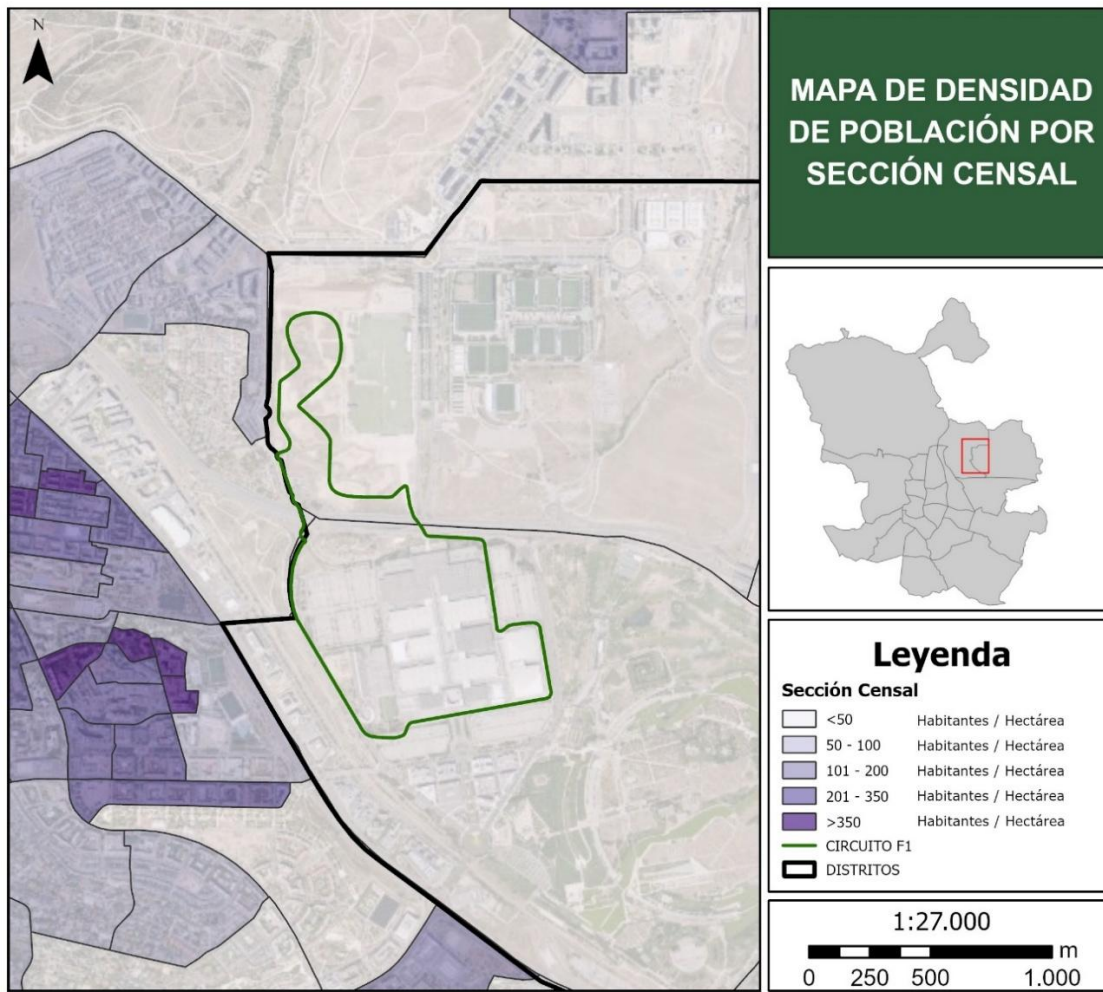
## Área de estudio

Tras caracterizar la estructura demográfica general por barrios, se descenderá a la escala de la sección censal para comprender la distribución espacial de la población y las densidades reales dentro del área de estudio. Este análisis cartográfico permite identificar los núcleos residenciales de máxima concentración y las zonas menos pobladas, estableciendo un contexto espacial más preciso para la evaluación del impacto acústico.

Según los datos censales, el área de estudio tiene una población de 50.646 habitantes, el 16,4% (8.306 habitantes) representa la población menor de 18 años y el 23,1% (1.170 habitantes) la mayor de 65 años.

Los datos han sido obtenidos del INE, pero en este caso se han tratado en ArcGIS Pro para obtener una representación cartográfica que permita identificar patrones de densidad poblacional:

Ilustración 19. Distribución de la población por secciones censales.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE.

En base a la representación cartográfica (Ilustración 19) es posible apreciar como la mayor parte de la población del área de estudio se concentra en el distrito de Hortaleza. Dentro del mismo, son los barrios de Canillas y Pinar del Rey los que mayor densidad poblacional presentan, llegando en algunas secciones censales a superar los 500 Hab/hectárea. Se trata de áreas donde las edificaciones se encuentran en altura, con edificios que superan los 10 pisos y donde las calles son realmente estrechas. Su cercanía con el circuito resalta la necesidad de centrarse en dicha área ante los posibles impactos que pueda originar, especialmente en la primera línea de edificios que acaparán la mayor parte del impacto sonoro.

El barrio de Valdefuentes también presenta secciones con población considerable, sobre todo en las proximidades del circuito (parte noroeste del mismo). Se trata de un área de especial interés debido a su gran proximidad con el circuito y las posibles afecciones del mismo. La presencia de viviendas aisladas y unifamiliares en esta zona hacen de la misma un entorno no tan densamente poblado; sin embargo, son multitud las familias que viven allí, por lo que se debe tener muy en cuenta el impacto que puede provocar el circuito en esta zona.

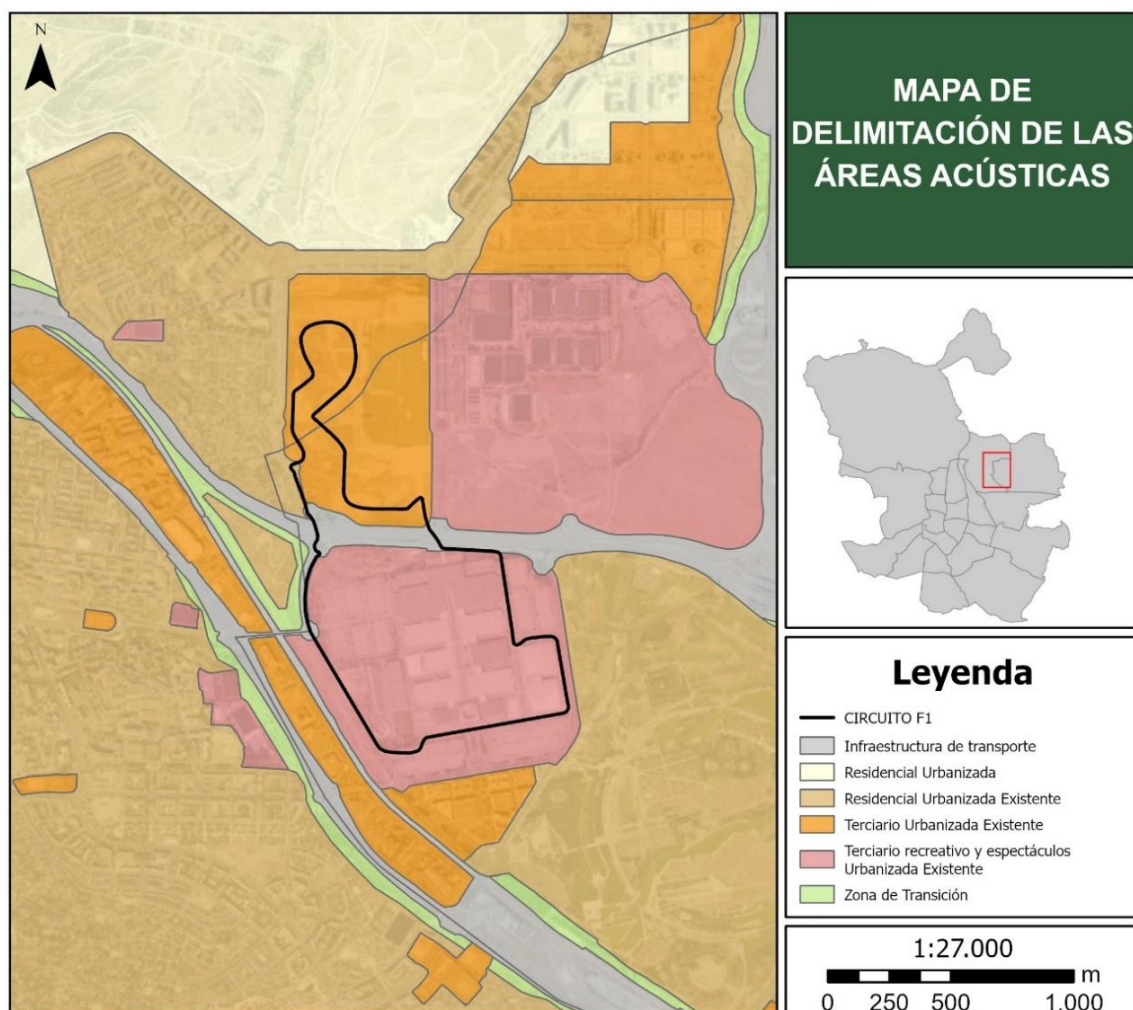
Por último, los barrios del distrito de barajas que conforman el área de estudio tienen muy poca población, ya que mantienen mayoritariamente otros usos en vez de ser zonas residenciales como los de Hortaleza.

### 3.8. Áreas OCA

Las Áreas de Objetivo de Calidad Acústica (OCA) constituyen una herramienta fundamental para la gestión del ruido ambiental en el territorio, ya que permiten establecer los niveles de calidad acústica en función del uso predominante del suelo. De acuerdo con la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, y su desarrollo mediante el Real Decreto 1367/2007, el territorio municipal se divide en diferentes áreas acústicas con el fin de fijar límites de inmisión sonora adecuados a cada tipología de uso.

Para el presente estudio se ha identificado la zonificación acústica correspondiente al ámbito que bordea el circuito urbano de Fórmula 1 de Madrid (Ilustración 20). La información utilizada procede del Geoportal del Ayuntamiento de Madrid, que ofrece la cartografía oficial de las áreas OCA del municipio. A partir de estos datos, se analizan las áreas acústicas incluidas en el entorno de estudio y su grado de compatibilidad con las actividades previstas en la zona.

Ilustración 20. Zonificación acústica correspondiente al área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Se identifican principalmente áreas clasificadas como “Terciario recreativo y espectáculos urbanizada existente”, “Terciario urbanizada existente”, “Residencial urbanizada existente”, “Residencial urbanizada”, “Infraestructura de transporte” y pequeñas “Zonas de transición”.

El trazado del circuito discurre mayoritariamente por suelos de uso terciario, tanto urbanizado existente como recreativo y de espectáculos, donde se concentran equipamientos y espacios destinados a eventos o actividades públicas como es el caso del festival Mad Cool. Las áreas terciarias urbanizadas existentes están caracterizadas por un uso principalmente empresarial, comercial y de servicios, que actúan como un cinturón intermedio entre el circuito y los sectores residenciales.

Las áreas clasificadas como residencial urbanizada existente son las que albergan la mayor parte de la población, ya que se corresponden con los tejidos urbanos consolidados del distrito de Hortaleza, al oeste. Estos sectores incluyen edificaciones residenciales y dotaciones de barrio, configurando los principales núcleos habitados próximos al trazado del circuito. Su localización, en algunos casos, es colindante con tramos del circuito por lo que constituyen los sectores donde la gestión acústica adquiere una mayor relevancia.

Es importante señalar que las categorías de uso del suelo representadas en el mapa acústico no deben interpretarse de forma literal desde el punto de vista urbanístico. Estas denominaciones no describen el uso real o la calificación urbanística del terreno, sino que corresponden a zonas acústicamente homogéneas, definidas en función de los niveles de ruido permitidos y las características del entorno sonoro predominante, según lo establecido en el Decreto 1367/2007, que desarrolla la Ley 37/2003 del Ruido.

Por ello, pueden encontrarse casos en los que determinados espacios públicos o zonas verdes aparezcan incluidos dentro de categorías como “Residencial Urbanizada Existente” o “Terciario Urbanizado”. Esto ocurre porque dichas áreas comparten condiciones acústicas similares a las de los entornos residenciales o terciarios.

Un ejemplo de ello es el Parque Juan Carlos I, que pese a ser una zona verde dotacional desde el punto de vista urbanístico, se integra dentro de una zona acústica residencial debido a su localización y a los niveles sonoros característicos de su entorno.

En última instancia, se observa la presencia de corredores de infraestructura de transporte que atraviesan parte del ámbito, asociados a las principales vías de la M-40 y M-11. Ligadas a ellas existen algunas zonas de transición que conectan áreas de diferente uso del suelo.

### 3.9. Pantallas acústicas

Para garantizar una simulación precisa de la propagación sonora, resulta imprescindible incorporar al modelo las barreras acústicas que ya se encuentran instaladas en el entorno. Estas infraestructuras juegan un papel fundamental en la atenuación del ruido generado por las grandes vías de comunicación, y actúan como obstáculos físicos que interrumpen la propagación del ruido entre la fuente (tráfico rodado) y los receptores (zonas residenciales).

#### Ubicación

Gracias al uso de ortofotografías y herramientas de "Street View" se realiza una identificación visual y cartográfica de las pantallas acústicas existentes. Las principales barreras identificadas se

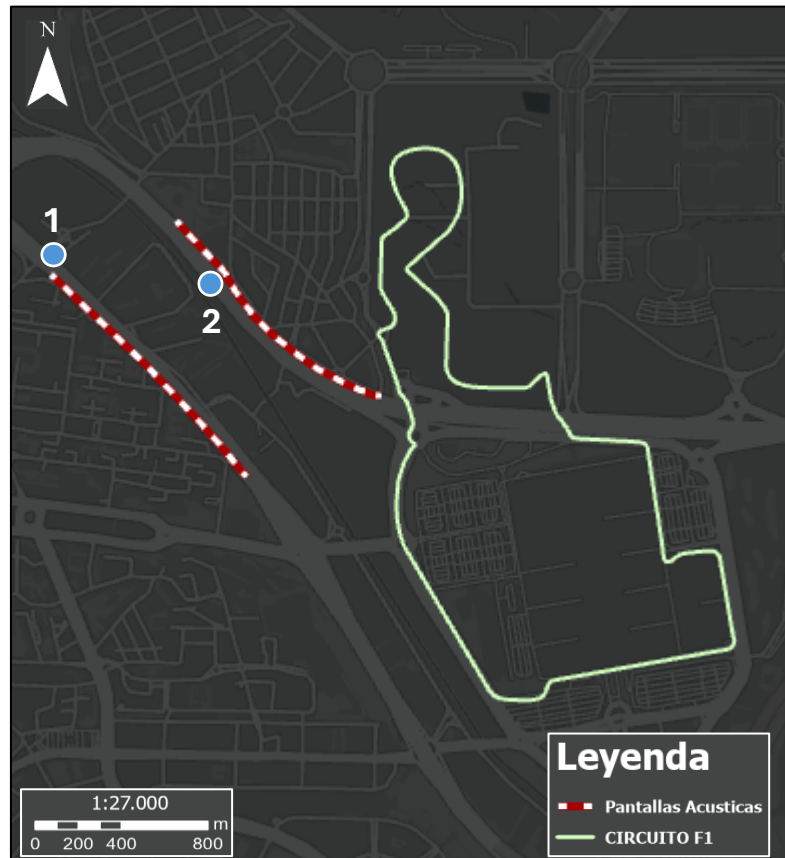
sitúan en los márgenes de las infraestructuras viarias de alta capacidad (Ilustración 21) que atraviesan el área de estudio, concretamente:

- **Pantalla fonoabsorbente M-40:** Se trata de una infraestructura de hormigón armado de gran envergadura. Su geometría se compone de un muro vertical de 5 metros de altura, rematado superiormente por un gran voladizo o "visera" que se proyecta horizontalmente unos 3 metros hacia el interior de la calzada. Por encima del voladizo hay 2 metros más de hormigón con la finalidad de proteger del ruido aquellas viviendas que se encuentren en los pisos superiores de los edificios. Cabe destacar que esta pantalla tiene un segundo uso, actuando en su superficie como carril bici.
- **Pantalla fonoabsorbente M-11:** En este tramo, la solución adoptada es diferente. Se observan barreras formadas por paneles metálicos modulares. A diferencia de la M-40, estas pantallas tienen una altura más reducida, de aproximadamente 3 metros, pero se encuentran instaladas sobre la coronación del talud lateral, más alejadas del borde de la calzada. Esta disposición aprovecha la elevación natural del terreno para aumentar la altura efectiva de apantallamiento respecto al receptor.



Ilustración 21. Localización de las pantallas acústicas existentes.

Fuente: Elaboración propia e imágenes de Google Earth



## Implementación en CadnaA

La ubicación se define mediante polilíneas sobre el Modelo Digital del Terreno (MDT). En el caso de las pantallas de la M-11, se debe digitalizar la línea sobre la cresta del talud y no al borde de la carretera, para que el software tome correctamente la cota de cimentación elevada.

Para la configuración de la altura y la geometría de cada pantalla, es necesario realizar el diseño manualmente dentro de las polilíneas “pantalla acústica” ya creadas:

- **Pantalla M-40 (1):** Para la pantalla de la M-40, se toma 1 metro de distancia desde el margen de la carretera para la creación de la pantalla. Una vez creada, es necesario darle la geometría de tipo voladizo hacia el interior de la carretera, con un ancho de 3 metros. A su vez, se le da una altura de 5 metros, recreando así las condiciones más realistas posibles dentro del software.

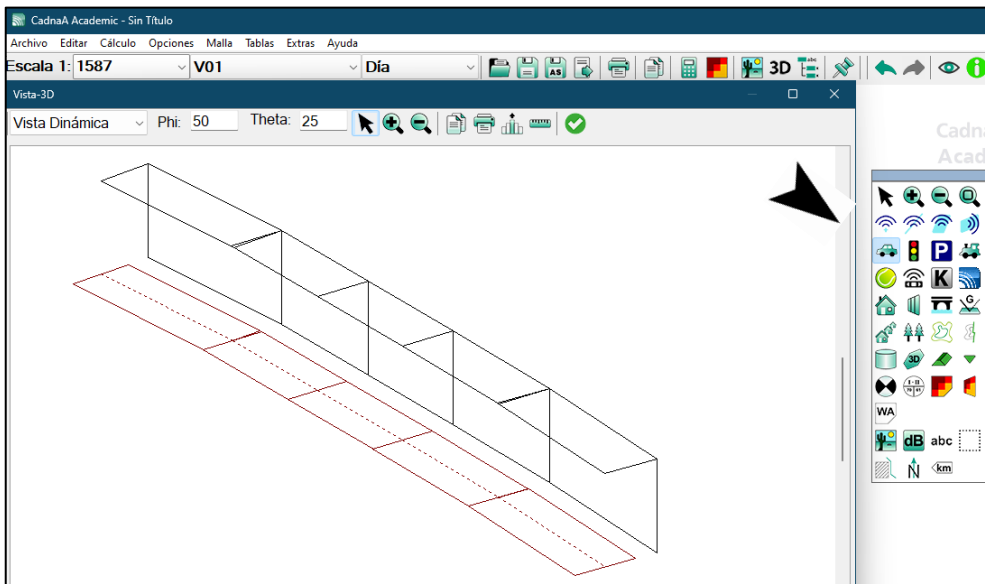


Ilustración 22. Diseño de la pantalla acústica de la M-40 en CadnaA.

- **Pantalla M-11 (2):** El procedimiento es similar, pero en este caso se debe trazar a mano ya que su distancia con respecto a la carretera varía. En este caso solo es necesario establecer una altura de pantalla de 3 metros ubicados sobre el talud lateral.

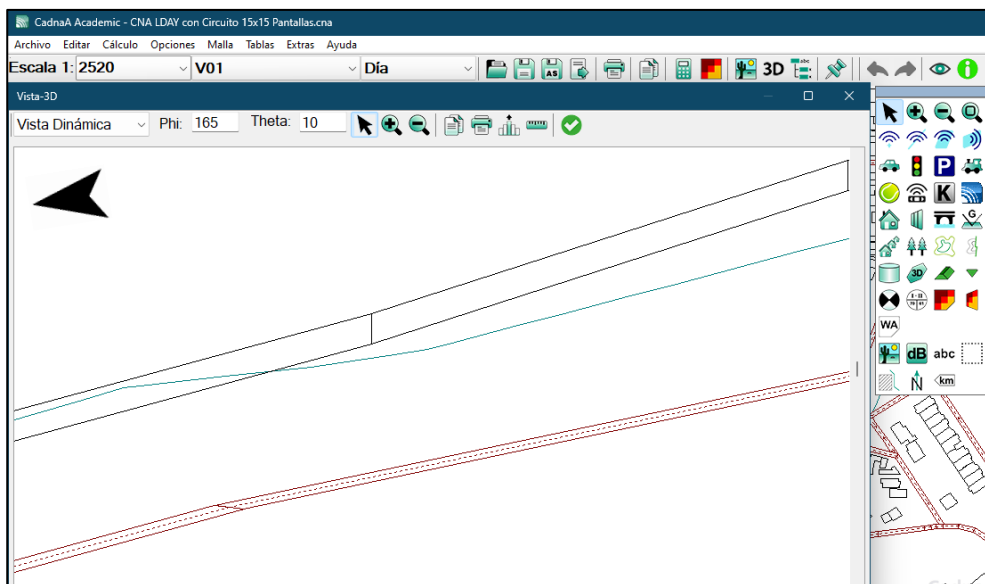


Ilustración 23. Diseño de la pantalla acústica de la M-11 en CadnaA.

## 4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos evalúan de manera cuantitativa y cualitativa el impacto acústico del circuito urbano MADRING sobre su entorno. A partir de los datos generados, es posible identificar tendencias, áreas críticas y posibles implicaciones sobre la población y el cumplimiento normativo.

### 4.1. Mapas de ruido

En este apartado se exponen los resultados cartográficos derivados de la modelización acústica realizada mediante el software CadnaA. La representación se efectúa a través de mapas de áreas isófonas, los cuales ilustran la distribución espacial de los niveles de presión sonora continua equivalente (LAeq) en el ámbito de estudio.

Con el objetivo de caracterizar con precisión el escenario previsto para la celebración del evento (programado para el domingo 13 de septiembre de 2026), los datos de entrada del modelo se basan en aforos vehiculares correspondientes a domingos del mes de septiembre, tal y como se detalla en la metodología.

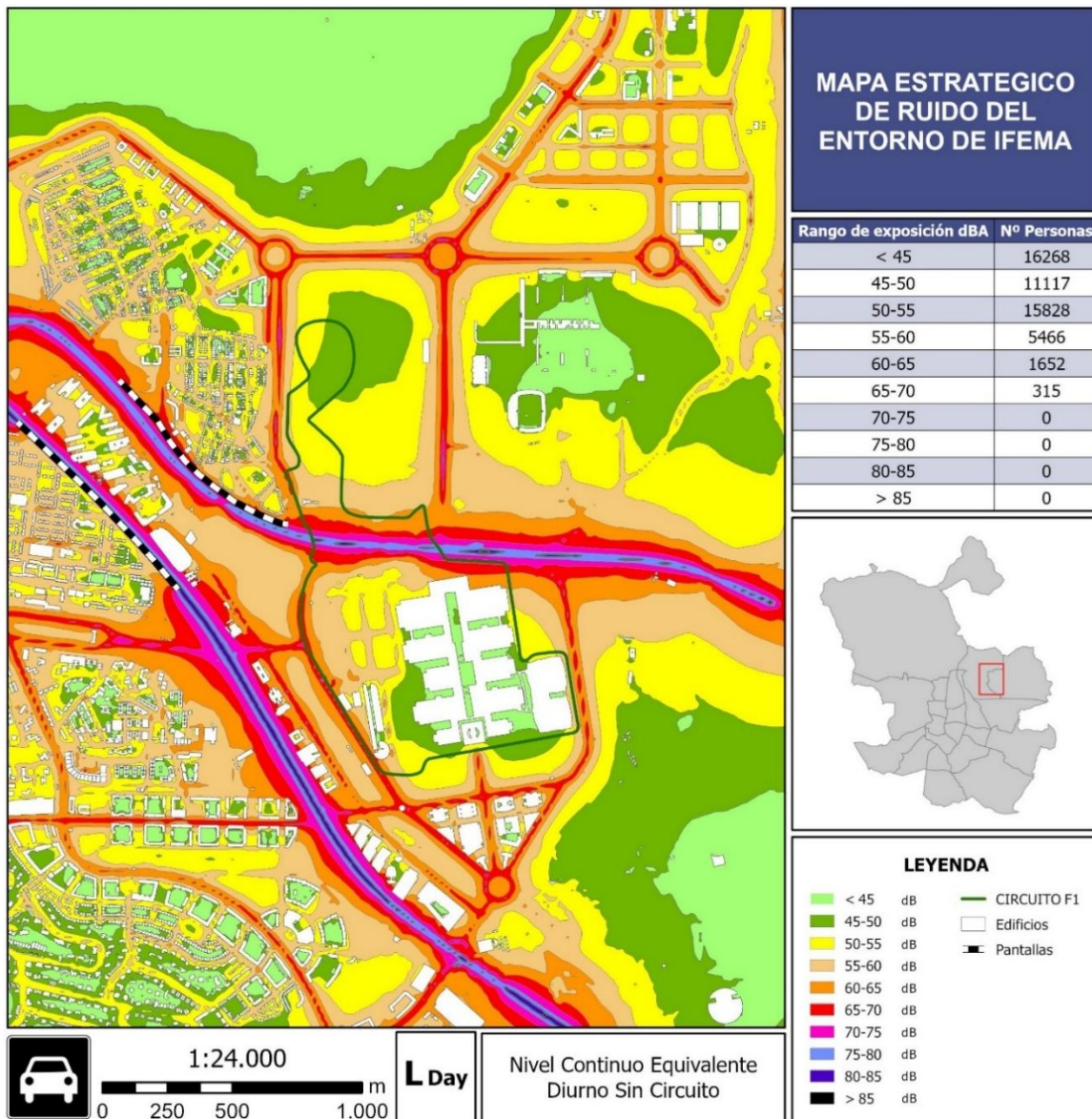
El análisis se estructura en cuatro representaciones cartográficas, divididas en dos periodos de evaluación temporal para verificar el cumplimiento de los distintos criterios normativos: el Periodo diario (evaluación promedio de 12 horas) y el Periodo específico del evento (evaluación de las 2 horas de actividad).

Para la correcta interpretación de dicha cartografía, se emplea una escala cromática normalizada que agrupa los niveles de presión sonora en intervalos de 5 dBA, definiendo un total de 10 áreas isófonas o bandas acústicas.

Las áreas isófonas delimitan superficies continuas dentro de las cuales el nivel de inmisión sonora oscila dentro de un mismo rango específico. La disposición espacial de estas áreas permite visualizar el comportamiento de la propagación acústica sobre el territorio: la sucesión de bandas estrechas indica un gradiente de atenuación elevado (típico ante barreras o frentes edificados que fuerzan una caída rápida de decibelios), mientras que la presencia de áreas extensas y homogéneas evidencia una dispersión acústica sostenida, propia de entornos abiertos donde la onda sonora viaja sin obstáculos.

## Evaluación del Periodo diario (07:00 – 19:00 h)

Ilustración 24. Mapa de ruido Periodo Diurno sin operatividad del circuito.

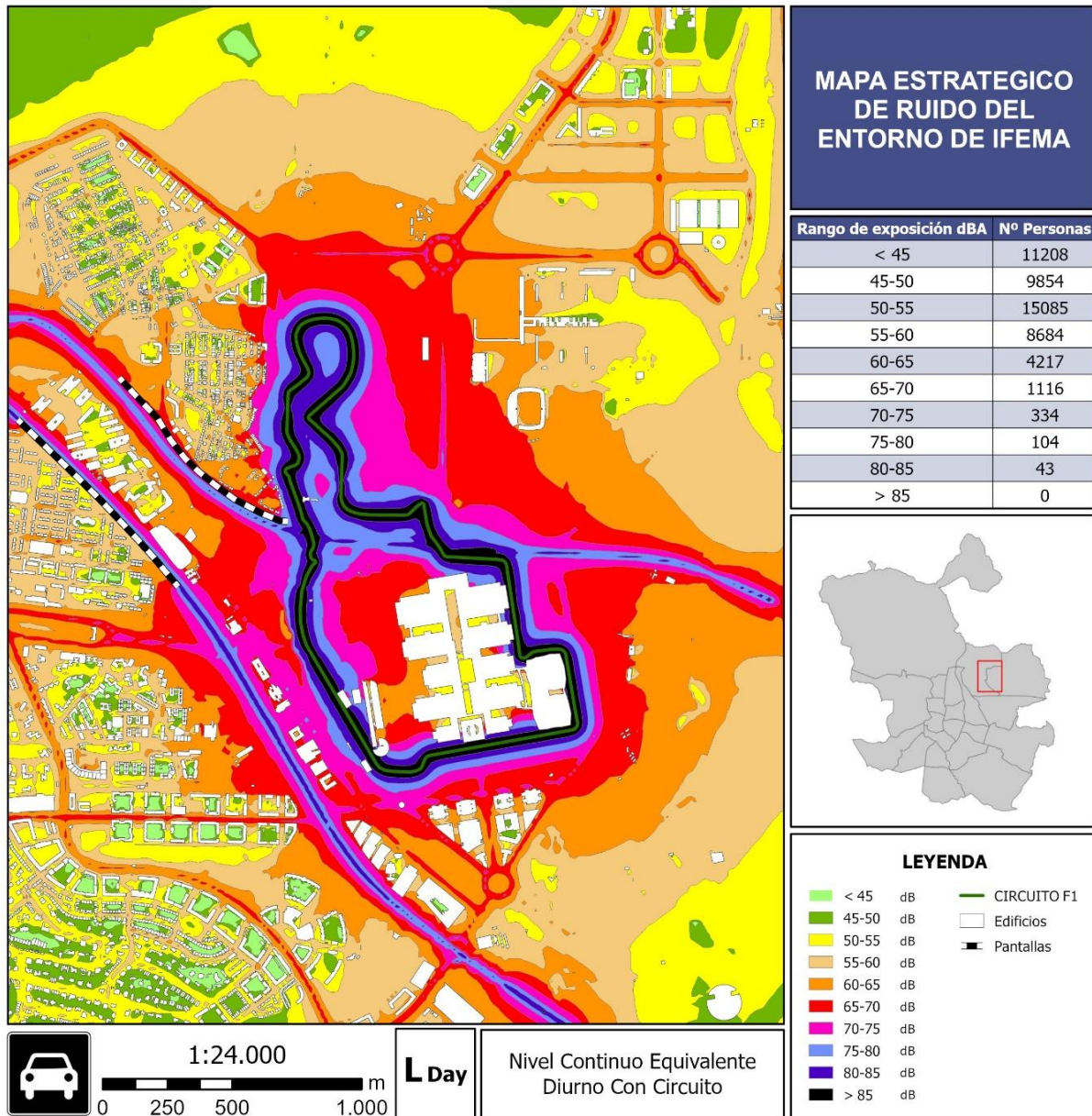


Fuente: Elaboración propia

La modelización evidencia que el ambiente sonoro está estructuralmente definido por los grandes ejes viarios. Se observan niveles de presión sonora elevados distribuidos estrictamente a las calzadas de la M-40 y la M-11 y sus márgenes inmediatos. Sin embargo, el mapa revela una eficaz atenuación hacia las zonas residenciales de Hortaleza con motivo de la presencia de la pantalla acústica o debido a la distancia entre las viviendas y los ejes viarios. Esto confirma que, en la situación actual sin evento, el modelo de distribución urbano mantiene a la gran mayoría de la población (43.000 personas) en rangos de exposición bajos (< 55 dBA), cumpliendo con los estándares de confort acústico.

En este escenario, el máximo valor registrado en vivienda residencial es de 69,4 dB, ubicado en el extremo Este de la Calle Silvano por la cercanía a la M-40.

Ilustración 25. Mapa de ruido Periodo Diurno con operatividad del circuito.



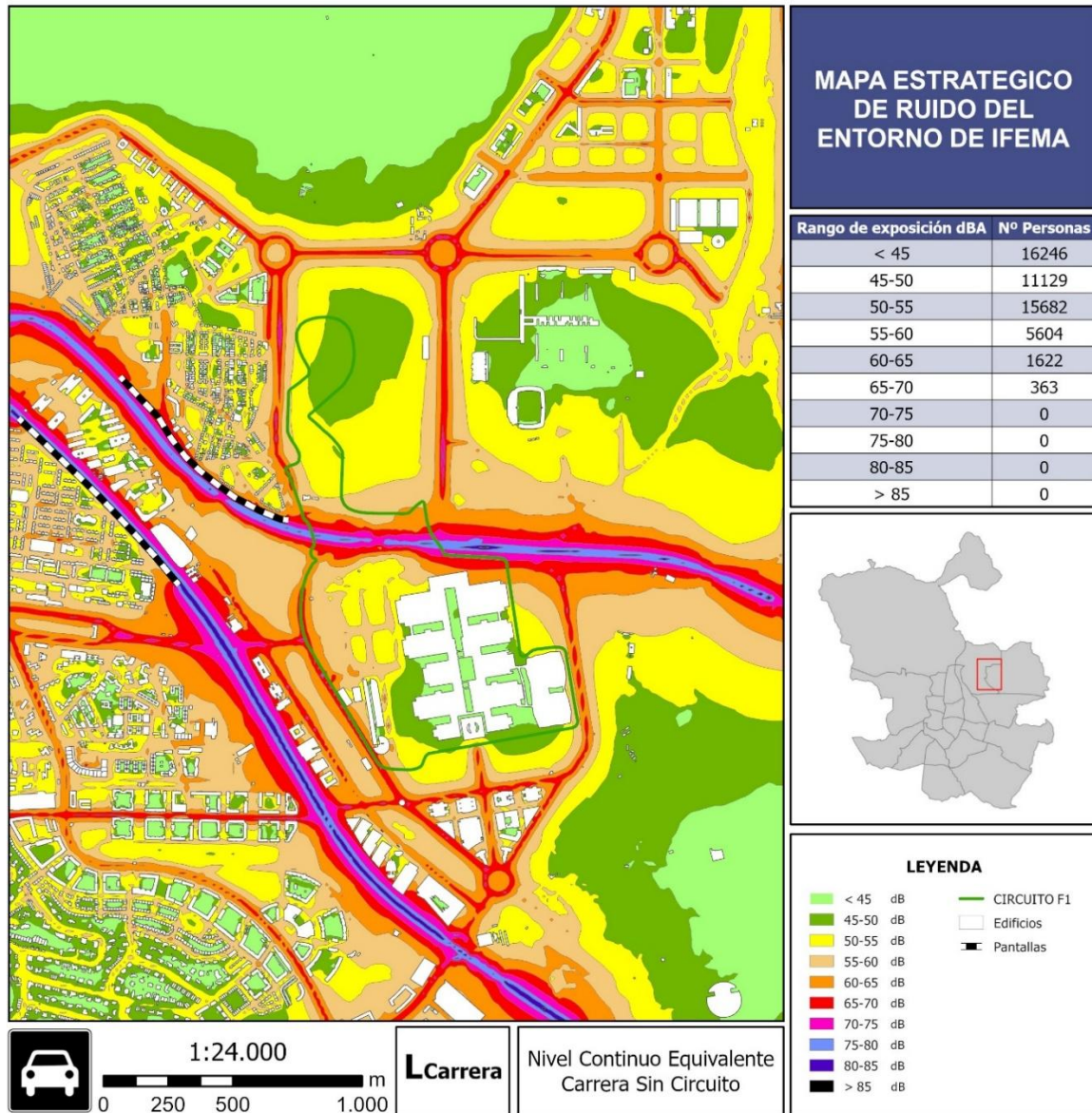
Fuente: Elaboración propia

La modelización del escenario operacional evidencia una transformación del ambiente sonoro, donde la energía de los monoplazas se superpone al ruido de fondo, extendiendo los niveles elevados hacia todo el entorno de IFEMA y penetrando en Valdebebas. En este escenario la atenuación por distancia pierde eficacia ante la magnitud de la nueva fuente, siendo las propias edificaciones de primera línea las que absorben la mayor parte de la energía acústica.

Esto confirma un impacto significativo en la exposición poblacional: el número de personas sometidas a niveles superiores a 55 dBA prácticamente se duplica, alcanzando los 14.500 habitantes (aprox. 29% del total). Los barrios de Canillas y Valdefuentes son los más acusados debido a su cercanía al trazado, llegando en determinadas viviendas del extremo sur de Valdefuentes a alcanzar los 82 dB.

## Evaluación del Periodo específico del evento (15:00 - 17:00 h)

Ilustración 26. Mapa de ruido Periodo de Carrera sin operatividad del circuito).

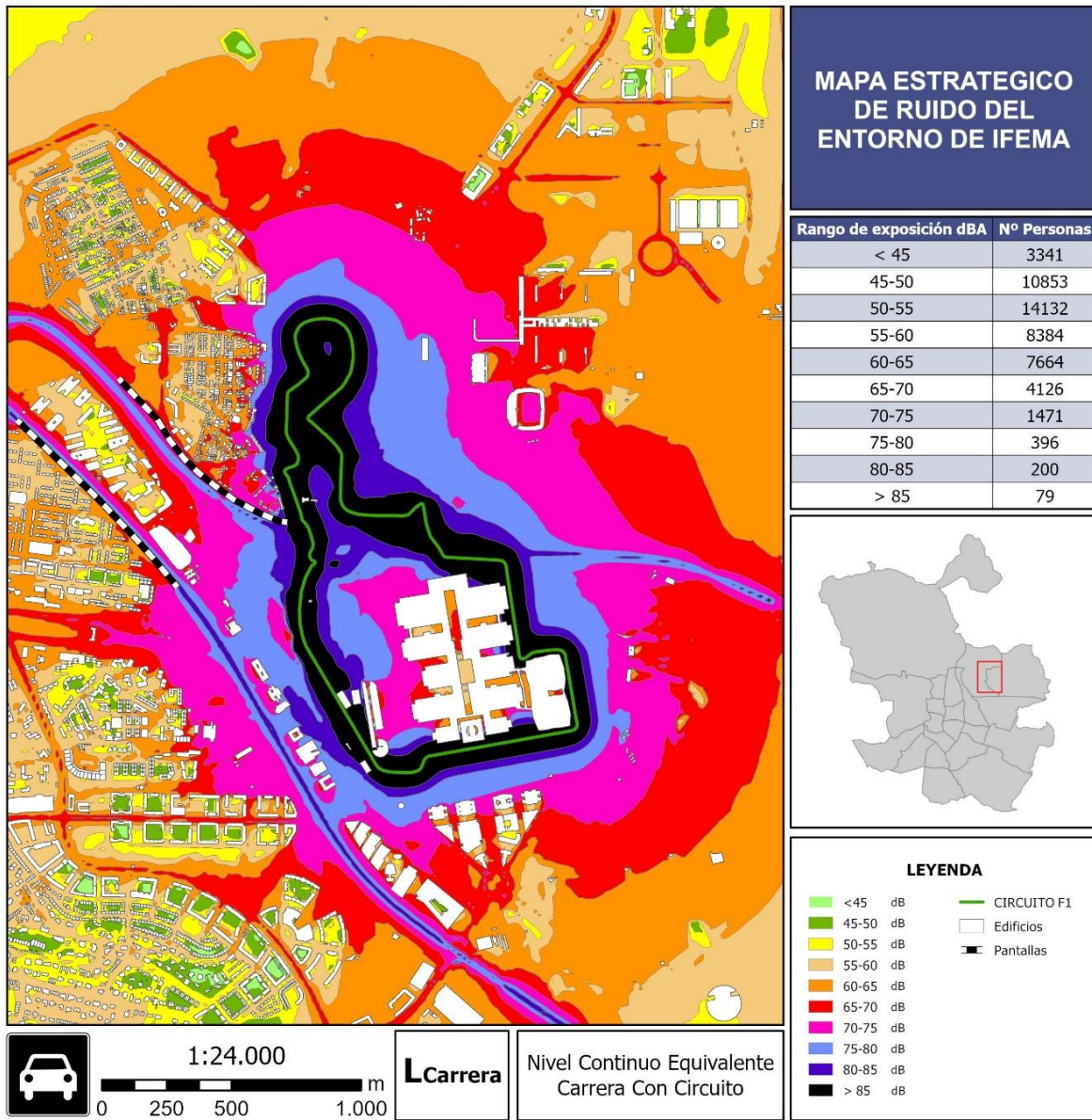


Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo que sucede en el periodo diario sin el circuito operativo, el ambiente sonoro del área de estudio sigue estando dominado por las calles y autopistas que lo atraviesan. Las zonas verdes, que indican los niveles más bajos de exposición, coinciden con grandes pulmones verdes como el Parque de Juan Carlos I o Valdebebas, sin embargo, los patios interiores de las urbanizaciones también actúan como refugios acústicos.

Más allá de los grandes ejes de la M-40 y la M-11, el mapa revela que el volumen de tráfico en el tejido urbano genera una repercusión sonora notable. Arterias principales como la avenida de los Andes, la avenida de Machupichu, la calle Silvano o la calle Aconcagua presentan bandas de color naranja y rojo (60-70 dB). En este caso, el máximo valor registrado en vivienda residencial es de 69 dB.

Ilustración 27. Mapa de ruido Periodo de Carrera con operatividad del circuito.



Fuente: Elaboración propia

Por último, el escenario más extremo lo presenta la evaluación del periodo de carrera con el circuito operativo. En este caso al no promediarse con el resto del día, el ruido emitido por los automóviles es capaz de tener repercusión incluso fuera de los límites del área de estudio.

En términos generales, todos los barrios ven incrementados sus niveles de inmisión. Un total de 6.243 personas (12,3% de la población) soportarían niveles superiores a los 65 dB. Sin embargo, lo más alarmante es la presencia de 279 personas expuestas a más de 80 dB de las cuales 79 están por encima de los 85 dB. Son sin duda los barrios de Valdefuentes, Canillas, y parte de Piovera los más acusados por el evento. En el caso de Valdefuentes, donde el circuito pasa a escasos 40 metros de las viviendas, se han llegarían a registrar valores de 89,7 dB, un valor que excede significativamente los umbrales de confort acústico recomendados para zonas residenciales.

## 4.2. Comparación con límites normativos

Una vez completada la simulación acústica predictiva mediante el software CadnaA, los resultados detallan la distribución espacial de los niveles de ruido en el área de estudio. Si bien la presentación cartográfica de estos resultados, a través de los mapas de isófonas, ofrece una visualización global del impacto, resulta imprescindible realizar un análisis intrínseco y numérico de los niveles de inmisión.

Es este apartado se busca determinar con precisión la magnitud de las superaciones de los límites legales y cuantificar la afección territorial (superficie) para el uso residencial, contrastando los valores obtenidos entre la situación de un día o periodo normal y de uno carrera.

Se debe tener en cuenta que el uso residencial es considerado el conjunto de áreas residenciales, que en su totalidad abarcan una superficie de 7,34 km<sup>2</sup>. Esta superficie está conformada por áreas residenciales urbanizadas (5,41 km<sup>2</sup>) y residenciales urbanizadas existentes (1,93 km<sup>2</sup>) tal y como se detalla en la Ilustración 20.

### Umbrales de evaluación

Antes de la presentación de los mapas y resultados, se recuerda que los límites máximos admisibles para el uso residencial que debe cumplir el circuito, según los criterios de inspección del Artículo 25 del RD 1367/2007, son:

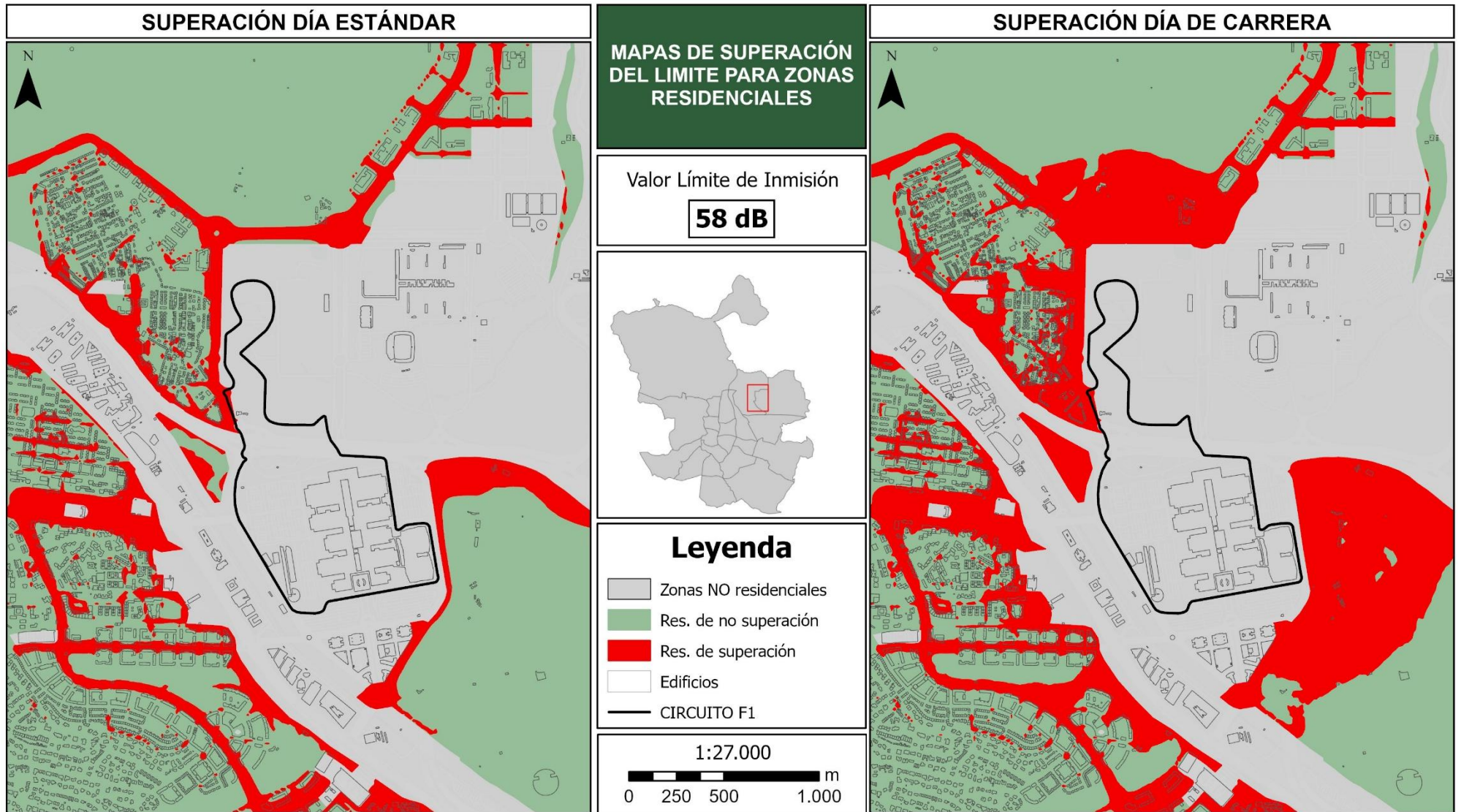
- Criterio diario (Limite +3 dB): el nivel sonoro promedio del día (LAeq, día) no debe superar los 58 dBA (55 dBA + 3 dB).
- Criterio en evento (Límite + 5 dB): El nivel sonoro durante el tiempo específico de la actividad (carrera, 15:00 – 17:00 h) no debe superar los 60 dBA (55 dBA + 5 dB).

### Evaluación del cumplimiento diario (58 dBA)

En primer lugar, se va a determinar si el ruido producido por el circuito supera, y en qué medida, el límite de 58 decibelios para el promedio diario (LAeq, día). Para contrastar este impacto, se ha realizado el cálculo de la superación un día normal y de la superación en un día de carrera.

Estos son los resultados:

Ilustración 28. Mapa de áreas de superación del VLI para el Periodo Diario.



Fuente: Elaboración propia

Tal y como se muestra en la Ilustración 28, el análisis espacial sobre la superficie residencial total (7,34 km<sup>2</sup>) revela diferencias estructurales significativas en la distribución del ruido. En condiciones estándar, sin la actividad del circuito, se observa una superficie de superación de 1,23 km<sup>2</sup>, lo que representa el 16,8 % del suelo residencial. No obstante, si se analiza la morfología de esta afección, las zonas de superación siguen patrones lineales y reticulares muy definidos, coincidiendo con la red de grandes ejes viarios. Esto evidencia que, en un día normal, la contaminación acústica se concentra en las carreteras y sus servidumbres inmediatas, permitiendo que los espacios interbloque y el interior de las tramas urbanas funcionen como refugios acústicos donde se cumplen los niveles de calidad.

Sin embargo, la puesta en marcha del evento de Fórmula 1 altera drásticamente este escenario, elevando la superficie de superación hasta los 2,63 km<sup>2</sup>, cifra que abarca el 35,8% de la zona residencial evaluada. Al contrastar ambas cartografías, se detecta que este incremento no se limita a una intensificación en los viales, sino que se produce un efecto de incremento acústico periférico de la energía sonora proveniente del circuito. Esta energía se superpone al ruido de fondo del tráfico, inundando las áreas que anteriormente se mantenían por debajo del umbral.

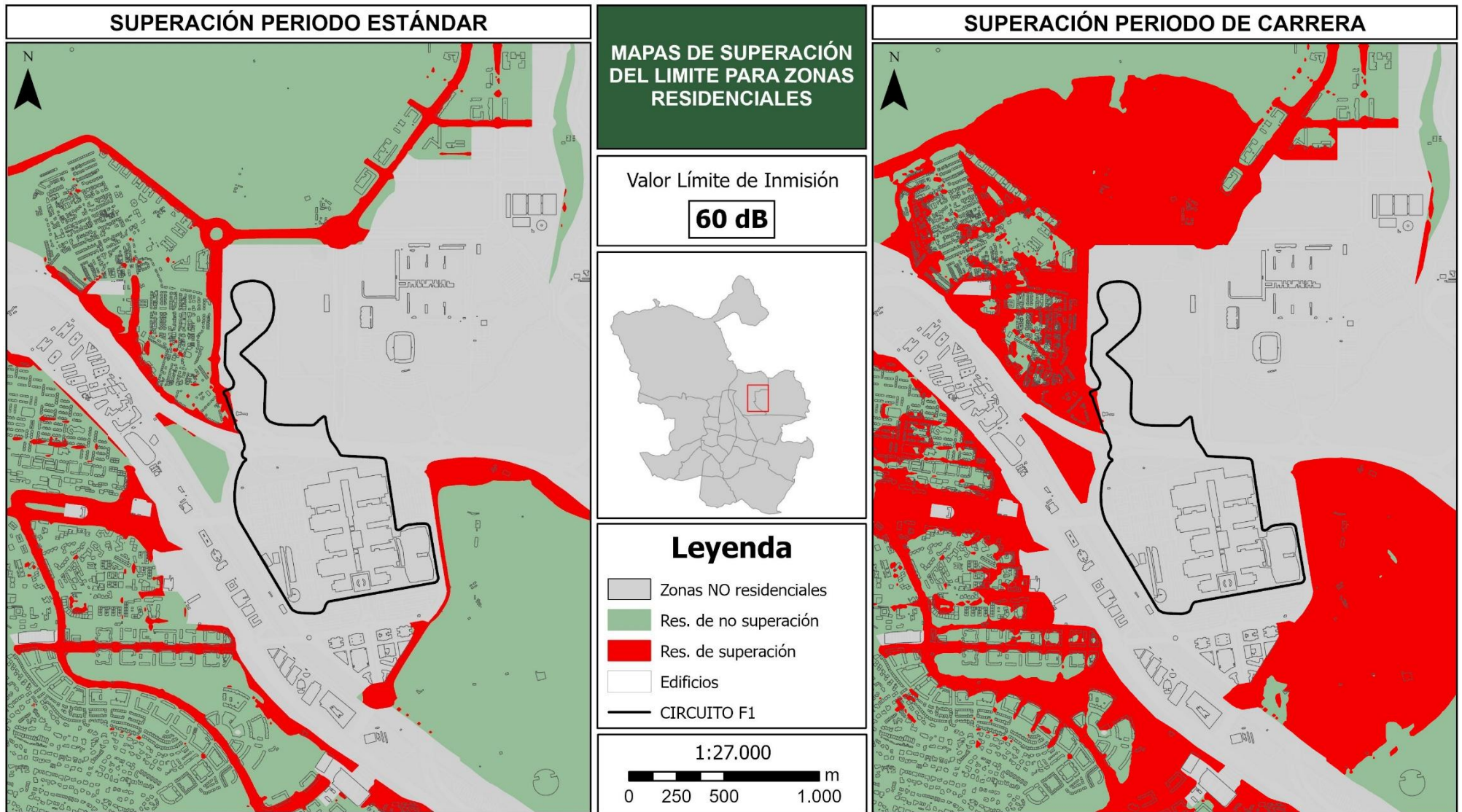
En términos cuantitativos, la actividad del circuito provoca que la superficie expuesta a niveles superiores a 58 dB se duplique, registrando un incremento del 114% respecto al escenario base. Este aumento de 1,4 km<sup>2</sup> adicionales de zona afectada implica una transformación cualitativa del impacto: el ruido deja de ser un fenómeno localizado y asociado a la infraestructura de transporte para convertirse en una afección ambiental generalizada, comprometiendo el cumplimiento normativo en la mayor parte del tejido residencial.

En cuanto a la población afectada, los datos muestran que 3.435 residentes (6,8% del total de población analizada) se verían expuestos a más de 58 dB según el escenario base en el que el circuito no está operativo. En cambio, con el circuito en funcionamiento esta cifra ascendería a 8.613 habitantes (17,0 % del total de población analizada).

### **Evaluación del Cumplimiento Durante el Evento (60 dB)**

En segundo lugar, se determinará si el ruido producido por el circuito supera, y en qué medida, el límite de 60 decibelios para el promedio del periodo específico en el que se lleva a cabo la carrera por medio de LAeq del evento. Para contrastar este impacto, se realizará de igual manera un cálculo que indique la superación un periodo de un día normal y de la superación en un periodo de un día de carrera. Estos son los resultados:

Ilustración 29. Mapa de áreas de superación del VLI para el Periodo de Carrera.



Fuente: Elaboración propia

Complementariamente al análisis diario, se ha evaluado la afección acústica durante la ventana temporal específica de la carrera (15:00 - 17:00 horas), aplicando el límite de 60 dB. En el escenario estándar (sin evento), la superficie de superación dentro de las zonas residenciales se reduce a mínimos, afectando únicamente a 0,84 km<sup>2</sup> (11,4% del área residencial). En este periodo vespertino habitual, la cartografía muestra una situación de bajo impacto, donde el ruido queda estrictamente confinado a la calzada de las arterias principales, dejando la gran mayoría de la trama urbana y los bloques de viviendas en una situación de cumplimiento normativo, libres de niveles de inmisión elevados.

Sin embargo, la situación se invierte radicalmente durante la celebración del Gran Premio. El mapa de superación en periodo de carrera revela una saturación acústica muy superior, alcanzando una superficie afectada de 3,98 km<sup>2</sup>. Esto supone que el 54,2% del suelo destinado a uso vivienda dentro del área de estudio sufriría niveles de ruido superiores a 60 dB durante las dos horas de competición. Si bien la morfología urbana genera un efecto de apantallamiento visible en los patios interiores, como se evidencia en los bloques residenciales de la Calle Silvano, este resulta insuficiente dada la magnitud de la emisión acústica del circuito. Los edificios de primera línea soportan niveles de inmisión tan elevados que no logran disipar la totalidad de la energía acústica incidente, permitiendo que niveles elevados de ruido penetren en las zonas teóricamente protegidas tras la fachada.

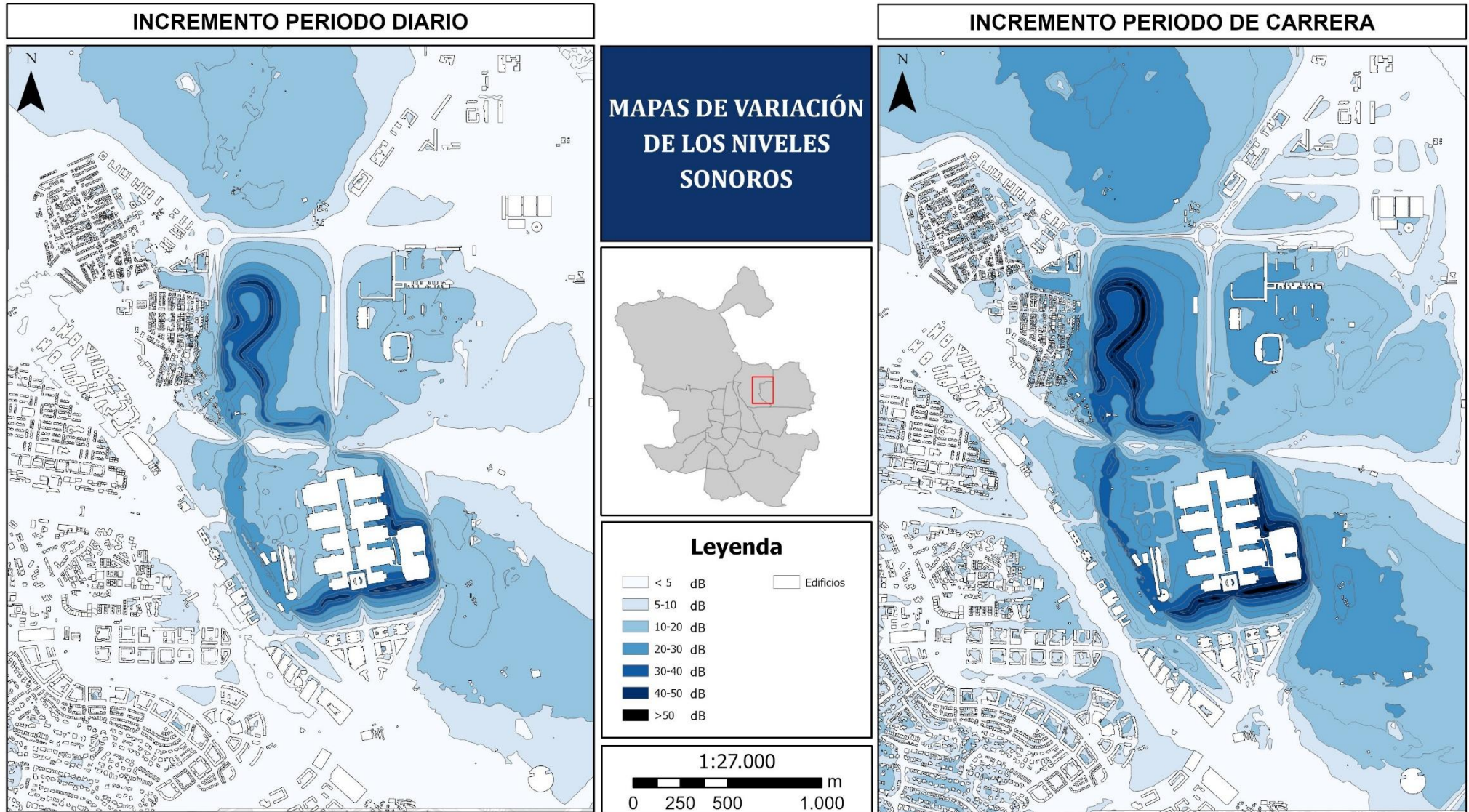
Este incremento masivo de la superficie afectada (que pasa de 0,84 km<sup>2</sup> a 3,98 km<sup>2</sup>) pone de manifiesto la severidad del impacto instantáneo frente al promedio diario. Mientras que el indicador de día (LAeq, día) "diluye" la energía acústica de la carrera al promediarla con las horas de inactividad, este análisis del periodo evento (LAeq, evento) expone la realidad física que perciben los residentes durante la competición: una exposición continuada y generalizada a niveles no permitidos que excede los límites de la infraestructura viaria y compromete la habitabilidad de gran parte del tejido residencial analizado.

En cuanto a la población afectada, los datos muestran que 1.986 residentes (3,9% del total de población analizada) se verían expuestos a más de 58 dB según el escenario base en el que el circuito no está operativo. En cambio, con el circuito en funcionamiento esta cifra alcanza unos niveles bastante alarmantes, ascendiendo a 13.936 habitantes (27,5% del total de población analizada).

### 4.3. Comparación de escenarios

El análisis del impacto acústico requiere no solo la evaluación de los niveles absolutos alcanzados, sino también la cuantificación precisa de la alteración que la nueva actividad introduce en el entorno preexistente. Para ello, en este apartado se presentan los mapas de variación o diferenciales ( $\Delta L$ ), una herramienta diagnóstica que resulta de la resta de energía acústica entre los escenarios operativos y sus respectivos escenarios base. Esta comparativa se realiza sobre los dos horizontes temporales ya definidos: el periodo diario (promedio de 12 horas) y el periodo específico de carrera (ventana crítica de 2 horas).

Ilustración 30. Mapa de variación de los niveles sonoros.



Fuente: Elaboración propia

Los incrementos más extremos, superiores a los 50 dB, se localizan de forma adyacente al trazado del circuito, donde la emisión de los monoplazas eclipsa por completo cualquier fuente preexistente. Además de esta área, existen dos zonas que presentan un incremento de decibelios muy notable, se trata de los parques de Juan Carlos I (al sudoeste) y Parque Forestal de Valdebebas-Felipe VI (al norte). En estos espacios, la ausencia de obstáculos edificados y un ruido de fondo originalmente bajo favorecen que el incremento sea máximo, transformando el ambiente acústico de estas áreas.

Por el contrario, el modelo refleja variaciones mínimas, generalmente inferiores a los 5 dB, en los principales corredores de transporte como la M-40 y la M-11. Este fenómeno responde a que dichas vías ya presentan los niveles de emisión más elevados en el escenario base debido al tráfico intenso, lo que provoca que la contribución adicional del circuito sea porcentualmente menor en comparación con la energía sonora ya presente. En contraste, en las fachadas residenciales de primera línea de Valdebebas y Hortaleza, los aumentos se sitúan entre los 10 y 30 dB.

La comparativa técnica entre ambos mapas revela una distinción en función del promedio temporal empleado. En el mapa del periodo diario, la variación no es tan acusada debido a que la energía sonora del evento se diluye en un intervalo de 12 horas. Sin embargo, el mapa del periodo de carrera muestra una diferencia mayor y una superficie de incremento más saturada. Al promediar únicamente las dos horas de actividad, se elimina la dilución temporal y se manifiesta la carga sonora real y directa que incide sobre el entorno urbano. Esta comparativa demuestra que, si bien el indicador diario es el estándar normativo, el análisis del periodo del evento refleja con mayor veracidad la exposición acústica que experimentarán los receptores durante la competición.

### 4.4. Población expuesta

#### Método de cálculo

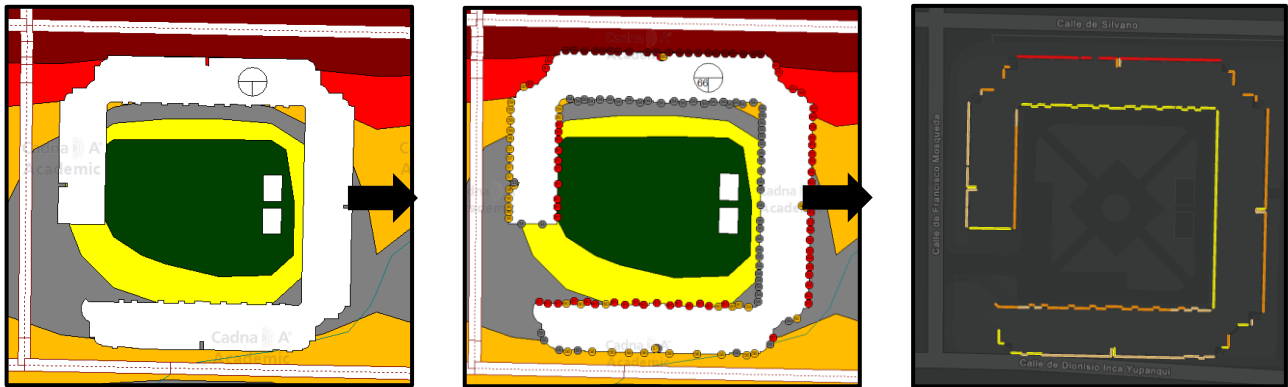
Para cuantificar con precisión el impacto acústico sobre los residentes, no basta con observar los mapas de isófonas en planta; es necesario determinar los niveles de inmisión reales que inciden sobre las viviendas. Para ello, se ha seguido una metodología específica de cálculo de niveles en fachada mediante el software CadnaA, complementada con un análisis espacial en ArcGIS Pro.

El procedimiento de cálculo de los niveles en fachada parte de la obtención de los datos mediante la herramienta de "Evaluación de Edificios" del software CadnaA. Este procedimiento requiere seleccionar exclusivamente las edificaciones residenciales, ya que la población es el principal objeto de estudio de este apartado. Sobre las fachadas de estos edificios se generan receptores virtuales, configurados bajo los siguientes parámetros técnicos:

- Segmentación horizontal: Longitud de receptor de 10 metros a lo largo de las fachadas como equivalencia a la anchura media de una vivienda estándar.

- Segmentación vertical: Altura de receptor de 2,8 metros sobre la cota de las fachadas como equivalencia a la altura media de una vivienda estándar.

Ilustración 31. Procedimiento de cálculo de niveles registrados en fachada.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados numéricos obtenidos son exportados y procesados mediante Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS Pro). Esta integración permite generar un modelo tridimensional del impacto acústico, esencial para analizar la distribución vertical del ruido en un entorno urbano consolidado.

Gracias a esta representación en 3D (Ilustración 32), es posible identificar con precisión los fenómenos de apantallamiento entre volúmenes edificatorios y determinar la orientación de las fachadas más expuestas a la fuente sonora. A continuación, se muestra un ejemplo de las visualizaciones tridimensionales resultantes, donde se aprecia la influencia de la altura y la disposición de los bloques en la atenuación o exposición al ruido del circuito.

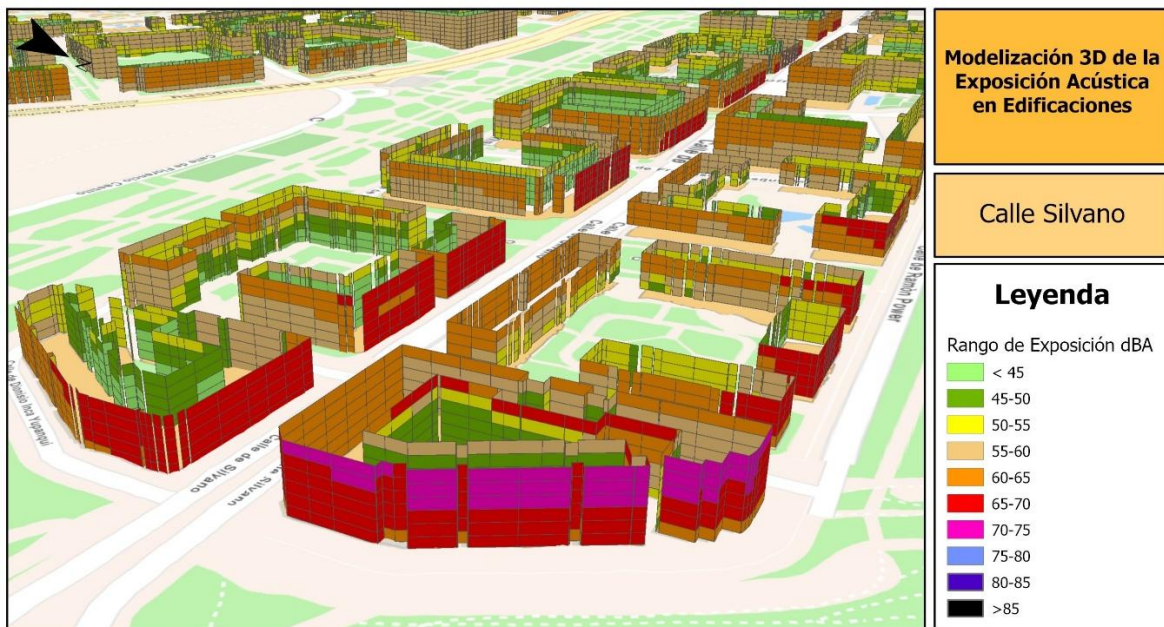


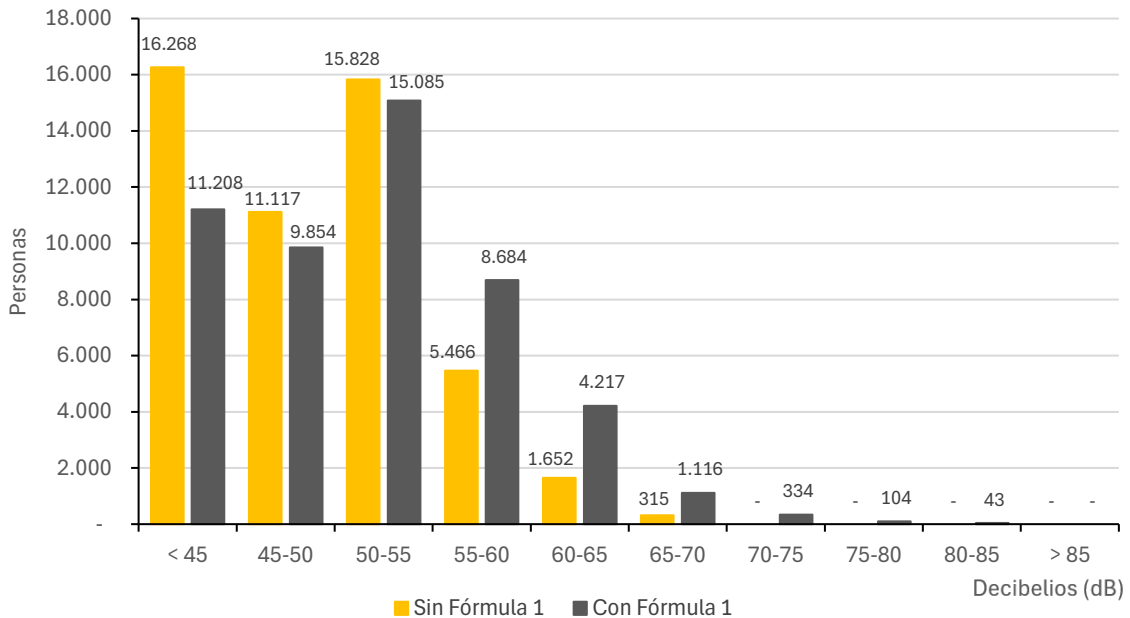
Ilustración 32. Representación 3D de la exposición acústica en fachadas de la calle Silvano durante el periodo diario con el circuito operativo.

Fuente: Elaboración propia

## Resultados promedio diario (07:00 – 19:00 h)

Una vez procesados los niveles de inmisión en fachada para los 50.646 habitantes modelados, se ha generado una comparativa directa entre el escenario base y el escenario operacional promediado en 12 horas. La Gráfica 1 muestra la distribución de la población en función de los rangos de nivel sonoro, permitiendo visualizar el impacto acústico neto del evento sobre las áreas residenciales.

Gráfica 1. Comparación de población expuesta del periodo diario.



Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, los resultados muestran una degradación de la calidad ambiental en las áreas residenciales más protegidas. Mientras que en la situación actual el 85,3% de la población (43.213 personas) reside en zonas con niveles inferiores a 55 dBA, la actividad del circuito reduce este grupo al 71,4%. Esto implica que aproximadamente 7.000 vecinos perderían su condición de "zona tranquila".

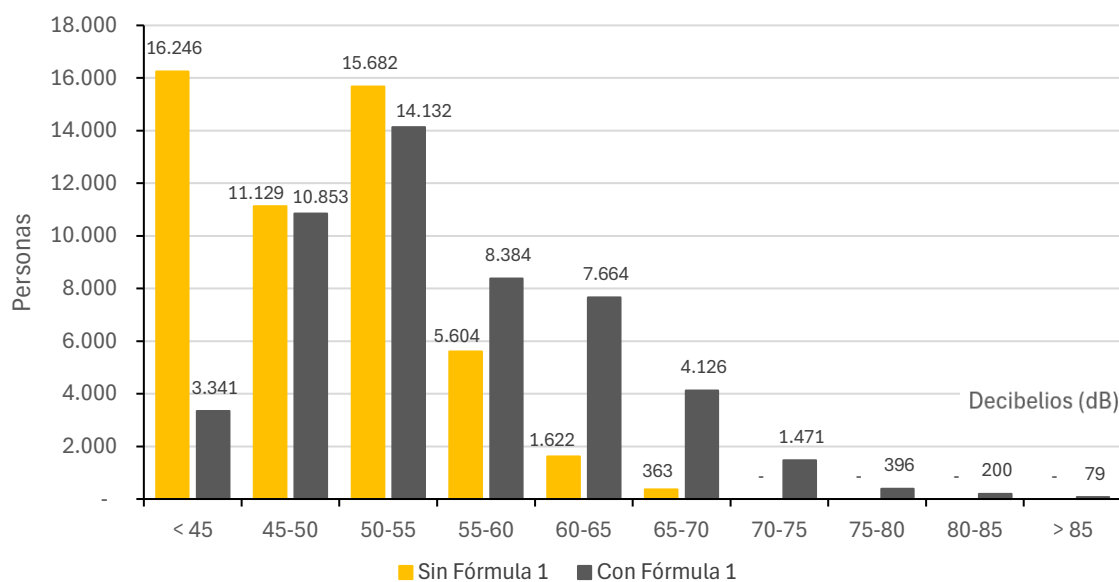
En consecuencia, se observa un impacto sustancial en los rangos intermedios de exposición (55-70 dBA), donde la población afectada se duplica, pasando de 7.433 a 14.498 personas (+ 95%). Este crecimiento es especialmente crítico en el intervalo de 65-70 dBA, donde el número de residentes expuestos se triplica. Este desplazamiento masivo de la población hacia niveles de ruido superiores confirma que la magnitud de la fuente sonora del evento satura el entorno urbano, superando la capacidad de atenuación de la configuración actual de la zona.

Finalmente, el hallazgo más preocupante es la aparición de escenarios de exposición severa inexistentes en condiciones ordinarias. El modelo predice que, durante el día del evento, 481 personas superarán el umbral de los 70 dBA, un nivel de inmisión incompatible con el uso residencial. Dentro de este grupo, destaca la vulnerabilidad de 147 vecinos situados por encima de los 75 dBA, incluyendo a 43 personas en el rango crítico de 80-85 dBA (Anexo 5).

## Resultados promedio de evento (15:00 – 17:00 h)

El análisis de este periodo específico resulta fundamental para determinar la presión sonora real a la que se someterá la población, eliminando el efecto de promediado de 12 horas. Los resultados, representados en la Gráfica 2, evidencian una alteración del escenario acústico mucho más severa y directa.

Gráfica 2. Comparación de población expuesta del periodo de carrera.



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el periodo diario, los resultados muestran un descenso en el número de personas situadas en los rangos de menor exposición (< 45 dBA). Mientras que en la situación base 16.246 personas se sitúan en este intervalo, durante las horas de carrera este grupo se reduce a 3.341 personas. Este descenso del 79% de la población en el rango inferior indica que la energía acústica de la fuente sonora tiene repercusión en casi la totalidad del entorno residencial evaluado durante las dos horas de competición.

En segundo lugar, se observa un incremento en los rangos de exposición intermedios y altos (55-70 dBA). El intervalo de 60-65 dBA registra un aumento notable, pasando de 1.622 a 7.664 personas, lo que supone casi quintuplicar la población afectada en esta franja. Asimismo, en el rango de 65-70 dBA, la población aumenta de 363 a 4.126 habitantes. Este desplazamiento masivo confirma que, al no evaluarse el promedio temporal con el resto del día, los niveles de inmisión en fachada se elevan significativamente.

Finalmente, el dato más crítico del análisis (y del estudio en general) es la aparición de un volumen muy significativo de población expuesta a niveles superiores a los 70 dBA, un escenario inexistente en las condiciones de control. El modelo predictivo arroja que, durante las dos horas de carrera, 2.146 personas superarán este umbral, lo que supone un impacto severo localizado. Dentro de este colectivo, destaca la alta densidad de afectados en los rangos más extremos: se identifican 675 vecinos con niveles superiores a los 75 dBA y, de manera especialmente relevante, un grupo de 79 personas que se sitúan en el rango crítico de más de 85 dBA (Anexo 6).

## 4.5. Estrategias de mitigación

Los resultados obtenidos en la modelización de los escenarios previos revelan un impacto sonoro que, sin medidas de intervención, resulta legalmente difícil de asumir para el entorno urbano de Madrid. Con niveles de inmisión que superan los umbrales permitidos en amplias zonas residenciales, la mitigación del impacto pasa a convertirse en una necesidad imperativa para garantizar la convivencia del evento con la salud pública. Ante la magnitud de este impacto, se plantea una estrategia de protección acústica basada en la implantación de nuevas barreras acústicas en las inmediaciones del circuito.

### Criterios de emplazamiento

La ubicación de las pantallas acústicas es fruto de un análisis multicriterio que integra aspectos como la ubicación de los principales afectados, la seguridad vial de los propios pilotos, la logística de la infraestructura y la topografía del terreno. Se han seguido las siguientes directrices:

- **Protección de receptores sensibles:** Se han priorizado los puntos de máxima exposición de las zonas residenciales del sur de Valdefuentes y del este de Canillas, donde la densidad de población y la proximidad al trazado generan el mayor impacto.
- **Seguridad en pista:** Las pantallas se han implementado en tramos de recta y en sectores de baja velocidad donde las probabilidades de salida de pista o colisión accidental con las estructuras son mínimas.
- **Compatibilidad de la infraestructura con el evento:** Se ha verificado que la ubicación de las barreras no interfiera con las gradas ni con las zonas de evacuación previstas en el proyecto.
- **Aprovechamiento de la topografía:** Se ha aprovechado el propio relieve y los desniveles del terreno para que funcionen como una barrera natural. Se trata de puntos estratégicos que ayudan a mitigar el impacto sonoro que pueden recibir las viviendas.



Ilustración 33. propuesta de emplazamiento de nuevas pantallas acústicas. Fuente: Elaboración propia

## Diseño y especificaciones técnicas

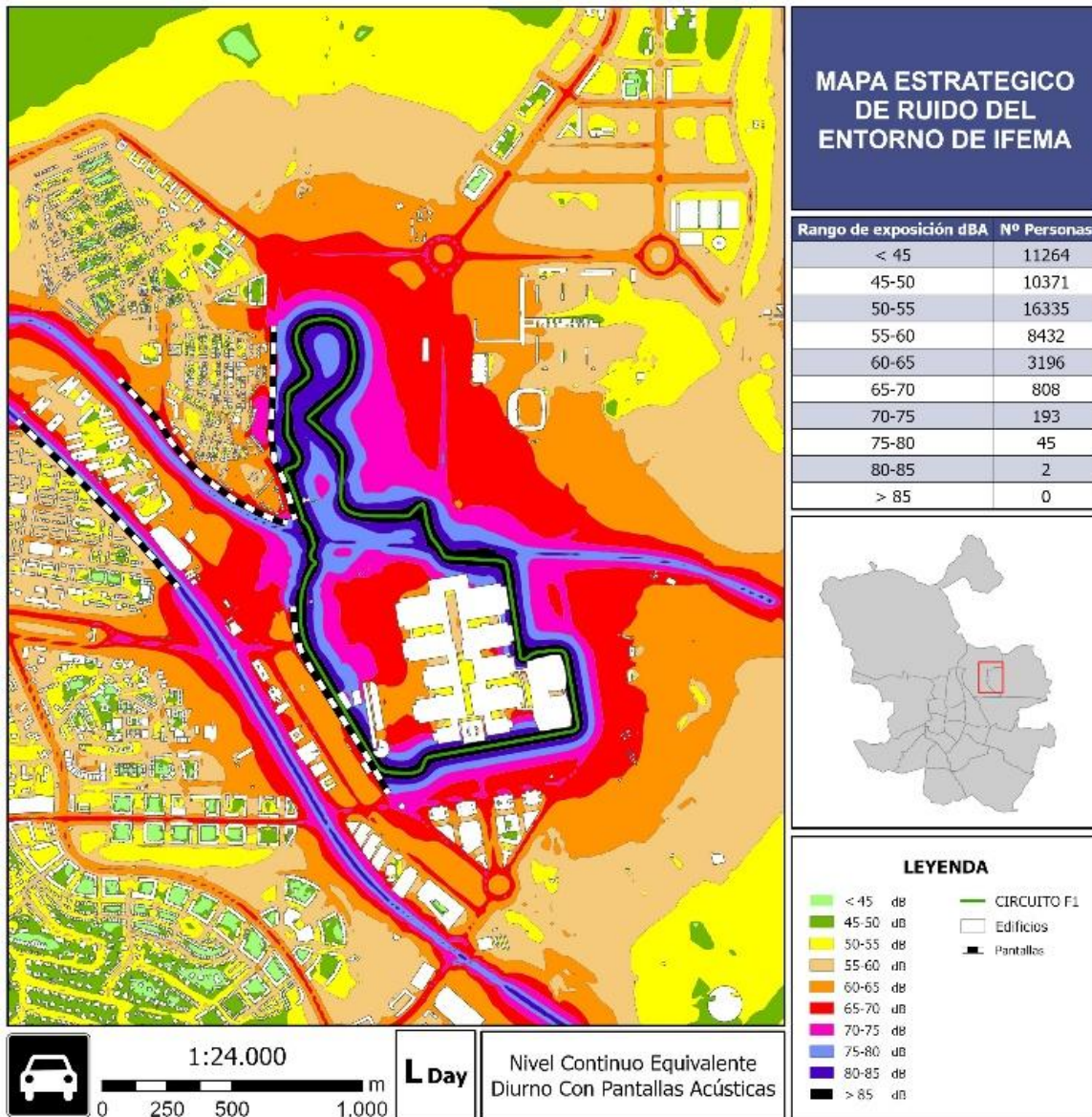
Al tratarse de un evento temporal, se ha buscado un diseño que equilibre la reducción del ruido con la facilidad logística. Los criterios principales son los siguientes:

- **Altura de 6 metros:** Se ha optado por una altura más elevada dado que la fuente emisora es de mayor potencia. Al ser una instalación provisional, esta medida permitirá frenar parte de la onda sonora a la vez de resultar práctica para el montaje y desmontaje.
- **Diseño sin voladizos:** A diferencia de las pantallas de las autopistas, estas son totalmente rectas y no tienen voladizo en la parte superior. La finalidad es evitar las posibles limitaciones del arbolado cercano a la pista sin tener que podar o talar vegetación para su instalación.

## Mapas de ruido

Al igual que se ha realizado modelización en apartados anteriores para evaluar los escenarios base y de evento sin protección, se ha procedido a simular la eficacia de las barreras acústicas propuestas.

Ilustración 34. Mapa de ruido Periodo Diurno con operatividad del circuito y pantallas acústicas.

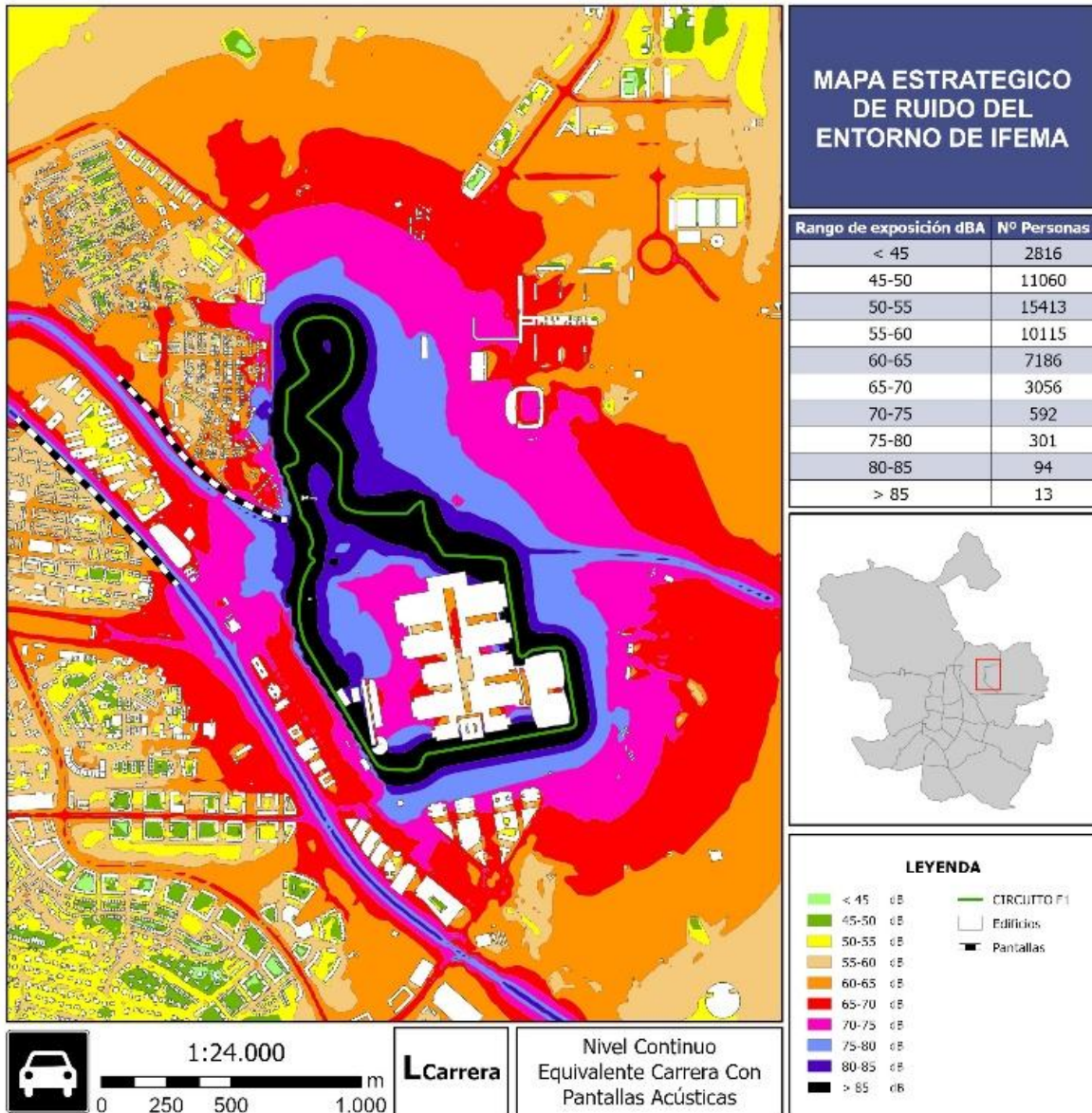


Fuente: Elaboración propia

Al comparar el resultado con el mapa sin la implementación de pantallas (Ilustración 25), se observa que la nueva medida genera una mejora técnica, aunque esta resulta insuficiente para solucionar el problema acústico de forma global. Debido a la gran potencia de las fuentes emisoras y a la altura de las edificaciones, las pantallas de 6 metros no logran eliminar el ruido por completo. Como se puede ver en la cartografía, las isófonas de niveles altos siguen penetrando de forma notable en las zonas de viviendas. Esto demuestra que una parte muy importante de la población seguiría estando expuesta a niveles de ruido superiores a los deseables.

A pesar de su insuficiencia, esta medida logra reducir ligeramente el número de habitantes expuestos a los niveles acústicos más elevados. En base a la legislación descrita en el Apartado 2.3, la medida logra reducir el número total de residentes expuestos a más de 58 dB, pasando de los 8.613 sin las pantallas a 7.000 con la implementación de las mismas.

Ilustración 35. Mapa de ruido Periodo Carrera con operatividad del circuito y pantallas acústicas.



Fuente: Elaboración propia

La cartografía muestra cómo los niveles de inmisión más críticos abarcan gran parte del área residencial, ya que el sonido logra propagarse por encima del obstáculo físico instalado, confirmando que más de 1.000 personas continúan en zonas de alta exposición.

Sin embargo, las pantallas, aunque de manera insuficiente, cumplen con el objetivo fundamental de mitigar el ruido de los rangos de mayor riesgo. Los datos confirman una reducción efectiva en la población sometida a los tramos más severos, logrando que la exposición por encima de los 85 dB sea residual y afecte únicamente a 13 personas. Además, en base a la legislación, la medida logra reducir los habitantes expuestos a más de 60 dB, pasando de 13.936 personas sin las pantallas a 11.242 ellas. Por tanto, aunque la barrera no sea una solución definitiva para el conjunto del área urbana, su implementación es una decisión técnica necesaria para proteger a una parte de los vecinos más vulnerables.

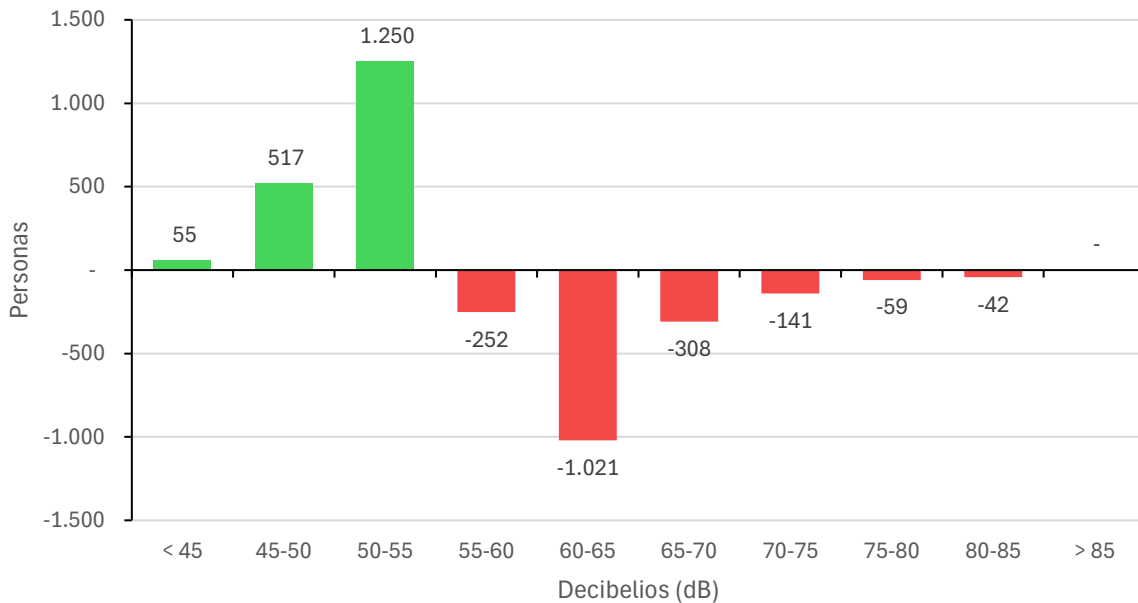
## Población expuesta

Al igual que se ha hecho en el apartado 4.4 y siguiendo la misma metodología de cálculo y análisis de resultados, se ha llevado a cabo un estudio de población expuesta que compare las situaciones en las que se implementan o no las pantallas acústicas para los dos periodos de análisis. Los resultados son los siguientes:

### Eficacia en el promedio diario (07:00 – 19:00 h)

En primer lugar, se analiza la eficacia que tiene la implementación de la nueva medida sobre la población expuesta en el periodo diario. La Gráfica 3 representa la resta entre el promedio diario con pantallas y el promedio diario sin pantallas:

Gráfica 3. Variación de exposición de población en el promedio diario.



Fuente: Elaboración propia

Al analizar la variación de la población expuesta sobre un censo total de 50.646 habitantes, los resultados reflejan una mejora estratégica centrada en los puntos de mayor riesgo. Si bien el descenso más marcado se concentra en los rangos intermedios, la eficacia de la propuesta destaca por su impacto en los tramos críticos (> 65 dB), que corresponden a las viviendas situadas a escasos metros del trazado del circuito en el barrio de Valdefuentes.

En estas zonas más próximas, se logra una reducción significativa del impacto sonoro para los residentes: un total de 242 personas que sufrían niveles de inmisión extremadamente elevados (entre 70 y 85 dB) ven reducida su exposición gracias al apantallamiento. Específicamente, la medida consigue retirar a 42 personas del tramo más severo de 80-85 dB y a otras 59 del rango de 75-80 dB, lo que supone un alivio acústico vital para quienes conviven pared con pared con la infraestructura del evento.

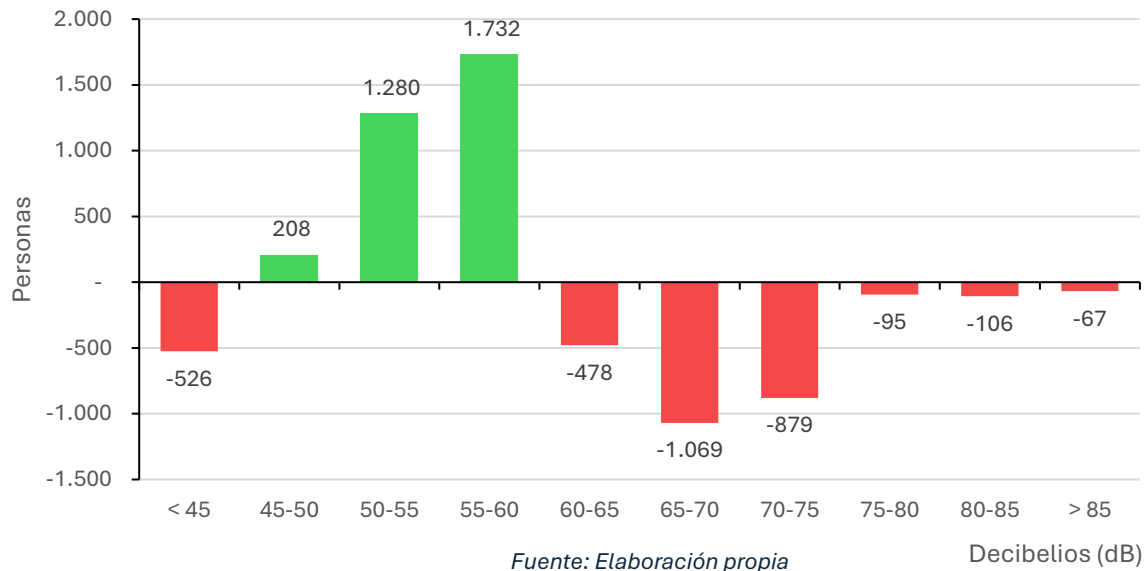
De manera complementaria, la barrera genera un beneficio extendido en el entorno urbano al reducir la población expuesta en los rangos de 60 a 70 dB en 1.329 personas, destacando el tramo de 60-65 dB con el mayor descenso absoluto de 1.021 habitantes. Este

desplazamiento masivo de población hacia niveles de mayor confort confirma que las pantallas no solo protegen de forma selectiva las viviendas más críticas, sino que mejoran la calidad ambiental de todo el sector de Valdebebas y Hortaleza, validando su implementación como una medida de protección eficaz.

### Eficacia en el promedio de carrera (15:00 – 17:00 h)

En segundo lugar, se analiza la eficacia que tiene la implementación de las nuevas pantallas sobre la población expuesta en el periodo de actividad del evento. La Gráfica 4 representa la resta entre el promedio diario con pantallas y el promedio diario sin pantallas:

Gráfica 4. Variación de exposición de población en el periodo de carrera.



Al trasladar el análisis al escenario del periodo del evento, se confirma que las pantallas cumplen una función protectora en los momentos de máxima exposición acústica. Se logra una reducción crítica de 1.147 personas en los niveles superiores a 70 dB, destacando que 268 vecinos salen de los rangos más extremos (más de 75 dB) y solo 13 permanecen expuestos a más de 85 dB.

El beneficio se extiende también a los rangos intermedios, donde 1.547 personas abandonan el tramo de 60 a 70 dB gracias al efecto de las barreras. Como consecuencia, se produce un aumento notable de la población en los niveles de mayor confort para un evento de estas características, con 1.732 nuevos habitantes situados en el rango de 55-60 dB y otros 1.280 que ahora perciben entre 50 y 55 dB.

Un fenómeno particular observado en la modelización es el descenso de 526 personas en el rango inferior a los 45 dB. Este dato sugiere que la instalación de las pantallas acústicas altera la propagación original del sonido, provocando una redistribución de la energía sonora. Al interceptar el ruido directo y direccionarlo de otra manera hacia el entorno residencial, algunas zonas que previamente se encontraban en un silencio casi total experimentan un ligero incremento técnico de sus niveles, aunque manteniéndose siempre dentro de rangos muy moderados.

## 5. CONCLUSIONES

La realización de este trabajo ha permitido dar respuesta al objetivo principal de evaluar, de manera independiente y mediante herramientas de modelización avanzada, el impacto acústico que la celebración del Gran Premio de Fórmula 1 "MADRING" proyectará sobre el entorno urbano de IFEMA en 2026. El estudio se sustenta en una base metodológica sólida que integra el uso de CadnaA y ArcGIS Pro. Mediante estas herramientas se ha podido constatar que la introducción de una fuente sonora con una potencia de emisión de 111,7 dB durante la carrera (que se traduce en un valor promediado de 103,9 dB para el periodo diurno completo) altera drásticamente el equilibrio sonoro preexistente. Este impacto resulta especialmente crítico en los tejidos residenciales consolidados de los barrios de Valdefuentes y Canillas. Esta investigación confirma que el evento no es simplemente una actividad temporal de motor, sino una perturbación ambiental de gran escala que desafía los límites de la sostenibilidad urbana y los estándares de salud pública analizados en el marco teórico.

En base a los resultados obtenidos en los mapas de isófonas se revela una alteración sonora muy notable en el entorno del circuito. Mientras que en la situación base el ruido presenta una distribución lineal, asociada a los ejes de la M-40, M-11 y vías secundarias, la operatividad del evento transforma este fenómeno en una afección ambiental generalizada. Según la modelización, la superficie residencial que incumple el límite legal diario de 58 dBA se duplica, pasando del 16,8% al 35,8% del área evaluada. No obstante, el escenario más crítico surge durante las dos horas de competición. En este intervalo, el indicador LAeq del evento evidencia que el 54,2% del suelo destinado a vivienda (unos 3,98 km<sup>2</sup>) supera los 60 dBA permitidos. Esta saturación acústica afecta directamente a 13.936 habitantes.

El análisis pormenorizado por sectores identifica el extremo sur del barrio de Valdefuentes y la zona este de Canillas como los núcleos de máxima vulnerabilidad acústica del estudio. En Valdefuentes, la enorme proximidad del trazado, situado a escasos 40 metros de las viviendas, dispara los niveles de inmisión hasta alcanzar los 82 dB en el promedio diario y un pico crítico de 89,7 dB durante las dos horas de competición. Por su parte, las edificaciones del sector oriental de Canillas, algo más alejadas del circuito, registran impactos en fachada de hasta 74 dB, superando ampliamente cualquier umbral de confort previo. Estos valores sustentan la detección de un colectivo de 279 personas expuestas a más de 80 dB durante el periodo de carrera, de las cuales 79 residentes se sitúan en el rango de riesgo extremo superior a los 85 dB. Este escenario de exposición severa representa la superación más drástica de los objetivos de calidad acústica (OCA) identificada en toda la investigación.

Más allá de los niveles absolutos, el estudio de los niveles diferenciales ( $\Delta L$ ) muestra como existe una alteración sonora muy considerable, con incrementos que superan los 40 dB en el entorno inmediato del trazado. Este impacto resulta especialmente transformador en los parques de Juan Carlos I y el Parque Forestal de Valdebebas, donde la ausencia de obstáculos y el bajo ruido de fondo previo maximizan la perturbación. No obstante, en las fachadas residenciales de primera línea, los aumentos se sitúan entre los 10 y 30 dB, siendo la mayor variación la correspondiente al del periodo en la que el circuito de encuentra operativo y con los monoplazas circulando.

La conversión de estos niveles sonoros a la exposición real de los habitantes, analizada mediante una metodología de evaluación en fachada y modelización 3D, confirma una degradación sistémica del bienestar acústico en el entorno de IFEMA. En el cómputo diario, el evento provoca que aproximadamente 7.000 vecinos pierdan su condición de "zona tranquila" (niveles < 55 dBA), lo que supone una pérdida del 14% de población bajo niveles acústicos aceptables. En este escenario en el que la legislación pone el límite en los 58 dBA, la cifra de habitantes que supera ese umbral se sitúa en 8.613 residentes.

Sin embargo, el impacto más alarmante se manifiesta durante las dos horas de carrera, cuando se produce un desplazamiento generalizado de la población hacia umbrales de ruido elevados: el número de personas situadas en el intervalo de mayor confort (< 45 dBA) cae drásticamente un 79%. Esta redistribución de la carga sonora satura los rangos intermedios y altos, situando a 13.936 residentes por encima del umbral de los 60 dBA permitidos por la legislación. Además, como se ha mencionado con anterioridad, el hallazgo más crítico de la investigación es la identificación de un núcleo de 79 personas expuestas a más de 85 dBA, un nivel de inmisión incompatible con el uso residencial que representa un riesgo directo para la salud pública según los estándares analizados.

Finalmente, se ha evaluado la implementación de pantallas acústicas de 6 metros en sectores estratégicos de Valdefuentes y Canillas. Los resultados indican que, aunque son una medida técnica necesaria, resultan insuficientes para resolver el impacto de forma global debido a la elevada potencia de los monoplazas y la altura de la edificación circundante.

En términos de cumplimiento normativo, la implementación de las pantallas logra una reducción significativa de la población afectada. En el cómputo diario, el número de residentes expuestos a niveles superiores a los 58 dB permitidos disminuye de 8.613 a 7.000. Durante las dos horas críticas de carrera, la medida logra que el total de afectados por encima de los 60 dB pase de 13.936 a 11.242. No obstante, el éxito más relevante de la propuesta consiste en la mitigación de los escenarios de riesgo extremo. Se logra una reducción de 1.147 personas expuestas a más de 70 dB en el periodo de carrera, consiguiendo que la población sometida a más de 85 dB pase de 79 personas a un valor residual de 13 habitantes.

En conclusión, esta investigación pone en evidencia la necesidad de un análisis técnico independiente que exponga con transparencia el impacto acústico que el Gran Premio de F1 podría generar. Los resultados obtenidos demuestran la magnitud de la afección sobre la salud pública y el claro incumplimiento de los objetivos de calidad, lo que justifica la necesidad de realizar una Evaluación de Impacto Ambiental Ordinaria. En última instancia, este estudio sirve como evidencia científica para recordar que el éxito del GP de Madrid de 2026 no debe medirse únicamente en términos de proyección internacional o beneficio económico, sino en su capacidad para garantizar el derecho constitucional a la protección de la salud y al bienestar de sus ciudadanos.

## 6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El presente estudio integra la sostenibilidad como eje vertebrador en la evaluación de infraestructuras temporales de gran impacto urbano. Mediante el análisis técnico de los niveles sonoros, el estudio se vincula con los compromisos globales de la Agenda 2030, incidiendo directamente en los objetivos que se detallan a continuación:

En relación con el **ODS 3 (Salud y Bienestar)**, se evalúa la contaminación acústica como un factor determinante de la salud pública en entornos metropolitanos. La investigación expone que la exposición prolongada a niveles de ruido elevados, como los generados por los monoplazas, puede derivar en consecuencias fisiológicas y psicológicas graves, incluyendo estrés, alteraciones del sueño y riesgos cardiovasculares. El estudio identifica que, durante el desarrollo del evento, un gran colectivo de personas se encontraría expuesto a niveles de inmisión superiores a los 60 dB, lo cual representa un riesgo directo de pérdida auditiva y daño sensorio-neural según los estándares médicos analizados. Al cuantificar con precisión estos riesgos, se plantea la posibilidad de diseñar protocolos que protejan la integridad física y mental de los ciudadanos frente a un evento de estas características.

La contribución al **ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles)** se manifiesta en la evaluación técnica de la compatibilidad entre los eventos de motor a gran escala y la habitabilidad de los tejidos residenciales consolidados. La modelización predictiva revela que el 54,2% del suelo destinado a vivienda en el área de estudio superaría los 60 dB permitidos durante la competición, afectando directamente a 13.936 habitantes. A través de la simulación de pantallas acústicas de 6 metros en puntos estratégicos de Valdefuentes y Canillas, este trabajo propone medidas de mitigación para reducir la saturación sonora y garantizar que la proyección internacional de Madrid no comprometa la calidad de vida de sus ciudadanos.

Respecto al **ODS 16 (Paz, Justicia e Instituciones Sólidas)**, el trabajo se constituye como un instrumento de transparencia y acceso a la información técnica independiente para la ciudadanía. Dado que la administración ha optado por un procedimiento de impacto ambiental simplificado que limita el conocimiento público de los expedientes, esta investigación aporta el rigor técnico ausente en el proceso oficial para verificar el cumplimiento de la Ley 37/2003 del Ruido y el Real Decreto 1367/2007. Al exponer detalladamente las superaciones de los Objetivos de Calidad Acústica (OCA), el estudio refuerza la transparencia en los procesos de evaluación ambiental y dota a la sociedad de una base científica para defender el derecho constitucional al descanso y a un entorno ambientalmente saludable.

## 7. PLANIFICACIÓN

Tarea	Año	2025																2026							
	Mes	Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero			
	Semana	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
<b>Requerimientos previos</b>																									
Estructura del TFM																									
Recopilación de Informes (Acustica - F1)																									
Recopilación de Informes (Ruido y salud)																									
Estudio de normativa vigente																									
<b>Análisis del área de estudio</b>																									
Creación de MDT																									
Recopilación de afóros de tráfico																									
Análisis de líneas de EMT																									
Distribución de áreas OCA																									
Estudio sociodemográfico																									
<b>Calculos previos</b>																									
Estimación de caudales vehiculares																									
Implementación de vehículos pesados																									
Categorización de calles																									
Principios acústicos (Fórmulas y cálculos)																									
Estimación acústica de coche F1																									
<b>Modelización</b>																									
Importación de datos a CadnaA																									
Elaboración de mapas de ruido																									
Análisis de propagación del sonido																									
Evaluación de población expuesta																									
<b>Propuesta de mitigación de impacto</b>																									
Análisis de zonas sensibles																									
Implantación de nuevas pantallas																									
Estudio sobre la eficacia																									
<b>Revisión de resultados</b>																									
Comparativa con legislación vigente																									
Comparativa entre escenarios																									
<b>Hallazgos</b>																									
Conclusiones																									

## 8. PRESUPUESTO

El presente apartado tiene como objeto estimar el coste económico teórico derivado de la realización del presente trabajo. El presupuesto se divide en costes de personal, licencias de software y amortización de equipos

### Recursos Humanos

Se contabilizan las horas dedicadas por el autor del trabajo (Iván Ruiz) en calidad de Ingeniero Junior, y las horas de supervisión y tutoría del director del TFM (Ignacio Pavón).

Concepto	Perfil	Horas	Coste/h	Total
Elaboración técnica y redacción	Ingeniero Junior	450	25 €	11.250 €
Dirección y tutoría	Director de TFM	25	50 €	1.250 €
<b>Subtotal Personal</b>				<b>12.500 €</b>

### Licencias de Software

Siguiendo las directrices del proyecto, no se imputa el coste total de la licencia perpetua, sino la parte proporcional derivada del tiempo de uso intensivo durante los meses de desarrollo del modelo acústico y espacial. Se estima una vida útil de la licencia de 4 años para el cálculo del canon de uso mensual.

Software	Coste Licencia	Uso (Meses)	Canon mensual	Total
CadnaA (Modelado acústico)	12.000 €	5	1.000 €	5.000 €
ArcGIS Pro (Análisis espacial)	10.000 €	5	833,33 €	4.166,67 €
<b>Subtotal Software</b>				<b>9.166,67 €</b>

### Equipamiento (Hardware)

Hace referencia a la amortización proporcional del equipo informático de altas prestaciones necesario para las simulaciones de propagación acústica.

Concepto	Valor Inicial	Vida Útil	Meses uso	Total
Estación de trabajo (PC)	1.800 €	36 meses	6	300,00 €
<b>Subtotal Hardware</b>				<b>300,00 €</b>

### Total

Total	Base Imponible	IVA	Presupuesto Total
Recursos Humanos	12.500,00 €	21%	15.125,00 €
Licencia de Software	9.166,67 €	21%	11.091,67 €
Equipamiento	300,00 €	21%	363,00 €
<b>Subtotal</b>	<b>21.966,67 €</b>	<b>21%</b>	<b>26.579,67 €</b>

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Albert, L. A. (1997). Contaminación ambiental, origen, clases, fuentes y efectos. En L. A. Albert, Introducción a la toxicología ambiental. Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México.
- Alvarez, F. C. (2017). Ferrari y Mercedes rugen a 110 decibelios en Montmeló. Diario AS. [https://as.com/motor/2017/03/10/formula\\_1/1489172127\\_863049.html](https://as.com/motor/2017/03/10/formula_1/1489172127_863049.html)
- Attenborough, K., Li, KM y Horoshenkov, K. (2007). Predicción del sonido exterior (1.ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482295023>
- Ayuntamiento de Madrid. (2011). Ordenanza de Protección contra la Contaminación Acústica y Térmica. (BOAM núm. 6428). Boletín Oficial del Ayuntamiento de Madrid, 6428 (31 de marzo de 2011).
- Babisch, W. (2011). Efectos cardiovasculares del ruido. *Ruido y salud*, 13 (52), 201-204.
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325–1332.
- Berglund, B. (1998). Ruido comunitario desde una perspectiva de salud pública. En *Actas de Congresos y Conferencias INTER-NOISE y NOISE-CON* (Vol. 1998, N.º 3, págs. 1683-1688). Instituto de Ingeniería de Control de Ruido.
- Browne, T. (2023). La Fórmula 1 acelera por Cibeles al volante de Checo Pérez: "Madrid vibra diferente a todo el mundo, ojalá volvamos a correr aquí pronto" ELMUNDO. <https://www.elmundo.es/madrid/2023/07/15/64b2f338e9cf4a4f2d8b45b9.html>
- Circuito del Jarama. (2019). Reglamento General – Jarama Time Attack 2019. <https://www.jarama.org/jarama/wp-content/uploads/2019/12/00-RGTO-GRAL-JARAMA-TIME-ATTACK-2019-v4-11-19.pdf>
- Clark, A. (2024). ¿Cuánto dura una carrera de F1? Red Bull. <https://www.redbull.com/es-es/cuanto-dura-una-carrera-de-f1>
- Comunidad de Madrid, Dirección General de Transición Energética y Economía Circular. (20 de diciembre de 2024). Resolución de la Dirección General de Transición Energética y Economía Circular por la que se formula el informe de impacto ambiental del proyecto "Circuito de Carreras de Fórmula 1 en Madrid" (Ref. SEA 67/24)
- DGT (2018) Límites genéricos de velocidad en carretera. Dirección General de Tráfico. <https://revista.dgt.es/es/multimedia/infografia/2018/0301limites-genericos-de-velocidad.shtml>
- Diez González, C. (2010) ¡Más vale prevenir que... ! El ruido. Unión General de Trabajadores de Castilla y León <https://www.ugtcyl.es/prevencion/archivos/masvaleprevenirque/06-mas-vale-prevenir-que--el-ruido.pdf>
- Directiva (UE) 2020/367 de la Comisión, de 4 de marzo de 2020, por la que se modifica el anexo III de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al

- establecimiento de métodos de evaluación de los efectos nocivos del ruido ambiental. (2020). Diario Oficial de la Unión Europea, L 67, de 5 de marzo de 2020, pp. 132-136.
- Dolder, C. N., Suits, J. I., & Wilson, P. S. (2013). Noise exposure in the general audience of a Fórmula 1 race. In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 20, No. 1, p. 040003). Acoustical Society of America.
- EASA. (2022). Helicopter Noise Certification – AS350 B3 Acoustic Data Sheet. European Union Aviation Safety Agency. <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/7993/en>
- Economist & Jurist. (2025). La justicia anula la licencia del Circuito del Jarama. <https://www.economistjurist.es/actualidad-juridica/la-justicia-anula-la-licencia-del-circuito-del-jarama/>
- El Economista. (2024). El circuito del Jarama, en peligro: la política y las denuncias ilegítimas, las responsables. <https://www.eleconomista.es/motor/noticias/12917359/07/24/el-circuito-del-jarama-en-peligro-la-politica-y-las-denuncias-ilegitimas-las-responsables.html>
- El País. (2025). Vivir con un circuito de F1 a la puerta de casa: la Fiscalía ve indicios de un delito contra el medio ambiente en el ruido de las carreras del Jarama. <https://elpais.com/espana/madrid/2025-09-25/vivir-con-un-circuito-de-f1-a-la-puerta-de-casa-la-fiscalia-ve-indicios-de-un-delito-contra-el-medio-ambiente-en-el-ruido-de-las-carreras-del-jarama.html>
- ElDiario.es. (2024). Sentencia declara nula la licencia del Circuito del Jarama y amenaza su futuro. [https://www.eldiario.es/madrid/sentencia-declara-nula-licencia-circuito-jarama-amenaza-futuro\\_1\\_11525588.html](https://www.eldiario.es/madrid/sentencia-declara-nula-licencia-circuito-jarama-amenaza-futuro_1_11525588.html)
- Escobar, C., & Divisón, J. A. (2016). Ruido y enfermedad cardiovascular. *SEMERGEN, Soc. Esp. Med. Rural Gen.(Ed. Impr.)*, e65-e66.
- España. (2003). Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. (BOE núm. 276). Boletín Oficial del Estado, 276 (18 de noviembre de 2003), pp. 40578-40590.
- España. (2005). Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. (BOE núm. 303). Boletín Oficial del Estado, 303 (20 de diciembre de 2005), pp. 41539-41551.
- European Union. (2002). Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Union.
- Fong, S., & Johnston, M. (2000). Health effects of noise. Toronto Public Health. *Health*.
- Fórmula 1. (2024). Everything you need to know about F1's newest circuit in Madrid, including layout, lap time and length. <https://www.formula1.com/en/latest/article/everything-you-need-to-know-about-f1s-newest-circuit-in-madrid-including.l6oJZDAE9HVa4Ge8LZOZA>
- Gómez, J. (2011). El ruido: Efectos psicológicos y su incidencia económica. *Ingeniería*, 21(1), 75-82.

- Hernández Sánchez, H., & Gutiérrez Carrera, M. (2006). Hipoacusia inducida por ruido: estado actual. *Revista Cubana de medicina militar*, 35(4).
- INE. (2024). Estructura por grupos de edad y sexo 2024. Instituto Nacional de Estadística. <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=68526&L=0>
- INE. (2024). Población por municipios, distritos y secciones censales. Instituto Nacional de Estadística. [https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica\\_C&cid=125473617699\\_2&menu=resultados&idp=1254735572981#!tabs-1254736195813](https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=125473617699_2&menu=resultados&idp=1254735572981#!tabs-1254736195813)
- International Organization for Standardization (ISO). (2024). Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors (ISO 9613-2:2024).
- Isaac. (2015). Motores en la Fórmula 1: de los V8 a los V6 Turbo Híbridos. *Actualidad Motor*. <https://www.actualidadmotor.com/motores-formula-1-v8-v6-turbo-hibridos/>
- J.M. Vinuesa (2024). La evolución de los motores de la Fórmula 1. *Motor.es*. <https://www.motor.es/formula-1/evolucion-motores-fl-2024100166.html>
- Jarosińska, D., Héroux, M. È., Wilkhu, P., Creswick, J., Verbeek, J., Wothge, J. y Paunović, E. (2018). Desarrollo de las directrices de la OMS sobre ruido ambiental para la región europea: una introducción. *Revista internacional de investigación ambiental y salud pública*, 15 (4), 813.
- Jiménez, J. D., & Gil, C. L. (2015). Efectos en salud del ruido de tráfico: Más allá de las "molestias". *Revista de Salud Ambiental*, 15(2), 121-131.
- Juristas Contra el Ruido (2025). La justicia anula la licencia del Circuito del Jarama otorgada por silencio administrativo positivo. <https://juristas-ruidos.org/la-justicia-anula-la-licencia-del-circuito-del-jarama-otorgada-por-silencio-administrativo-positivo/>
- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, artículo 26. (Boletín Oficial del Estado, 10 de noviembre de 1995).
- MADRING. (s. f.). <https://www.madring.com/circuito/manifiesto>
- Martin, EI, Ressler, KJ, Binder, E. y Nemeroff, CB (2009). Neurobiología de los trastornos de ansiedad: imágenes cerebrales, genética y psiconeuroendocrinología. *Clínicas Psiquiátricas de Norteamérica*, 32 (3), 549.
- Medina, M. G. O., Montaña, A. F., & Barocio, A. O. (2015). Aportaciones al análisis del ruido y salud en las ciudades. *Ixaya. Revista Universitaria de Desarrollo Social*, (9), 33-50.
- MITMA (2023) Mapa de tráfico 2023 - Red de Carreteras del Estado. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. <https://mapadetrafico.transportes.gob.es/>
- Morales Escobar F.J. & Gómez Gabaldon N. (2024) Estudio y manejo de la hipoacusia en atención primaria. Documentos de consulta rápida SEMERGEN.

- Morales Pérez, J. (2009). *Estudio de la influencia de determinadas variables en el ruido urbano producido por el tráfico de vehículos* (Doctoral dissertation, Caminos).
- Morcillo, M. Á., González, J. A., Hernández, M. J., & Hidalgo, A. (2008). Influencia de la porosidad de los asfaltos en la generación del ruido de rodadura. *Acústica*, 20-22.
- Oliva Gómez, D. (2024). Análisis del automovilismo de competición: Reducción de emisiones y contaminación en la Fórmula 1 (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid (s.f.) Aforos de tráfico en la ciudad de Madrid permanentes. <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnnextoid=fabfb3e1de124610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnnextchannel>
- Rodríguez, D. D. (2025). El Gran Premio de Fórmula 1 en Madrid: entusiasmo, críticas y debate sobre su impacto. <https://www.eldiariodemadrid.es/articulo/sociedad/gran-premio-formula-1-madrid-entusiasmo-criticas-debate-impacto/20250109162501087476.html>
- Rossing, T. (Ed.). (2007). *Springer handbook of acoustics*. Springer Science & Business Media.
- Rubio Infante, A. (2015). Estudio del impacto acústico de conciertos amplificados al aire libre en Barcelona.
- Ruiz Casal, E. J. (1997). Contaminación acústica: efectos sobre parámetros físicos y psicológicos.
- Sarrais, F., y de Castro Manglano, P. (2007). El insomnio. In *Anales del sistema sanitario de Navarra* (Vol. 30, pp. 121-134). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud.
- Serrano Aparicio, A. (2022). *Análisis técnico: ¿cómo funciona un motor V6 turbo-híbrido de F1? VAVEL*. <https://www.vavel.com/es/motor/2017/09/10/formula1/826225-analisis-tecnico-como-funciona-un-motor-v6-turbo-hibrido-de-f1.html>
- Swanepoel, D. W., & Hall III, J. W. (2010). Football match spectator sound exposure and effect on hearing: A pretest-post-test study. *South African Medical Journal*, 100(4), 239-242.
- Ulibarri Martínez, J. M. (2015). Asociación entre ruido y ansiedad en trabajadores.
- Unión Europea. Comisión. (2015). Directiva Delegada (UE) 2015/996 de la Comisión de 19 de mayo de 2015 por la que se establecen métodos comunes de evaluación del ruido ambiental de conformidad con la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 168.
- Vega, C. P. (2020). Sonido y audición. *Universidad de Cantabria*, 1(2), 22.
- Vér, I. L., & Beranek, L. L. (Eds.). (2005). *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- Xu, D., Gan, W.-S., & Erfanian, H. (2024). *The sound and psychoacoustic analysis of 2023 Formula 1 race. Results in Engineering*, 23, 103077. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103077>

## 10. ANEXOS

Anexo 1. Ejemplo de cálculo aforo vehicular M-40 para periodo de carrera

<b>M40 (15:00-17:00 un Domingo de Septiembre)</b>					
Concepto	IMD (veh/día)	Hora	% Horario	Vehículos/hora	Promedio
Total	84068	15:00-16:00	0,049	4119,3	<b>4330</b>
		16:00-17:00	0,054	4539,7	
Ligeros	82599	15:00-16:00	0,04895	4043,2	<b>4254</b>
		16:00-17:00	0,05405	4464,5	
Pesados	1469	15:00-16:00	0,0508	74,6	<b>76</b>
		16:00-17:00	0,04965	72,9	

IDM Domingo de Septiembre	Total	84068
	Ligeros	82599
	Pesados	1469

			Calzada 1	Calzada 2	Promedio
Porcentajes Horarios Domingo (%)	Total	Hora 15:00	5,43	4,37	4,9
		Hora 16:00	5,61	5,19	5,4
	Ligeros	Hora 15:00	5,42	4,37	4,895
		Hora 16:00	5,62	5,19	5,405
	Pesados	Hora 15:00	5,73	4,43	5,08
		Hora 16:00	4,95	4,98	4,965

Anexo 2. Ejemplo de cálculo aforo vehicular M-11 para periodo de carrera.

<b>M11 (15:00-17:00 un Domingo de Septiembre)</b>					
Concepto	IMD (veh/día)	Hora	% Horario	Vehículos (hora)	Promedio
Total	38987	15:00-16:00	0,05165	2013,7	<b>2017</b>
		16:00-17:00	0,0518	2019,5	
Ligeros	38495	15:00-16:00	0,05165	1988,3	<b>1990</b>
		16:00-17:00	0,0518	1994,0	
Pesados	492	15:00-16:00	0,0567	27,9	<b>27</b>
		16:00-17:00	0,0525	25,8	

IDM Domingo de Septiembre	Total	38987
	Ligeros	38495
	Pesados	492

			Calzada 1	Calzada 2	Promedio
Porcentajes Horarios Domingo (%)	Total	Hora 15:00	5,04	5,29	5,165
		Hora 16:00	5,21	5,15	5,18
	Ligeros	Hora 15:00	5,03	5,3	5,165
		Hora 16:00	5,21	5,15	5,18
	Pesados	Hora 15:00	6,67	4,67	5,67
		Hora 16:00	5,83	4,67	5,25

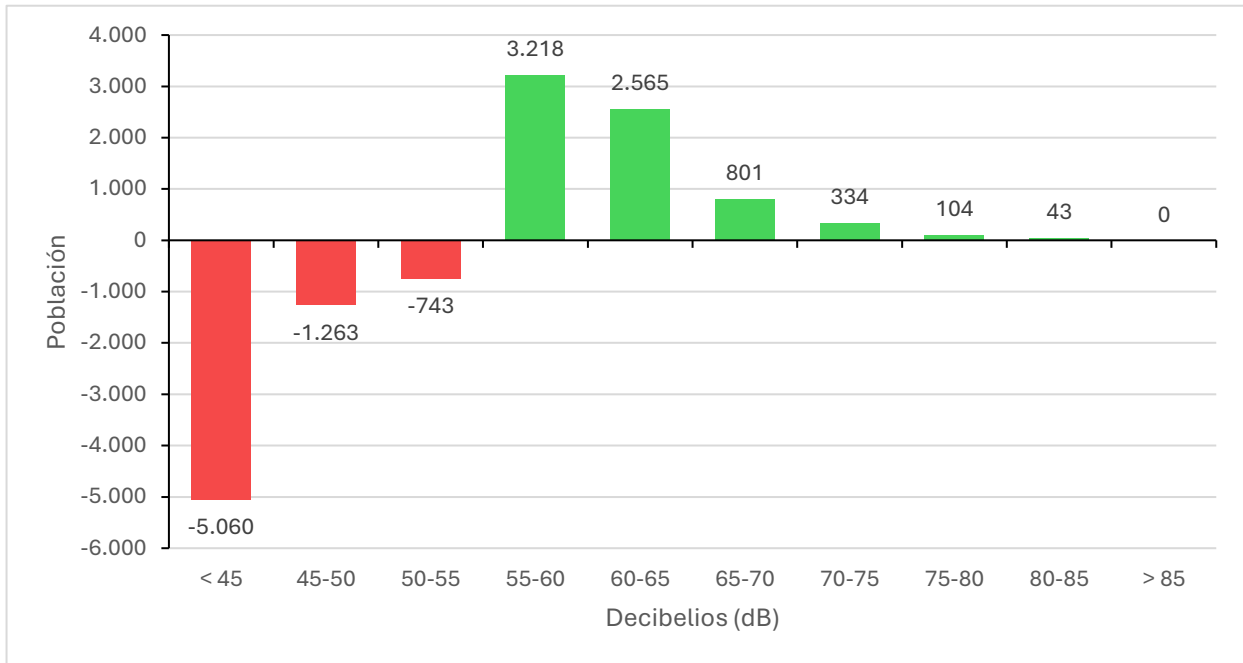
Anexo 3. Objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a áreas urbanizadas existentes. (RD 1367/2007, Anexo II)

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L <sub>d</sub>	L <sub>e</sub>	L <sub>n</sub>
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera una especial protección contra la contaminación acústica.	60	60	50
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.	65	65	55
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en c).	70	70	65
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	73	73	63
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.	75	75	65
f	Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte, u otros equipamientos públicos que los reclamen. (1)	(2)	(2)	(2)

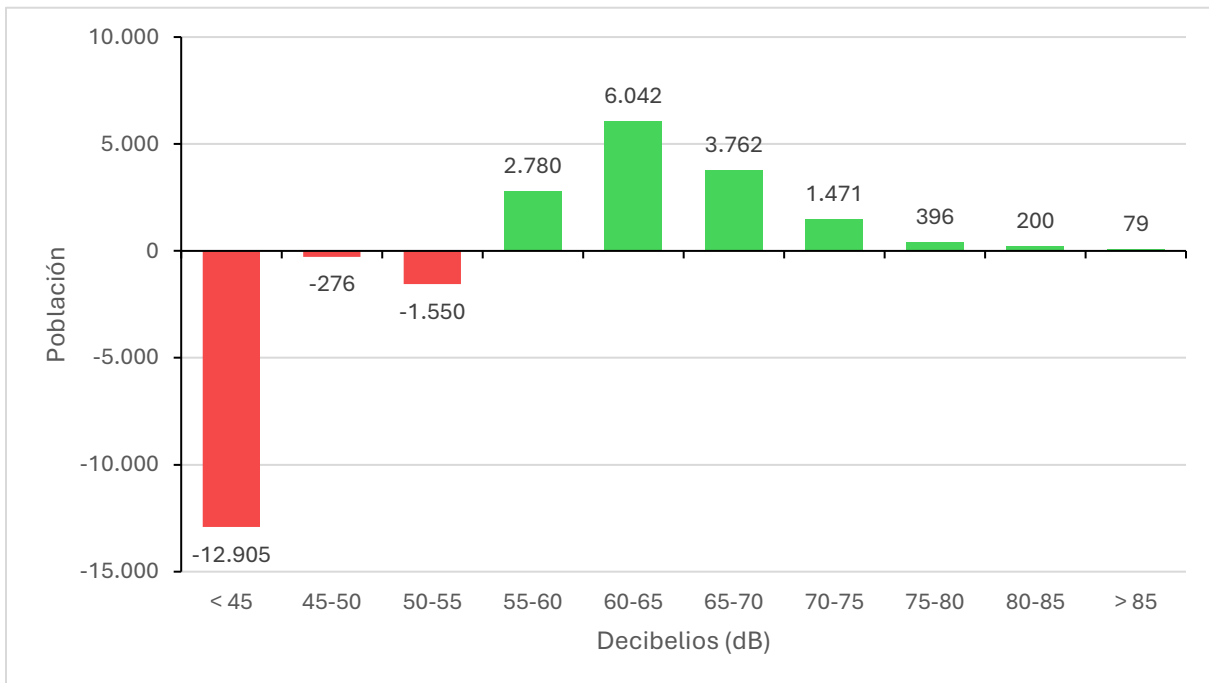
Anexo 4. Valores límite de inmisión de ruido aplicables a actividades (RD 1367/2007, Anexo III)

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L <sub>K,d</sub>	L <sub>K,e</sub>	L <sub>K,n</sub>
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera una especial protección contra la contaminación acústica.	50	50	40
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.	55	55	45
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en c.	60	60	50
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	63	63	53
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.	65	65	55

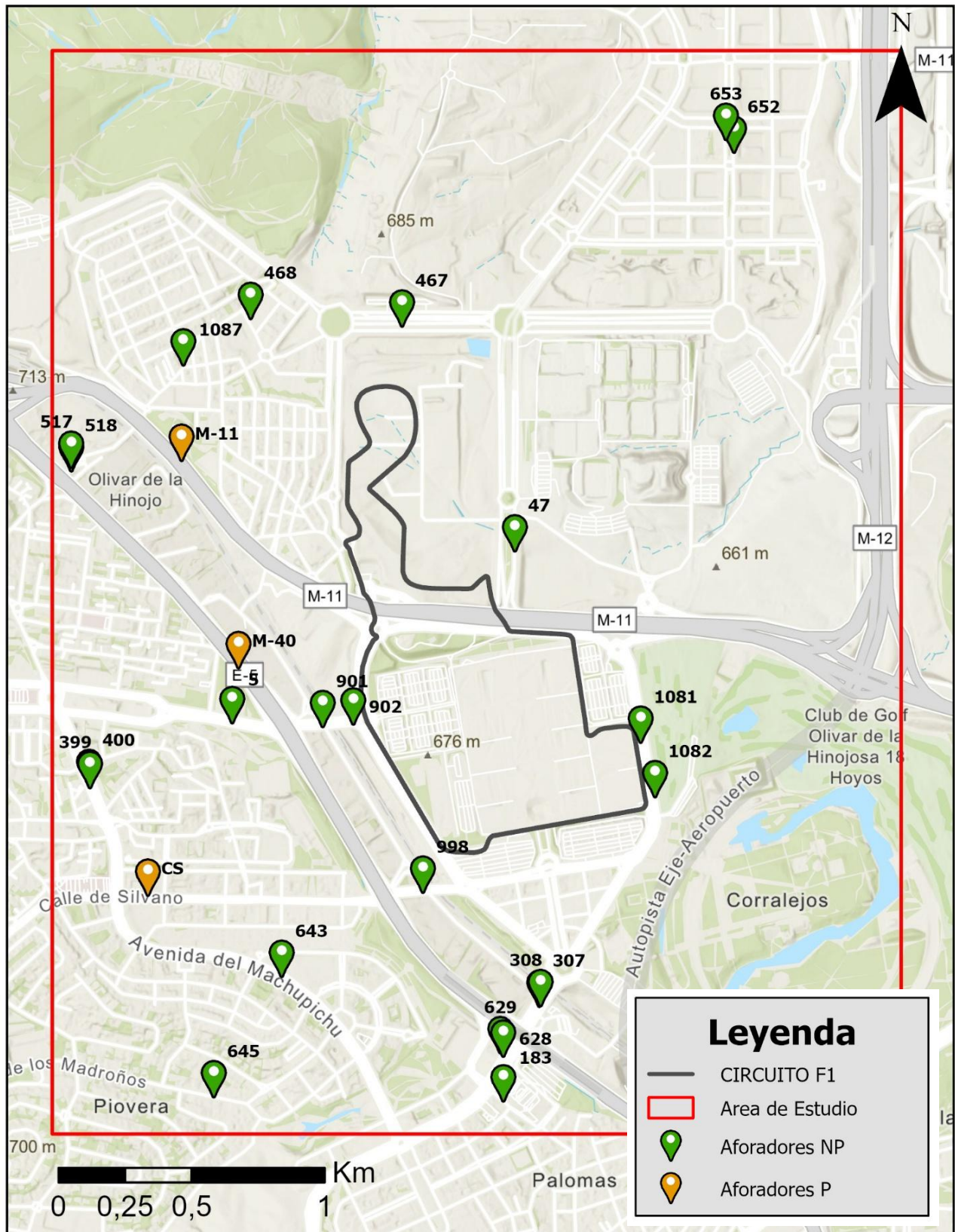
Anexo 5. Impacto Neto en el periodo diario (Diferencia de Población)



Anexo 6. Impacto Neto en el periodo de carrera (Diferencia de Población)



Anexo 7. Ubicación de los aforadores de tráfico.





POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid

Tel.: 91 336 3060

[info.industriales@upm.es](mailto:info.industriales@upm.es)

[www.industriales.upm.es](http://www.industriales.upm.es)