



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



# Influencia de la vegetación en la mitigación del ruido Estudio de una forestación

Autora:  
MARTHA MARÍA COBO DORADO

Tesis de Maestría presentada a la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad de la República  
en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de  
Magister en Ingeniería Ambiental

Tutora:  
Alice Elizabeth González

Tribunal:  
Alejandro Gutiérrez  
Diego Pablo Ruiz  
William Giraldo Aristizábal

Montevideo, Uruguay  
2022



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



## PAGINA DE APROBACIÓN

El tribunal integrado por los abajo firmantes, aprueba la Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental:

TITULO: Influencia de la vegetación en la mitigación del ruido

---

AUTOR: Ing. Martha María Cobo Dorado

---

TUTOR: Dra. Ing. Alice Elizabeth González

---

### INTEGRANTES DEL TRIBUNAL

Nombre	Entidad/Dependencia

CALIFICACIÓN:

---

FECHA:

---



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



## DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicarlo especialmente a mi familia, a mi papá Jaime, a mi mamá Honoria, a mis hermanas, Sary, Karina, Paola y Magy por su apoyo incondicional en cada momento, por ser ejemplos de vida para mí y por estar siempre pendientes dándome ánimo todas las veces que lo necesité.

A mi abuela Tulia (qepd), que con su persistencia a pesar de las circunstancias logró enseñarnos a todos en la familia y a través de muchos años, que con esfuerzo todo se logra y nos ayudó a reconocer el gran valor de estudiar, pero sobre todo de aprender.

A mis amados, Oliverio, y Laurita que, aunque tampoco están físicamente, sé que donde quiera que se encuentren, sienten que este es un momento especial porque es la culminación de un gran ciclo y en cada momento especial, siempre estarán conmigo.

A Miguel por su amor, comprensión, apoyo y por insistir en aquellos momentos en que el tiempo escaseaba o que sentía que no podía dar más. Siempre estuviste ahí para mí.



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



## **AGRADECIMIENTOS**

La autora de esta investigación expresa sus agradecimientos a:

La Universidad de la República - Facultad de Ingeniería, por haberme permitido ser parte de ella, por formarme y abrirme las puertas en un campo científico, en una temática de mucho interés que hasta hace unos años era muy desconocida para mí, como es la acústica.

Mi profesora y tutora de tesis, Dra. Ingeniera Alice Elizabeth González, por su paciencia, por tomarse el tiempo de leer con detenimiento, de observar, corregir y aconsejar siempre con buena disposición y criterio técnico en todo el desarrollo de la investigación.

La gerencia de la Industria de fabricación de cal, ubicada en el este de Uruguay, por permitirme realizar este trabajo in situ, en tiempo real, por facilitarme algunos horarios y por la confianza depositada en mí para la recolección, procesamiento y análisis de la información.

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN .....</b>	<b>VII</b>
<b>PALABRAS CLAVE.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>18</b>
<b>2 ANTECEDENTES .....</b>	<b>19</b>
<b>3 FUNDAMENTACION TEORICA .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 IMPEDANCIA ACÚSTICA DEL MEDIO.....</b>	<b>20</b>
3.2.1 Impedancia acústica de un obstáculo.....	21
<b>3.3 PROPAGACIÓN EN CAMPO LIBRE.....</b>	<b>21</b>
3.3.1 La fuente sonora .....	21
3.3.2 Propagación .....	23
<b>3.4 ATENUACION DEL SONIDO EN CAMPO LIBRE.....</b>	<b>27</b>
3.4.1 Método Concawe (1981) .....	27
3.4.2 Método Norma ISO 9613 (1993-1996) .....	28
3.4.3 Otros métodos y modelos.....	30
3.4.4 Divergencia geométrica .....	33
3.4.5 Absorción del aire .....	36
3.4.6 Suelo .....	39
3.4.7 Niebla .....	47
3.4.8 Barreras u obstáculos .....	49
<b>3.5 FENÓMENOS ANTE LA PRESENCIA DE UNA BARRERA.....</b>	<b>50</b>
3.5.1 Reflexión .....	50
3.5.2 Refracción .....	52
3.5.3 Difracción .....	54
3.5.4 Absorción .....	55
3.5.5 Transmisión.....	57
<b>3.6 PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN TL .....</b>	<b>58</b>
<b>3.7 PÉRDIDAS DE INSERCIÓN DE UNA BARRERA ACÚSTICA (IL) .....</b>	<b>58</b>
3.7.1 Redfearn.....	59
3.7.2 Hoover .....	60
3.7.3 Maekawa.....	60
3.7.4 Kurze y Anderson .....	63
3.7.5 Pierce .....	64
3.7.6 Norma ISO 9613-2.....	66
<b>4 LA VEGETACIÓN Y EL RUIDO .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1 ESTUDIOS PREVIOS .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2 ELEMENTOS DE LA VEGETACIÓN.....</b>	<b>73</b>
4.2.1 Raíces .....	73
4.2.2 Tronco y corteza de los árboles .....	81
4.2.3 Ramas, hojas y follaje.....	82
4.2.4 Altura de los árboles .....	85

4.2.5	Masa arbórea.....	86
4.2.6	Árboles dispuestos como cristales sónicos.....	88
<b>5</b>	<b>CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>DESCRIPCION DE LA INDUSTRIA .....</b>	<b>91</b>
<b>5.2</b>	<b>FUENTES SONORAS FIJAS.....</b>	<b>91</b>
5.2.1	Descripción de las fuentes.....	92
5.2.2	Recintos de las fuentes.....	95
5.2.3	Altura de las fuentes.....	97
5.2.4	Localización de las fuentes.....	97
<b>5.3</b>	<b>FUENTES SONORAS MÓVILES.....</b>	<b>98</b>
<b>5.4</b>	<b>RUIDO DE FONDO.....</b>	<b>98</b>
<b>5.5</b>	<b>RECEPTORES Y PUNTOS DE CONTROL.....</b>	<b>98</b>
5.5.1	Descripción de los receptores.....	98
5.5.2	Altura de los receptores.....	99
5.5.3	Ubicación de los receptores.....	99
<b>5.6</b>	<b>DESCRIPCION DE LA VEGETACIÓN .....</b>	<b>100</b>
5.6.1	Configuración de la plantación.....	101
5.6.2	Barreras de interés.....	101
5.6.3	Especie.....	105
5.6.4	Características morfológicas.....	106
5.6.5	Edad de la vegetación.....	108
5.6.6	Altura de los árboles.....	108
<b>6</b>	<b>CAMPAÑAS DE MEDICIÓN.....</b>	<b>111</b>
<b>6.1</b>	<b>MEDICIÓN DE LAS FUENTES SONORAS.....</b>	<b>111</b>
6.1.1	Equipo de medición.....	111
6.1.2	Metodología.....	111
<b>6.2</b>	<b>MEDICION EN RECEPTORES Y PUNTOS DE CONTROL .....</b>	<b>112</b>
6.2.1	Equipo de medición.....	112
6.2.2	Metodología.....	112
<b>6.3</b>	<b>MEDICION DE VARIABLES METEOROLÓGICAS.....</b>	<b>112</b>
6.3.1	Equipos de medición.....	112
6.3.2	Metodología.....	113
<b>6.4</b>	<b>RESULTADOS DE LAS MEDICIONES .....</b>	<b>113</b>
6.4.1	Fuente sonora F1.....	113
6.4.2	Fuente sonora F2.....	114
6.4.3	Fuente sonora F3.....	114
6.4.4	Fuente sonora F4.....	115
6.4.5	Receptor R1.....	115
6.4.6	Receptor R2.....	118
6.4.7	Puntos de control P1, P2, P3 y P4.....	121
6.4.8	Punto de control P5.....	121
<b>7</b>	<b>PROCESAMIENTO DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>122</b>
<b>7.1</b>	<b>EVOLUCION DE LOS NIVELES DE PRESION SONORA - PUNTO SIN BARRERAS.....</b>	<b>122</b>
7.1.1	Evolución NPS en R2 con fuentes principales operativas.....	122

7.1.2	Análisis de resultados .....	125
<b>7.2</b>	<b>EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES DE PRESION SONORA - PUNTO CON BARRERAS .....</b>	<b>126</b>
7.2.1	Evolución NPS en R1 con fuentes principales operativas .....	126
7.2.2	Evolución NPS en R1 solo con fuentes cercanas.....	128
7.2.3	Comparación de mediciones puntuales .....	129
7.2.4	Análisis de resultados .....	129
<b>7.3</b>	<b>CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE LAS FUENTES SONORAS .....</b>	<b>129</b>
<b>7.4</b>	<b>TIPO DE PROPAGACIÓN DE LAS FUENTES SONORAS .....</b>	<b>130</b>
7.4.1	Fuente F1 .....	130
7.4.2	Fuente F2 .....	131
7.4.3	Chequeo de propagación de F1 y F2.....	132
7.4.4	Fuente F3 .....	136
7.4.5	Fuente F4 .....	137
7.4.6	Chequeo de propagación de F3 y F4.....	138
7.4.7	Análisis de resultados .....	140
<b>7.5</b>	<b>ESTUDIO DE LA BARRERA 1 .....</b>	<b>141</b>
7.5.1	Condición 1: Operando solo las fuentes sonoras cercanas: F3 y F4 .....	141
7.5.2	Condición 2: Operando solo las fuentes sonoras lejanas: F1 y F2 .....	145
7.5.3	Condición 3: Operando todas las fuentes sonoras: F1, F2, F3 y F4 .....	147
7.5.4	Condición 4: Operando solo una fuente: F4 .....	151
7.5.5	Análisis de resultados .....	159
<b>7.6</b>	<b>ESTUDIO DE LA BARRERA 2 .....</b>	<b>164</b>
7.6.1	Caso 1: Analizando los puntos de control P1-P2 .....	164
7.6.2	Caso 2: Analizando los puntos de control P3-P4 .....	168
7.6.3	Análisis de resultados .....	172
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>173</b>
<b>9</b>	<b>LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A FUTURO .....</b>	<b>179</b>

## RESUMEN

Este trabajo se inicia con una revisión bibliográfica de conceptos generales sobre el sonido, su propagación, haciendo énfasis en la propagación en campo libre y los fenómenos que se presentan cuando el sonido se encuentra con obstáculos o barreras en el camino de propagación directa. Se parte de conceptos generales sobre barreras acústicas convencionales hasta llegar a las barreras vegetales que son el objeto de estudio, haciendo una revisión de los estudios previos realizados con sus respectivas conclusiones y que servirán de base para esta investigación.

El objetivo del estudio de caso es determinar si una serie de plantaciones en el perímetro de una industria están actuando como barreras acústicas. Se debe considerar que estas plantaciones no fueron hechas con propósitos acústicos, sino como medida de mitigación para el impacto sobre el paisaje de la industria al haberse implantado en zona rural. Se hizo una transición visual del paisaje existente y el establecimiento industrial, por lo cual se utilizó la especie dominante en los alrededores que es *Eucalyptus dunni*. La plantación se inició en el año 2015, y para el estudio se tomaron datos de mediciones de niveles de presión sonora-NPS, antes de dicha plantación y hasta el año 2021, cuando los árboles tenían 6 años de crecimiento.

La Industria cuenta con varias fuentes sonoras, entre las cuales se destacan cuatro como las más importantes: dos trituradoras, una zaranda vibratoria y un molino de carbón, las cuales fueron caracterizadas a través de mediciones. En cuanto a los receptores, se trabaja con dos puntos R1 y R2. R1 es un punto ubicado en el perímetro de la industria y que está separado de las fuentes sonoras por varias cortinas de árboles, mientras que R2 puede ser considerado como un punto de control, ubicado en el perímetro del predio, pero a diferencia de R1, no tiene ninguna cortina de árboles interpuesta entre las fuentes sonoras y este Punto.

El estudio se centra en dos barreras vegetales; la Barrera 1, que es un conjunto de cortinas de árboles interpuestas entre las fuentes sonoras y el Punto R1 y la Barrera 2, que es una sola cortina de árboles interpuesta entre las fuentes sonoras y los puntos de control P2 y P4. Se cuenta con mediciones de niveles de presión sonora (NPS) en los receptores y se calculan los NPS esperados en los receptores con y sin presencia de las barreras de árboles para distintas condiciones operativas, utilizando varios métodos de cálculo de las pérdidas de inserción. IL.

Los resultados permiten concluir que la barrera 1 está generando una mitigación del ruido en el punto R1, de entre 4 y 12 dB según la condición operativa estudiada. En cuanto a los métodos utilizados para calcular IL, el que más se ajusta con los resultados encontrados es el de Kurze Anderson. En lo que respecta a la barrera 2, por tratarse de una cortina más pequeña, su eficiencia no fue la esperada, concluyendo que existe una diferencia de 9 dB entre lo medido y lo esperado en P4 pero que las diferencias se observan en las bandas de 63 y 2.000 Hz, por lo cual el resultado no es concluyente respecto a la eficiencia de esta Barrera 2 desde el punto de vista acústico.



## **PALABRAS CLAVE**

Barreras acústicas, barreras vegetales, ruido industrial, control de ruido

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Índice (D) y factor de Directividad (Q)- fuentes puntuales.....	26
Tabla 2- Atenuación del sonido por absorción del aire (dB/km).....	37
Tabla 3- Atenuación por efecto del suelo según Concawe (constantes para el cálculo).....	40
Tabla 4- factor de absorción del suelo .....	40
Tabla 5- Atenuación por efecto del suelo- ISO 9613.....	41
Tabla 6- Factores de atenuación por el suelo- ISO 9613 .....	42
Tabla 7- factor de corrección K para cálculo de IL .....	63
Tabla 8- Elementos para cálculo de la atenuación de la barrera .....	67
Tabla 9- Cálculo de $C_{met}$ (dB) .....	69
Tabla 10- Porosidad del suelo .....	75
Tabla 11 -Resistividad para tipos de suelos .....	76
Tabla 12- Modelos determinación Impedancia del suelo .....	77
Tabla 13- Atenuación del sonido a través de follaje denso-ISO 9613-2.....	85
Tabla 14-Fuentes fijas principales .....	92
Tabla 15- altura de las fuentes sonoras .....	97
Tabla 16- Receptores y puntos de control.....	98
Tabla 17- Distancia medición fuentes sonoras .....	112
Tabla 18- Mediciones de F1 a 25 m.....	114
Tabla 19- Mediciones de F2 a 35 m.....	114
Tabla 20- Mediciones de F3 a 10 m.....	114
Tabla 21- Mediciones de F4 a 12 m.....	115
Tabla 22- Mediciones en R1 parte 1 (F1+F2+F3+F4).....	115
Tabla 23- Mediciones en R1 parte 2 (F1+F2+F3+F4).....	116
Tabla 24- Mediciones en R1 parte 1 (F3+F4).....	117
Tabla 25- Mediciones en R1 parte 2 (F3+F4).....	117
Tabla 26- Medición en R1 (F1+F2) .....	118
Tabla 27- Medición en R1 (F4).....	118
Tabla 28- Medición en R1 sin fuentes operando. ....	118
Tabla 29- Mediciones en R2 parte 1 (F1+F2+F3+F4).....	119
Tabla 30- Mediciones en R2 parte 2 (F1+F2+F3+F4).....	119

Tabla 31- Mediciones en R2 parte 1 (F3+F4).....	120
Tabla 32- Mediciones en R2 parte 2 (F3+F4).....	120
Tabla 33- Mediciones en R2 (F3+F4 y F4).....	121
Tabla 34- Mediciones en P1, P2, P3 y P4.....	121
Tabla 35- Mediciones en P5.....	121
Tabla 36- Resultados Test de Wilcoxon, Mann y Whitney- R2 .....	124
Tabla 37- Resultados Test de Wilcoxon, Mann y Whitney- R1 .....	127
Tabla 38- NPS en R1- comparación 2019-2021 .....	129
Tabla 39- Espectros de las fuentes sonoras.....	130
Tabla 40- Tipo de propagación fuente F1 .....	131
Tabla 41- Tipo de propagación F2.....	131
Tabla 42- Chequeo espectros F1 y F2 y propagación F1.....	132
Tabla 43- NPS en P1: F1 (esférica) y F2 (esférica) .....	134
Tabla 44- NPS en P3: F1(esférica) y F2 (esférica) .....	135
Tabla 45- NPS en P3: F1(esférica) y F2 (cilíndrica).....	135
Tabla 46- Medición en R2 (F3).....	136
Tabla 47- Tipo de propagación F3 .....	137
Tabla 48- Tipo de propagación F4.....	138
Tabla 49- NPS en R2: F3(cilíndrica)+F4(cilíndrica) .....	138
Tabla 50- NPS en R2: F3(esférica) + F4(cilíndrica).....	140
Tabla 51- NPS en R1 sin atenuación por el follaje (F3+F4).....	142
Tabla 52- $L_{Aeq}$ de las mediciones en R1 (F3+F4) .....	143
Tabla 53- NPS en R1 con atenuación del follaje (F3+F4).....	144
Tabla 54- NPS en R1 sin atenuación por el follaje (F1+F2).....	145
Tabla 55- NPS en R1 con atenuación del follaje (F1+F2).....	146
Tabla 56- NPS total en R1 sin atenuación del follaje ( F1+F2+F3+F4) .....	148
Tabla 57- $L_{Aeq}$ medido en R1 (F1+F2+F3+F4).....	149
Tabla 58- NPS en R1 con atenuación por el follaje (F1+F2+F3+F4).....	150
Tabla 59- Chequeo condiciones barrera B1.1 .....	152
Tabla 60- Coeficientes de absorción atmosférica .....	153
Tabla 61- Características del suelo F4 a R1 .....	154
Tabla 62- valores de G entre F4 y R1 .....	154

Tabla 63- NPS en R1 sin atenuación por B1.1 (F4).....	154
Tabla 64- IL según Kurze-Anderson y NPS esperados en R1 .....	155
Tabla 65- Verificación del criterio de barrera gruesa/fina .....	156
Tabla 66- IL según aproximación de barrera gruesa y NPS esperados en R1 ....	156
Tabla 67- IL según aproximación de ISO 9613-2 y NPS esperados en R1 .....	157
Tabla 68- IL según aproximación de Hoover y NPS esperados en R1 .....	157
Tabla 69- Resumen IL barrera B1.1 .....	159
Tabla 70- NPS total en P1 (antes de la barrera 2) .....	165
Tabla 71- NPS total en P2 (después de la barrera) sin atenuación del follaje ....	166
Tabla 72- NPS en P2 con atenuación por el follaje .....	167
Tabla 73- NPS total en P3 (antes de la barrera 2) .....	169
Tabla 74- NPS total en P4 (después de la barrera) sin atenuación del follaje ....	170
Tabla 75- NPS en P4 con atenuación por el follaje .....	171

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propagación esférica.....	24
Figura 2. Propagación cilíndrica .....	25
Figura 3. Chequeo condiciones Barrera ISO 9613.....	30
Figura 4. Divergencia esférica .....	33
Figura 5. Divergencia cilíndrica.....	35
Figura 6. Divergencia cilíndrica al duplicar la distancia.....	35
Figura 7. Suelos con diferencia topográfica entre fuente y receptor.....	43
Figura 8. Paredes del open pit como barrera acústica .....	44
Figura 9. Perfil terreno accidentado .....	45
Figura 10. Interferencia de ondas directas (1) y ondas reflejadas en el suelo (2) .	46
Figura 11. Fenómenos generados en una barrera acústica.....	50
Figura 12. Reflexión del sonido .....	51
Figura 13. Refracción atmosférica .....	52
Figura 14. Reflexión y Refracción del sonido en presencia de obstáculos .....	53
Figura 15. Difracción del sonido en presencia de obstáculos .....	54
Figura 16. Absorción del sonido en presencia de obstáculos.....	55
Figura 17. Transmisión del sonido en presencia de obstáculos .....	57
Figura 18. Pérdidas de inserción IL - ábaco de Redfearn 1940 .....	59
Figura 19. Geometría ante la presencia de una barrera.....	60
Figura 20. Pérdidas de inserción IL-ábaco de Maekawa 1965 .....	62
Figura 21. Aproximaciones - estudio de una barrera gruesa de forma arbitraria..	64
Figura 22. Caso de sobreestimación de la difracción.....	65
Figura 23. Triángulo Maekawa-Pierce-cálculo de pérdidas de inserción IL .....	65
Figura 24. Difracción por presencia de barrera.....	66
Figura 25. Propagación del sonido a través del follaje de los árboles. ....	84
Figura 26. Cristales sónicos .....	89
Figura 27. Trituradora de piedra-Tipo mandíbula.....	93
Figura 28. Trituradora de piedra-Tipo cono.....	93
Figura 29. Zaranda vibratoria.....	94
Figura 30. Molino de carbón- Tipo bolas o cuerpos moledores .....	95
Figura 31. Recintos de las fuentes sonoras .....	96

Figura 32. Ubicación fuentes sonoras .....	97
Figura 33. Ubicación de receptores y puntos de control.....	99
Figura 34. Receptores R1 y R2 .....	100
Figura 35. Puntos de control Barrera 2 .....	100
Figura 36. Tipo de plantación triangular uniforme .....	101
Figura 37. Barrera 1 .....	102
Figura 38. Cortinas de árboles - barrera 1 .....	103
Figura 39. Barrera 2 .....	104
Figura 40. Fotografía Barrera 2.....	105
Figura 41. Vegetación estudiada.....	106
Figura 42. Hojas .....	107
Figura 43. DAP .....	108
Figura 44. Medición altura de los árboles.....	109
Figura 45. Altura de los árboles .....	110
Figura 46. Equipo de medición niveles de presión sonora .....	111
Figura 47. Equipos de medición meteorología y posicionamiento .....	113
Figura 48. Mediciones en R1-todas las fuentes .....	116
Figura 49. Mediciones en R1 (F3+F4).....	117
Figura 50. Mediciones en R2 (F1+F2+F3+F4).....	119
Figura 51. Mediciones en R2 (F3+F4).....	120
Figura 52. Evolución NPS en R2- (F1+F2+F3+F4) .....	122
Figura 53. Curva de permanencia R2 con fuentes principales operativas .....	123
Figura 54. Curva de permanencia en R2: F3+F4 .....	125
Figura 55. Evolución NPS en R2 (F3+F4).....	125
Figura 56. Evolución NPS en R1 (F1+F2+F3+F4).....	126
Figura 57. Curva de permanencia R1: F1+F2+F3+F4.....	127
Figura 58. Curva de permanencia en R1: F3+F4 .....	128
Figura 59. Evolución NPS en R1 (F3+F4).....	128
Figura 60. Tramo F1-P5.....	130
Figura 61. Tramo F2-P1 .....	131
Figura 62. Chequeo 1-F1 y F2 .....	132
Figura 63. Chequeo espectros F1 y F2 y propagación F1 .....	133

Figura 64. Chequeo 2- F1 y F2 .....	133
Figura 65. Propagación F1 + F2 hacia P1 .....	134
Figura 66. Chequeo 3- F1 y F2 .....	134
Figura 67. Propagación F1 + F2 hacia P3 .....	135
Figura 68. Tramo F3-R2 .....	136
Figura 69. Tramo F4-R2 .....	137
Figura 70. Chequeo F3 y F4.....	138
Figura 71. NPS en R2: F3 (cilíndrica) + F4 (cilíndrica) .....	139
Figura 72. NPS en R2: F3 (esférica) + F4 (cilíndrica).....	140
Figura 73. Barrera B1.1 .....	141
Figura 74. NPS medidos y calculado en R1 sin atenuación por follaje (F3+F4) 142	
Figura 75. NPS eq y calculado en R1 sin atenuación por follaje (F3+F4) .....	143
Figura 76. NPS en R1 con atenuación por follaje (F3+F4) .....	144
Figura 77. NPS eq y calculados en R1 con atenuación por follaje (F3+F4).....	144
Figura 78. Barreras B1.2-B1.3 y B1.4 .....	145
Figura 79. NPS en R1 sin atenuación por follaje (F1+F2).....	146
Figura 80. NPS en R1 con atenuación por follaje (F1+F2) .....	147
Figura 81. Cortinas de árboles-Barrera 1 .....	148
Figura 82. NPS en R1 sin atenuación del follaje (F1+F2+F3+F4) .....	149
Figura 83. NPS eq y calculado-R1 sin atenuación por follaje (F1+F2+F3+F4) .	150
Figura 84. NPS en R1 con atenuación del follaje (F1+F2+F3+F4).....	151
Figura 85. NPS eq y calculado-R1 con atenuación por follaje (F1+F2+F3+F4) 151	
Figura 86. Esquema tramo F4-R1 .....	153
Figura 87. Difracción por laterales de la barrera.....	158
Figura 88. NPS en R1-varios métodos (F4) .....	159
Figura 89. Resultados obtenidos sin considerar efecto de la barrera de árboles. 162	
Figura 90. Resultados obtenidos considerando efecto de la barrera de árboles.. 163	
Figura 91. Barrera 2-Puntos P1 y P2.....	164
Figura 92. NPS medido y calculado en P1.....	165
Figura 93. NPS en P2-sin atenuación por el follaje .....	166
Figura 94. NPS medido y calculados en P2 con atenuación del follaje.....	167
Figura 95. Barrera 2- Puntos P3 y P4.....	168

Figura 96. NPS medidos en P3 y P4 .....	168
Figura 97. NPS medido y calculado en P3.....	169
Figura 98. NPS medido y calculado en P4.....	170
Figura 99. Valores medidos y esperables en P3 y P4 .....	171
Figura 100. NPS medido y calculados en P4 con atenuación por el follaje .....	172



## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-Impedancia acústica del medio .....	20
Ecuación 2-Potencia acústica en función de la energía .....	21
Ecuación 3-Nivel de potencia acústica .....	22
Ecuación 4-Potencia acústica en función de la intensidad.....	22
Ecuación 5-Nivel de Intensidad acústica .....	22
Ecuación 6- Relación entre Nivel de potencia y nivel de intensidad acústica.....	22
Ecuación 7-Nivel de presión sonora .....	23
Ecuación 8-Propagación de las ondas sonoras.....	23
Ecuación 9-Propagación esférica .....	24
Ecuación 10-Propagación cilíndrica .....	24
Ecuación 11-Propagación hemisférica.....	25
Ecuación 12-factor de directividad .....	25
Ecuación 13-Índice de directividad.....	26
Ecuación 14-Corrección por directividad .....	26
Ecuación 15-Nivel de presión sonora-Método Concawe.....	27
Ecuación 16-Ecuación básica ISO 9613 .....	28
Ecuación 17-Cálculo de atenuación total según ISO 9613 .....	28
Ecuación 18-Divergencia esférica.....	34
Ecuación 19-Divergencia esférica al duplicar la distancia .....	34
Ecuación 20-Divergencia cilíndrica.....	34
Ecuación 21-Divergencia cilíndrica al duplicar la distancia.....	35
Ecuación 22-Velocidad del sonido en función de la Temperatura .....	36
Ecuación 23-Velocidad del sonido en función de T° y Hr .....	36
Ecuación 24-Atenuación por absorción atmosférica.....	37
Ecuación 25-Atenuación por efecto del suelo- Concawe .....	40
Ecuación 26-Atenuación por efecto del suelo ISO 9613 .....	41
Ecuación 27-altura media del camino de propagación sonido.....	42
Ecuación 28- atenuación por efecto del suelo-No plano.....	42
Ecuación 29-Nivel de Presión sonora en receptor .....	43
Ecuación 30-Leyes de Snell .....	53
Ecuación 31-Energía absorbida.....	55

Ecuación 32-Absorción del sonido .....	56
Ecuación 33-Absorción total con presencia de varios elementos .....	56
Ecuación 34-Energía Transmitida.....	57
Ecuación 35-Pérdidas por transmisión.....	58
Ecuación 36-Pérdidas de inserción-ecuación general .....	59
Ecuación 37-Pérdidas de inserción-Hoover .....	60
Ecuación 38-Pérdidas de inserción- Maekawa .....	61
Ecuación 39-Número de Fresnel.....	61
Ecuación 40-Número de Fresnel barrera delgada .....	61
Ecuación 41-Número de Fresnel barrera gruesa .....	61
Ecuación 42-Pérdidas de inserción Maekawa- considera efecto del suelo.....	63
Ecuación 43-Perdidas de inserción-Algoritmo de Kurze-Anderson.....	64
Ecuación 44-Atenuación por difracción en el borde superior de la barrera.....	66
Ecuación 45-Atenuación por difracción alrededor del borde de la barrera .....	66
Ecuación 46-Atenuación por la barrera ISO 9613-2.....	66
Ecuación 47-factor de corrección por factores meteorológicos.....	67
Ecuación 48-factor corrección difracciones $C_3$ .....	68
Ecuación 49-diferencia de trayectoria: sonido difractado y directo- difracción sencilla.....	68
Ecuación 50-diferencia de trayectoria: sonido difractado y directo- difracción múltiple .....	68
Ecuación 51-Nivel medio de presión acústica ponderado A, a largo plazo.....	68
Ecuación 52-Corrección por efectos meteorológicos a largo plazo.....	69
Ecuación 53- porosidad del suelo .....	74
Ecuación 54- Tortuosidad suelo.....	80
Ecuación 55- atenuación sonora de setos.....	83
Ecuación 56- Área basal.....	87

## 1 INTRODUCCIÓN

La contaminación sonora es un problema ambiental, que, si bien ha existido desde la antigüedad, cada vez adquiere más visibilidad y relevancia por sus implicaciones no solo a nivel de la salud y bienestar de las personas sino por la afectación que puede ocasionar para otras especies. En 2011 la Organización Mundial de la Salud jerarquizó el tema del ruido como un problema de salud pública, lo cual le dio una importancia a nivel mundial.

Dada la importancia que fue adquiriendo a través del tiempo, cada vez se avanza en la búsqueda de alternativas para mitigar el impacto del ruido del tránsito, de las industrias y emprendimientos en general con criterios de costo beneficio. Si se enfoca en lo meramente preventivo, el ideal sería evitar la generación del ruido, situación ésta que parece un tanto utópica en la actualidad.

En muchos casos, ante la imposibilidad actuar sobre la fuente de ruido para evitarlo o minimizarlo se opta por medidas como la utilización de barreras acústicas entre la fuente y el receptor que se busca proteger.

El presente estudio tiene como objetivo determinar si una forestación de Eucalyptus está actuando como barrera acústica para mitigar el ruido en una planta industrial.

Esta plantación se hizo con el objetivo de mitigar el impacto sobre el paisaje y favorecer la percepción social de la Planta Industrial buscando una transición visual de la Industria con el entorno donde se encuentran áreas sembradas con esta misma vegetación.

Lo anterior significa que la Plantación no fue hecha para disminuir el ruido y por tanto no tiene en su diseño consideraciones acústicas de base que permitan inferir que es efectiva en el control del ruido, sin embargo, gran parte del área forestada está ubicada entre las fuentes de ruido y los receptores, tiene un espesor y altura tal que permite al menos tomar como punto de partida la posibilidad de que esté actuando como una barrera. Lo anterior permite que sea de interés estudiarla como una barrera para concluir sobre su funcionalidad.

Para llevar adelante este estudio se realizaron mediciones de ruido en cuatro fuentes sonoras (F1, F2, F3 y F4), en dos puntos receptores (R1 y R2) y 4 puntos de control (P1, P2, P3 y P4) En lo que respecta a las mediciones de los Receptores, se cuenta con mediciones cuando no se tenía la forestación, y hasta 5 años después de su crecimiento cuando los árboles han alcanzado una altura promedio de 10,0 m.

Se validaron los valores obtenidos experimentalmente con las predicciones de los modelos teóricos que describen el comportamiento de la propagación del sonido en exteriores con y sin la presencia de las barreras.

## 2 ANTECEDENTES

La efectividad para mitigar el ruido por parte de un conjunto de árboles que no han sido plantados con este objetivo, y no obedecen a un diseño acústico, en donde intervienen además varias fuentes y varios receptores, no es sencillo. Adicional a lo anterior, en la propagación del sonido en exteriores bajo condiciones no controladas aparecen muchas variables que pueden llegar a dificultar la interpretación de los resultados.

Pese a lo anterior, el interés por esta temática no es nuevo, como se evidenció en la revisión de bibliografía, encontrando estudios desde 1946 hasta nuestros días, con estudios tanto a nivel de laboratorio como experimentación in situ.

En el ítem 4.1 se incluyen algunos de los trabajos revisados en el desarrollo de este proyecto, con su respectivo resumen y en algunos casos con sus principales conclusiones. Esto ayudará a entender cómo ha sido la evolución de esta temática a través del tiempo. Se han incluido aquellos trabajos que están más relacionados con el objetivo de la investigación, pero se menciona que existen más que, por cuestiones del alcance de este proyecto, no fueron incluidos.00

### 3 FUNDAMENTACION TEORICA

El conocimiento de todos los fenómenos físicos (principalmente)<sup>1</sup> presentes en la propagación del sonido en campo libre es el punto de partida de esta investigación.

Para ello, hay que partir desde el conocimiento de las características de las fuentes generadoras del sonido, cómo se propagan las ondas sonoras, cómo es su comportamiento ante la presencia de obstáculos, y cómo las condiciones atmosféricas influyen en los fenómenos que se dan en la propagación. Todos estos elementos permitirán por un lado calcular (teóricamente) cuál es la atenuación obtenida en el camino del sonido, y por consiguiente cuáles son los niveles sonoros que llegan a un receptor de interés y, por otro lado, comparar dichos cálculos con los obtenidos experimentalmente a través de mediciones en un período de tiempo para un caso específico de estudio como método de validación de los modelos predictivos.

A continuación, se desarrollan los conceptos teóricos más relevantes que serán tenidos en cuenta en el presente estudio.

#### 3.1 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Las ondas sonoras son ondas mecánicas longitudinales que se generan por variaciones de presión (perturbaciones) del medio en el que ocurren. Esta propagación se da cuando cada partícula se desplaza en forma longitudinal de su posición de equilibrio, impactando a la partícula más cercana y generándole el mismo efecto de desplazamiento.

Para que exista la propagación de las ondas sonoras debe existir un medio material, el cual puede ser sólido, líquido o gaseoso. Tierra, agua o aire son ejemplos de estos respectivamente, y la velocidad del sonido decrece en este mismo orden de medio. Cada uno de estos medios tiene propiedades físicas diferentes de temperatura, presión, humedad y densidad, por lo cual la velocidad del sonido varía en función de estas propiedades y no de las características propias de la onda.

#### 3.2 IMPEDANCIA ACÚSTICA DEL MEDIO

Una de las características del medio de propagación es la impedancia acústica ( $Z$ ), nombre que tiene su origen en la Ley de Ohm, teoría básica de los circuitos eléctricos.

La impedancia acústica es la resistencia que opone el medio a las ondas sonoras que se propagan sobre este. Es una medida de la eficiencia del medio para la propagación de las ondas sonoras, que trae asociada una disipación de energía. Depende de la densidad del medio ( $\rho$ ) y de la velocidad de propagación del sonido ( $c$ ) según la Ecuación 1.

$$Z = \rho c \tag{1}$$

Donde:

---

<sup>1</sup> Se dice principalmente, porque para el caso de presencia de nieve, también se consideran aspectos de tipo termodinámico.

$Z$ : Impedancia acústica del medio (Rayls)

$\rho$ : Densidad del medio ( $\text{kg/m}^3$ )

Para el caso del aire, a  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  y a una presión atmosférica de 1 atm,  $1,225\text{ kg/m}^3$

$c$ : velocidad del sonido (m/s)

Para el caso del aire, a  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  y una presión atmosférica de 1 atm,  $344\text{ m/s}$

En estas condiciones el aire presenta una impedancia acústica ( $Z$ ) de 406 Rayls (Pa s/m).

### 3.2.1 Impedancia acústica de un obstáculo

Cuando la onda sonora emitida y propagada a través del aire entra en contacto con un medio de impedancia acústica más alta, como puede ser una barrera acústica, provoca que una gran parte de las ondas sean reflejadas y se disipe la energía, que es uno de los objetivos perseguidos al instalar una barrera.

### 3.3 PROPAGACIÓN EN CAMPO LIBRE

Se denomina campo libre al espacio en el cual se propaga el sonido a través del aire y que tiene como característica ser un espacio abierto, es decir un espacio sin obstáculos. Para el estudio de las barreras acústicas, las ondas sonoras se propagan a campo libre hasta que encuentran un obstáculo que es la barrera.

El fenómeno de la propagación de las ondas sonoras en el aire a campo libre ha sido ampliamente estudiado a través del tiempo y para determinar la forma en que se propagan las ondas sonoras en campo libre, se debe acudir a las características de la fuente.

#### 3.3.1 La fuente sonora

El tipo y características de la fuente son el punto de partida para determinar la propagación de las ondas sonoras.

En cuanto a las características de la fuente, se destaca la potencia acústica ( $W$ ), que es una característica intrínseca de la fuente, no depende de nada más. Es la cantidad de energía acústica que puede emitir la fuente en un período de tiempo, según la Ecuación 2.

$$W = \frac{E}{\Delta t} \quad (2)$$

Donde:

$W$ : Potencia acústica de la fuente (Wattios o Watts o Vattios)

$E$ : energía acústica de la fuente (Joules).

Un Joule es la energía que requiere para desplazar 1,0 m el punto de aplicación de una fuerza de 1 Newton (N)

$\Delta t$ : tiempo (s)

De otra parte, el nivel de potencia acústica ( $L_w$ ) guarda una relación no lineal respecto a la potencia acústica de la fuente, como se observa a continuación.

$$L_w = 10 \times \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (3)$$

Donde:

$L_w$ : Nivel de Potencia acústica (dB)

$W$ : Potencia acústica de la fuente (Wattios)

$W_0$ : Potencia acústica correspondiente al umbral de audición, o de referencia. En unidades del SI, equivale a  $10^{-12}$  Wattios.

$L_w$  es inherente a la fuente y no depende de otros factores externos.

Al expresar esta ecuación anterior en función de la intensidad acústica, se tiene

$$W = I \times S \quad (4)$$

Donde:

$W$ : Potencia acústica (Wattios)

$I$ : Intensidad acústica o flujo de energía ( $W/m^2$ )

$S$ : Área normal a la dirección de la propagación ( $m^2$ )

Dicho de otra forma, la intensidad acústica ( $I$ ) es la cantidad de potencia sonora ( $W$ ) que se puede transmitir en una dirección determinada por unidad de área ( $S$ ).

Sustituyendo esta expresión en la Ecuación 3 se obtiene que el nivel de potencia acústica se puede expresar en función del nivel de intensidad acústica (Ecuación 5):

$$L_i = 10 \times \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (5)$$

Luego:

$$L_w = 10 \times \log \left( \frac{I \times S}{I_0 \times S_0} \right)$$

$$L_w = 10 \times \log \left( \frac{I}{I_0} \right) + 10 \times \log \left( \frac{S}{S_0} \right)$$

$$L_w = L_i + 10 \times \log \left( \frac{S}{S_0} \right)$$

Si se toma al área  $S_0$  como  $1 \text{ m}^2$

$$L_w = L_i + 10 \times \log(S) \quad (6)$$

El nivel de intensidad acústica ( $L_i$ ) que llega a un receptor (oído humano) corresponde a un nivel de presión sonora ( $L_p$ ) que se expresa mediante la Ecuación 7

$$L_p = 10 \times \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (7)$$

Donde:

$L_p$ : Nivel de Presión sonora (dB)

$p$ : Presión sonora (Pascales)

$p_0$ : Presión sonora de referencia o umbral de la audición (Pascales). Corresponde a  $20 \times 10^{-6}$  Pa.

La presión sonora depende de las características de la fuente y del punto donde es medida, que a su vez está asociada a un recorrido de las ondas sonoras: medio de propagación, atenuación por la distancia a la fuente de sonido.

El nivel de presión sonora resulta de interés puesto que es el generalmente está definido en las normativas ambientales. Es el resultado al que se quiere llegar convirtiéndose en el objetivo cuando se tratan medidas de mitigación de ruido.

Si se mantiene el mismo medio de propagación,  $L_i=L_p$ , la Ecuación 6 se podrá resumir como sigue

$$L_w = L_p + 10 \times \log(S) \quad (8)$$

Donde:

$L_w$ : Nivel de potencia acústica (dB)

$L_p$ : Nivel de presión sonora (dB)

$S$ : Superficie que atraviesa la onda sonora ( $m^2$ )

Esta superficie ( $S$ ) de pasaje de las ondas sonoras en la dirección de la propagación varía dependiendo del tipo de fuente, como se verá a continuación.

### 3.3.2 Propagación

La característica de la fuente tiene una relación directa con su forma de propagación en el aire. En campo abierto se presentan distintos tipos de fuentes: fuentes puntuales y fuentes lineales.

Una fuente puntual es aquella fuente que es posible representarla esquemáticamente y para fines analíticos mediante un punto. Una fuente lineal es aquella que se puede representar, a la escala de trabajo, como una línea (puede ser una calle, una ruta, una cinta transportadora, etc.). También se encuentran fuentes que, a la escala de trabajo, se consideran como fuentes de área o manchas acústicas, dado que, a la escala de trabajo, aparecen como bidimensionales.

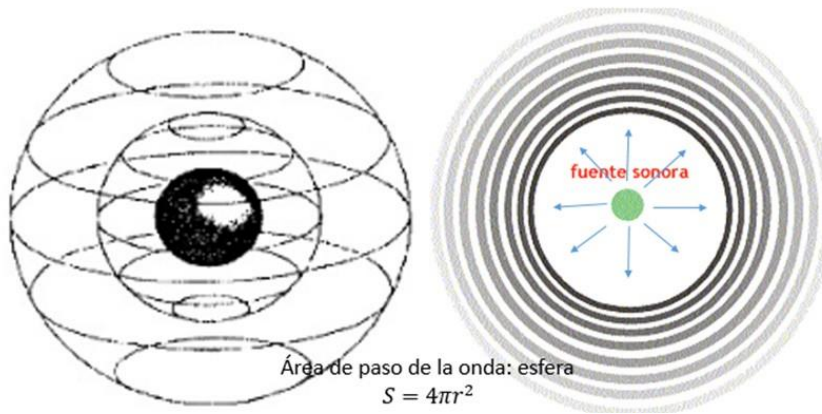
Por lo general, lo que se encuentra en el ambiente es una combinación de estas fuentes.

#### 3.3.2.1 Propagación esférica

Para una fuente puntual donde la potencia acústica se concentra en un sitio único, donde el sonido se emite en todas las direcciones (omnidireccional) de una manera homogénea (isótropa), la propagación se da en forma de esferas concéntricas donde la fuente es el centro, por lo que se conoce como propagación esférica. En la medida que se aumenta la distancia a la fuente, el radio de las esferas es cada vez mayor. Ver Figura 1.



Figura 1. Propagación esférica



Fuente: basado en [http://cv.uoc.edu/UOC/a/moduls/90/90\\_574b/web/main/m6/c3/15.html](http://cv.uoc.edu/UOC/a/moduls/90/90_574b/web/main/m6/c3/15.html)

El área de paso de las ondas es el área de una esfera, por lo cual reemplazando en la Ecuación 8 se tiene:

$L_w = L_p + 10 \times \log(4 \times \pi \times r^2)$  llegando a la siguiente simplificación:

$$L_w = L_p + 10 \times \log(r^2) + 11 \quad (9)$$

### 3.3.2.2 Propagación cilíndrica

Para una fuente lineal (como una carretera, una vía de ferrocarril, por ejemplo), donde la fuente sonora se asume como unidimensional, la propagación de las ondas sonoras a través del medio tiene un comportamiento distinto. Para poder expresarlo matemáticamente, se asumirá como si se tratara de una fuente lineal, pero de longitud infinita, de tal manera que cada segmento de una longitud  $l$  se pueda tratar como un cilindro y la propagación se hará en superficies cilíndricas coaxiales con el eje en la fuente. Ver Figura 2.

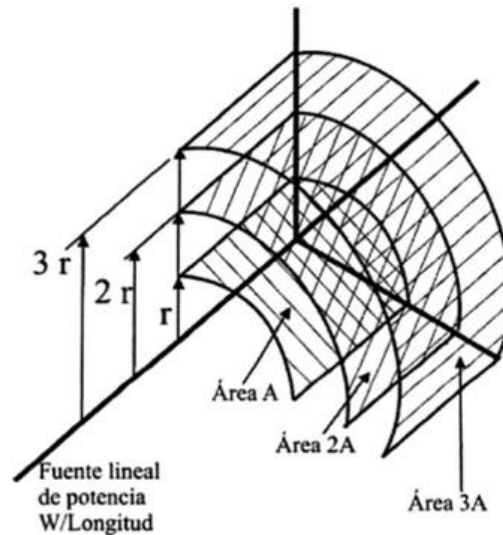
Reemplazando esta nueva superficie de paso en la Ecuación 8, se obtiene lo siguiente

$$L_w = L_p + 10 \times \log(2 \times \pi \times r) ,$$

llegando a la siguiente simplificación:

$$L_w = L_p + 10 \times \log(r) + 8 \quad (10)$$

Figura 2. Propagación cilíndrica



Nota. Fuente: Parrondo et al. 2006

### 3.3.2.3 Propagación hemisférica

Volviendo a las fuentes puntuales, no siempre es posible contar con una fuente puntual ideal que sea omnidireccional, encontrándose en muchos casos con que la fuente se encuentra apoyada sobre un elemento. La propagación en este caso no se hace en forma de esferas, sino de semiesferas donde el área a considerar es la mitad de la esfera.

Reemplazando en la Ecuación 8 se tiene lo siguiente:

$$L_w = L_p + 10 \times \log(2 \times \pi \times r^2),$$

llegando a la siguiente simplificación

$$L_w = L_p + 10 \times \log(r^2) + 8 \quad (11)$$

Del mismo modo se presentan situaciones donde la fuente puntual no es omnidireccional ni isotrópica. Pueden presentar alguna preferencia direccional, producto de su punto de fijación o de otras características propias de la fuente, y la intensidad puede no ser la misma en todas las direcciones.

En estos casos se debe recurrir a una corrección denominada factor de directividad (Q), el cual corrige la dirección real con relación a si la fuente emitiera las ondas de forma omnidireccional y a su vez relaciona la energía que se irradia en la dirección preferente (real) y la que se irradiaría con una fuente isotrópica (ideal).

El factor de directividad se puede calcular mediante la Ecuación 12.

$$Q = \frac{S_1}{S_2} \quad (12)$$

Donde:

$Q$ : factor de directividad

$S_1$ : Área de propagación asumiendo una fuente omnidireccional e isotrópica =  $4 \times \pi \times r^2$

$S_2$ : Relación del Área real respecto al Área de propagación ideal (fuente omnidireccional e isotrópica)

El Índice de directividad es, por su parte, el factor de directividad expresado en dB, como se muestra en la siguiente expresión.

$$D_c = 10 \times \log Q \quad (13)$$

A continuación, se presenta un resumen de las posiciones más comunes de las fuentes puntuales con sus respectivos  $Q$  y  $D_c$

Tabla 1- Índice (D) y factor de Directividad (Q)- fuentes puntuales

<i>caso</i>	<i>Tipo de propagación</i>	<i>Factor de directividad (Q)</i>	<i>Índice de directividad (D<sub>c</sub>) en dB</i>
Fuente omnidireccional e isotrópica (ideal)	esférica	$Q = \left( \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2} \right) = 1$	$D_c = 10 \log(1) = 0$
Fuente en un semiespacio (fuente en un plano, que irradia a media esfera)	hemisférica	$Q = \left( \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2 / 2} \right) = 2$	$D_c = 10 \log(2) = 3$
Fuente en un cuadrante del espacio (Como por ejemplo si está apoyada en dos planos, como el suelo y un muro)	Propagación en un cuarto del espacio	$Q = \left( \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2 / 4} \right) = 4$	$D_c = 10 \log(4) = 6$
Fuente en un octante del espacio	Propagación en un octavo del espacio	$Q = \left( \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2 / 8} \right) = 8$	$D_c = 10 \log(8) = 9$

*Nota.* Fuente: basado en Miyara, 1999

Si se desea obtener el nivel de presión sonora en un punto se deberá partir del supuesto de que la propagación es omnidireccional y hacer la corrección de acuerdo con la

$$L_{p,r} = L_{p,omnidireccional} + D_c$$

$$L_{p,r} = L_{p,omnidireccional} + 10 \times \log Q \quad (14)$$

Donde:

$L_{pr}$ : Nivel de presión sonora a una distancia  $r$  cuando la fuente no es omnidireccional (dB)

$L_p$ : Nivel de presión sonora a una distancia  $r$ , si la fuente fuera omnidireccional (dB)

La propagación de las ondas sonoras en campo libre depende de las características de la fuente. En la medida que avanza el frente de onda y este se aleja del foco sonoro, la energía sonora emitida por la fuente se va repartiendo sobre superficies cada vez mayores, esto es lo que se conoce como divergencia geométrica.

### 3.4 ATENUACION DEL SONIDO EN CAMPO LIBRE

La relación distancia y forma de propagación, las condiciones atmosféricas como la temperatura, la acción del viento, la humedad relativa, el tipo de suelo, la niebla, y la interposición de obstáculos naturales o artificiales en el camino del frente de las ondas, influyen en la propagación del sonido y causan un efecto de atenuación.

Estos atenuantes fueron considerados y compilados en la Norma ISO 9613 Parte 2, cuyo contenido se resume en la sección 3.4.2

#### 3.4.1 Método Concawe (1981)

El método CONCAWE fue publicado en 1981 para predecir los niveles de presión sonora en exteriores de los complejos petroleros y petroquímicos.

Es aplicable para distancias de hasta 2 km y alturas de fuentes de hasta 25 m (Evans & Cooper, 2012).

El nivel de presión sonora en el receptor está determinado según la Ecuación 15:

$$L_p = \sum_{i=1}^n (L_w + D + A_d + A_a + A_s + A_m + A_b + K_1 + K_2) \quad (15)$$

Donde:

$L_p$ : Nivel de presión sonora en el receptor (dB)

$n$ : Fuentes existentes

$L_w$ : Nivel de potencia sonora de la fuente (dB)

$D$ : Índice de Directividad (dB)

$A_d$ : Atenuación por la distancia del receptor a la fuente- divergencia (dB)

$A_a$ : Atenuación generada por las absorción del aire (dB)

$A_s$ : Atenuación generada por las condiciones del suelo (dB)

$A_m$ : Atenuación generada por las condiciones meteorológicas (dB)

$A_b$ : Atenuación por presencia de barreras (dB)

$K_1$ : Corrección por la altura de la fuente

$K_2$ : Corrección por apantallamiento de zonas edificadas

### 3.4.2 Método Norma ISO 9613 (1993-1996)

En 1993 la Organización ISO, publica la primera parte de la Norma ISO 9613 la cual compila y trata los factores más destacados respecto a la atenuación del sonido durante propagación en exteriores presentando métodos de cálculo para la atenuación generada por la absorción atmosférica. Posteriormente, en 1996 se publica la segunda parte, donde se presentan además de las condiciones atmosféricas como factor de atenuación del sonido, tratados en la parte 1, otros factores entre los que se destaca la presencia de obstáculos o pantallas, eje central de este trabajo.

La Parte 1 (ISO 9613-1): *Attenuation of sound during propagation outdoors- Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*, se trata de un método para calcular la atenuación del sonido que se genera por la absorción atmosférica cuando existe propagación del sonido a campo libre. Predice el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A -  $L_{Aeq}$  dadas unas condiciones meteorológicas.

Considera las variables temperatura, humedad relativa, presión del aire y la frecuencia del sonido. Los valores de atenuación en función de cada variable son tabulados y presentados para rangos de temperatura, presión y frecuencias más comúnmente encontradas. Ver Tabla 2.

La Parte 2 (ISO 9613-2): *Attenuation of sound during propagation outdoors - General method of calculation*, es el método para calcular la atenuación del sonido en exteriores, la cual incluye los elementos que pueden generar atenuación en exteriores como son la distancia, atmósfera, el suelo y la presencia de barreras.

La ecuación general que permite calcular el Nivel de presión sonora en el receptor es la siguiente:

$$L_p = L_w + D + A \quad (16)$$

Donde:

$L_p$ : Nivel de presión sonora continuo equivalente en el receptor para una fuente puntual (dB)

$L_w$ : Nivel de potencia sonora por banda de octava (dB) producida por una fuente puntual relativa a una potencia sonora de referencia de 1 picowatt (1 pW)

$D$ : Índice de directividad (dB)

$A$ : atenuación total por banda de octava (dB) durante la propagación del sonido de la fuente al receptor (dB)

La atenuación total por banda de octava ( $A$ ) se presenta en la Ecuación 17.

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{suelo} + A_{bar} + A_{misc} \quad (17)$$

Donde:

$A$ : atenuación total obtenida en el receptor (dB)

$A_{div}$ : atenuación debido a la divergencia geométrica (dB)

$A_{atm}$ : atenuación debido a la absorción atmosférica (dB)

$A_{suelo}$ : atenuación por efecto del suelo (dB)

$A_{bar}$ : atenuación por efecto de barreras (dB)

$A_{misc}$ : atenuación por otros efectos similares (dB): propagación a través de bosque, sitios industriales y áreas habitacionales.

El método de cálculo es aplicable bajo ciertas condiciones, las cuales se resumen a continuación.

### 3.4.2.1 Condiciones de aplicación método

#### 3.4.2.1.1 Condiciones atmosféricas

Sin presencia de neblina, al menos significativa y sin presencia de contaminantes atmosféricos. En definitiva, con condiciones de estabilidad atmosférica, aunque en el Anexo C se extiende el método en condiciones no homogéneas, que incluyen condiciones que varían en relación a la altura sobre el suelo.

Condiciones más comúnmente encontradas:

Frecuencia: 50 Hz a 10 kHz

Temperatura: -20 °C a +50 °C

Humedad relativa: 10 % a 100 %

Presión: 101,325 kPa (una atmósfera)

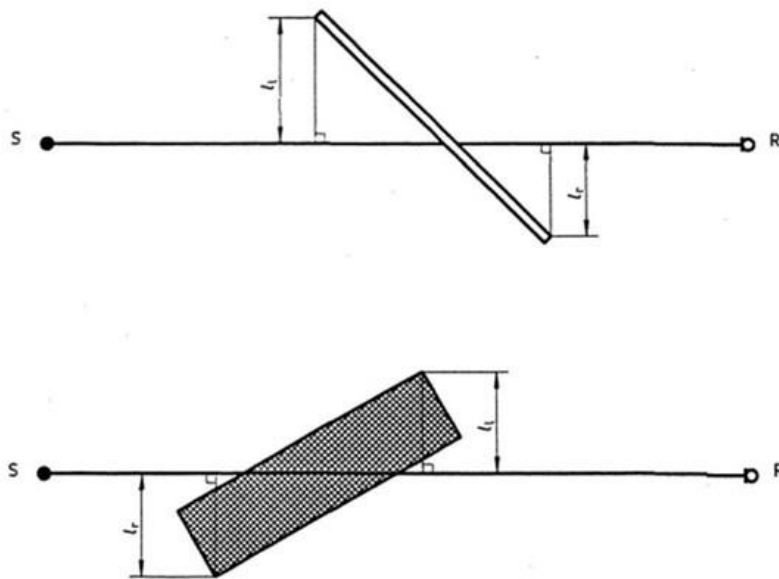
Velocidad del viento hasta 5 m/s en alturas entre 3 y 11 m del suelo.

#### 3.4.2.1.2 Barrera acústica

El método considera que se trata de una barrera acústica si cumple con lo siguiente:

- Si la densidad superficial de la barrera es como mínimo 10 kg/m<sup>2</sup>
- Si es una entidad cerrada, compacta sin ningún tipo de perforación que permita el paso del sonido
- Si la dimensión horizontal normal a la línea fuente-receptor es más grande que la longitud de onda  $\lambda$  de la frecuencia central de la banda de octava. Es decir,  $L_l + L_r > \lambda$ . Ver Figura 3

Figura 3. Chequeo condiciones Barrera ISO 9613



Nota. Fuente: ISO 9613-2

### 3.4.2.2 Validación del método

La Norma abarca los principales factores de atenuación del sonido. La precisión de los cálculos ha sido validada a través de investigaciones y mediciones en campo en diversas condiciones a través del tiempo. Las investigaciones realizadas ponen de manifiesto algunas limitaciones del método de acuerdo con las validaciones hechas por diversos autores. Guimarães (2017) cita las siguientes limitaciones en la evaluación de la propagación del sonido desde un parque eólico:

- La ISO 9613-2 subestima los niveles de sonido [Evans y Cooper, 2012]
- Para distancias entre 100 m y 1.000 m con altura de la fuente hasta 30 m, la precisión del método puede variar  $\pm 3$  dB, y para distancias superiores a 1 km, la precisión del método no está definida [Hart et al., 2016].
- Se recomienda agregar 3 dB (A) a los resultados de presión sonora en los casos en que el receptor está en un valle [Bass et al., 1998].

### 3.4.3 Otros métodos y modelos

En la medida que se avanza con investigaciones en el campo de la acústica, y de la mano con la innovación tecnológica, se van desarrollando nuevos métodos y modelos cuyo objetivo es buscar más precisión en los cálculos, involucrando más variables que permitan validar mediante resultados prácticos todos los principios, ecuaciones y formulaciones analíticas.

A continuación, se presentan algunos modelos que se han desarrollado a través del tiempo, con algunas de sus características, sin un detalle de su metodología o ecuaciones por no ser el objeto principal de esta investigación.

### **3.4.3.1 NORD 2000**

Es un modelo de predicción desarrollado por los Países Escandinavos entre 1996-2.000, que tuvo su primera versión en 2001 y una revisión en 2006. Se utiliza para predecir la propagación de sonido en exteriores. Tiene en cuenta las características de la fuente, la divergencia geométrica, la absorción atmosférica, los efectos del suelo y la dispersión producida por obstáculos como árboles, viviendas, etc. Considera un amplio espectro de frecuencias en bandas de tercios de octava: entre 25 y 10.000 Hz.

En lo que respecta al efecto del suelo, presenta siete categorías de suelo en función de su resistividad del flujo de aire en el suelo, desde muy suave a superficie muy dura.

### **3.4.3.2 Harmonoise**

Es un modelo desarrollado por un grupo de trabajo en el marco de un proyecto de la Unión Europea. Aunque se enfoca en el tráfico en carretera y ferrocarril, sus algoritmos de cálculo punto a punto permiten su uso para ruido industrial. El proyecto Harmonoise se finalizó en 2005.

Al igual que el modelo Nord 2000, considera un amplio espectro de frecuencias en bandas de tercios de octava: entre 25 y 10.000 Hz.

El modelo tiene en cuenta la propagación del sonido a través de varios perfiles de terreno complejos y, en una amplia variedad de condiciones meteorológicas.

### **3.4.3.3 NMPB-Routes**

Es un método francés desarrollado en 1996 para tráfico rodado, que tiene su nueva versión NMPB Routes 2008.

Trabaja en bandas de tercio de octava para frecuencias entre 100 y 5.000 Hz. A diferencia del Nord 2000 y el modelo Harmonoise, trabaja con solo dos condiciones meteorológicas: favorables para la propagación del sonido (homogéneas) y desfavorables para la propagación del sonido (refracción descendente).

### **3.4.3.4 TNM-Traffic Noise Model**

Es un método desarrollado en 1998 por la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos y que se usa para predicción de los niveles sonoros en carreteras. Ha tenido varias versiones. TNM 1.0 (1998), TNM 1.1 (2000), TNM 2.0 (2002), TNM 2.5 (2004) y TNM 3.0 (2017). Este último puesto a consideración de los usuarios es la base para el TNM 3.1 (2021) el cual se revisa actualmente.

Esta última versión FHWA actualiza los algoritmos acústicos para admitir análisis de ruido más precisos. Utiliza una interfaz gráfica de usuario que incorpora la capacidad de sistemas de información geográfica (GIS). Tiene algoritmos acústicos actualizados incluida la capacidad de procesar reflejos de barreras individuales, así como capacidades  $L_{10}$  /  $L_{50}$  e interoperabilidad a través de un complemento TNM para ArcGIS® de Esri, AutoCAD® de AutoDesk® y MicroStation® de Bentley.



### 3.4.3.5 ENM- Environmental Noise Model

Es un modelo australiano desarrollado por RTA Technology Pty Ltda utilizado para predecir el nivel de presión sonora en inmisión. Trabaja en bandas de octava o bandas de tercio de octava a frecuencias entre 25 Hz y 20.000 Hz.

El programa permite la modelación de distintos tipos de fuentes (puntuales, lineales, planas y superficiales) considerando aspectos topográficos y una variedad de condiciones atmosféricas. ENM es que puede modelar los efectos del terreno variable aplicando la teoría de atenuación de la barrera de Maekawa al terreno que bloquea la línea de visión de una fuente de ruido.

### 3.4.3.6 Aplicaciones

A través de tiempo se han desarrollado varias investigaciones cuyo objetivo es verificar las similitudes y diferencias de los resultados obtenidos en estudios experimentales respecto a los valores esperados al aplicar un modelo u otro. Como resultados se obtienen similitudes y diferencias que son explicadas por las limitaciones que tienen cada uno de los modelos para las situaciones estudiadas.

A continuación, se incluyen a manera de ejemplo algunos de estos estudios, pero hay muchos más, los cuales no se presentan por estar fuera del alcance de la investigación.

Salomons et al. (2011) realizaron una comparación del Modelo Nord200 y el modelo Harmonoise para 16 casos, con una fuente puntual y varias distancias fuente-receptor, varios tipos de suelos y distintas condiciones de viento con y sin presencia de barreras. Entre las conclusiones se tiene que, para este caso de estudio, Harmonoise se desempeña mejor que Nord 2000 para un caso con refracción descendente de más de 300 m de terreno plano, tanto para terreno duro como para terreno absorbente. En lo que respecta a la presencia de una barrera, investigaron el efecto que esta tiene sobre la propagación, al actuar sobre el perfil de velocidad del viento puesto que una barrera "bloquea" el viento. Concluyeron que este efecto no es tenido en cuenta por ninguno de los dos modelos, ni el modelo de ingeniería Harmonoise ni por el Nord 2000. Se destaca también que para el caso de estudio el modelo Harmonoise es un poco más preciso que Nord 2000 y en general concluyen que la aplicación de los dos métodos en entornos urbanos puede resultar muy compleja por las múltiples reflexiones con los edificios, situación que podría resolverse introduciendo fuentes de imagen y receptores de imagen, y utilizando la ponderación de Fresnel para tener en cuenta la reducción de la eficiencia de la reflexión con un orden de reflexión creciente (debido a la relación finita entre la altura del edificio y la longitud de onda). De todas maneras, representa un desafío en lo que respecta a la practicidad y eficiencia de los modelos (Salomons et al., 2011).

Guimarães da Silva (2017) realizó una comparación de la precisión de los modelos de propagación de sonido Nord 2000, CONCAWE e ISO 9613-2, contrastando los resultados con los niveles de presión sonora medidos en un parque eólico en el norte de Suecia que tenía como receptor una vivienda cercana. Como resultados, entre otros, se tiene que el modelo ISO 9613-2 no funcionó bien para las condiciones específicas del sitio en el parque eólico. Por otro lado, el método CONCAWE y el Modelo Nord 2000 mostraron una alta precisión, para condiciones de viento a favor con velocidad de 8 m/s. Para esta condición, el Modelo Nord 2000 es más preciso, ya que calcula mejor la refracción de los rayos de sonido (Guimarães da Silva, 2017).

Van Renterghem et al. (2018) realizaron la validación de varios modelos, contrastando los resultados obtenidos con mediciones in situ. El sitio seleccionado fue una carretera de

circunvalación en Amberes y se midió durante un mes en 2 puntos ubicados estratégicamente: un punto cercano (MP1), que linda directamente con la carretera, a 30 m del centro de la carretera y un Punto en la parte superior del talud (MP2), a 80 m de MP1. Entre sus resultados se observa por ejemplo que el modelo ISO 9613-2 está muy lejos de los datos medidos (esperado  $\Delta L_p = 7,0$  dB frente a lo medido = 13,9 dB en escala A). En el caso de Nord 2000, los valores de atenuación resultantes dieron por encima de los valores de la ISO 9613, con valores elevados en frecuencias bajas (entre 100 y 200 Hz).

Existen muchas más investigaciones con estudios de caso, donde se busca comparar lo efectivamente medido, con los valores obtenidos a través de modelos teóricos o empíricos y en algunos además comparando los resultados obtenidos entre un modelo y otro, (Michael Hankard, Cerjan and Leasure, 2006; Witte 2018) o con la aplicación de inteligencia artificial (Doolan, 2008), pero sobre los cuales no se tratará en este estudio.

### 3.4.4 Divergencia geométrica

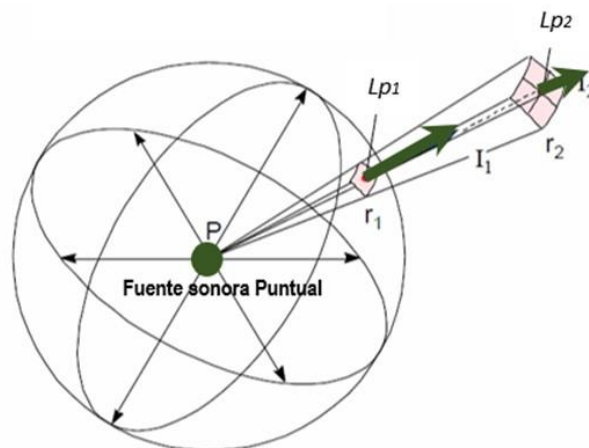
La onda sonora, en la medida que se propaga, sufre una atenuación o divergencia geométrica, que es la pérdida de energía en función de la distancia recorrida en el medio de propagación por el frente de ondas. Esa atenuación depende de las características de la fuente que generó la perturbación inicial.

#### 3.4.4.1 Divergencia por propagación esférica

En el campo lejano, se puede afirmar que la propagación para cualquier tipo de fuente es aproximadamente esférica (Piercy et al., 1977).

Una representación de este efecto se presenta en la Figura 4.

Figura 4. Divergencia esférica



Nota. Fuente: basado en Brüel & Kjaer.

La variación del nivel de presión sonora se expresa mediante la Ecuación 18.

$$Lp_2 = Lp_1 - 10 \times \log \left( \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) \quad (18)$$

Donde:

$L_{p2}$ : Nivel de presión sonora en el Punto 2 (dB)

$L_{p1}$ : Nivel de presión sonora en el Punto 1 (dB)

$r_2$ : Distancia de la fuente al Punto 2 (m).

$r_1$ : Distancia de la fuente al Punto 1 (m)

Se ha considerado que  $r_2 > r_1$ , es decir que la onda se va alejando de la fuente a medida que recorre la distancia.

*“La Intensidad del sonido en campo abierto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia respecto de la fuente, según La Ley del Cuadrado Inverso”* (Everest, 2009)

Si se define una distancia  $r_1$  y se quiere determinar a cuánto equivale la atenuación al duplicar dicha distancia  $r_1$ , es decir  $r_2 = 2r_1$  para este tipo de propagación, bastará con reemplazar las distancias en la Ecuación 18, obteniendo lo siguiente

$$Lp_2 = Lp_1 - 10 \times \log \left( \frac{(2r_1)^2}{r_1^2} \right)$$

Llegando a la siguiente simplificación:

$$Lp_2 = Lp_1 - 6 \quad (19)$$

Esto significa que cuando se tiene este tipo de propagación esférica, se genera una divergencia donde al duplicar la distancia a la fuente, se logra una atenuación de 6 dB.

#### 3.4.4.2 Divergencia por propagación cilíndrica

A la atenuación generada en este caso se conoce como divergencia cilíndrica. En la Figura 5 se muestra una representación gráfica.

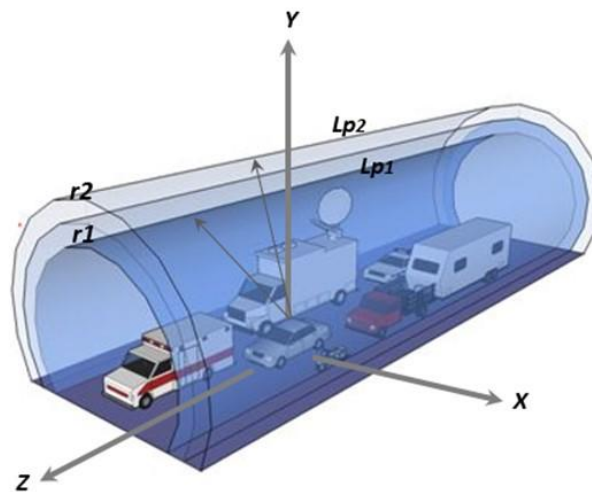
El nivel de presión sonora  $L_{p2}$  en un Punto ubicado a una distancia  $r_2$  de la fuente cuando se da una propagación cilíndrica está dado por la Ecuación 20.

$$Lp_2 = Lp_1 - 10 \times \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (20)$$

Si se quiere conocer como varía la atenuación al duplicar la distancia, se obtiene:

$$Lp_2 = Lp_1 - 10 \times \log \left( \frac{2r_1}{r_1} \right)$$

Figura 5. Divergencia cilíndrica



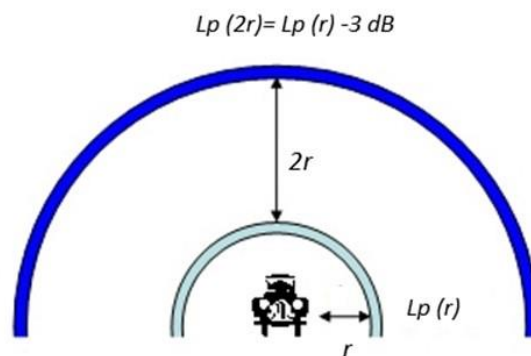
Nota. Fuente: Basado en <https://slideplayer.es/slide/8179755/>

Llegando a la siguiente simplificación

$$Lp_2 = Lp_1 - 3 \quad (21)$$

Esto significa que cuando se tiene divergencia cilíndrica en un medio homogéneo, cada vez que la distancia a la fuente se duplica, se genera una atenuación de 3 dB.

Figura 6. Divergencia cilíndrica al duplicar la distancia



Nota. Fuente: Basado en <https://sites.Google.com/site/megafoniaysonorizacionjorgep/10-megafonia-y-sonorizacion/01-principios-basicos-de-sonido/1-4-niveles-acusticos/1-4-4-propagacion-de-las-ondas-sonoras-en-el-espacio-libre>

### 3.4.5 Absorción del aire

Beranek (1969) mencionaba que, en el exterior, la atenuación del sonido es mucho mayor que adentro de un recinto, aun en los días en que el aire está "en calma". La mayor atenuación se debe al siempre presente movimiento del aire y a los gradientes localizados de temperatura y los movimientos rotacionales

El aire como medio de propagación de las ondas sonoras no es de densidad completamente homogénea y no está en absoluto reposo en un amplio espacio geográfico, aspectos que fueron considerados en el análisis de la divergencia geométrica. Esto indica que hay otros aspectos relacionados con el medio de propagación que influyen en la atenuación del sonido y que deben ser tenidos en cuenta.

La atenuación por absorción del aire tiene un efecto apreciable solamente para altas frecuencias (mayores a 2.000 Hz) y en medias a grandes distancias (mayores a 100 m) porque se pueden presentar variaciones en las condiciones atmosféricas que involucran pérdida de energía provocada por la viscosidad del aire y al calor generado por el roce de las partículas del aire. Es decir que hay un efecto por la Humedad relativa y la Temperatura.

#### 3.4.5.1 Temperatura

La velocidad del sonido en un gas (aire) no es constante, sino que depende de la temperatura.

Partiendo de la ecuación de un gas ideal se llega a la siguiente expresión con la temperatura  $T$  expresada en °C.

$$c = 331,4 + (0,61 \times T) \quad (22)$$

(Beranek, 1969 p.10)

Donde:

$C$ : *velocidad del sonido (m/s)*

$T$ : *Temperatura del aire (°C)*

De acuerdo con lo anterior, el sonido se desplaza más rápido en el aire caliente que en el aire frío.

#### 3.4.5.2 Humedad relativa

La humedad relativa es otro de los parámetros que hay que considerar cuando el sonido se propaga a través de la atmósfera a grandes distancias (algunos cientos de metros o mayores) ya que ésta absorbe energía sonora debido a la viscosidad del aire, a la conducción térmica, a la difusión de los diferentes constituyentes del aire y a procesos de absorción molecular del nitrógeno y del oxígeno principalmente (Tarrero, 2002).

La velocidad del sonido se puede aproximar por la siguiente relación:

$$c = 331,4 + (0,61 \times T) + (0,0124 \times Hr) \quad (23)$$

Donde:

*c:* velocidad del sonido (m/s)  
*T:* Temperatura del aire (°C)  
*Hr:* Humedad relativa (%)

De acuerdo con la expresión presentada, a menor humedad relativa, menor densidad del gas, de manera que el sonido se propaga a mayor velocidad en el aire seco que en el aire húmedo.

De acuerdo con ISO 9613, la atenuación debido a la absorción atmosférica  $A_{at}$ , en decibeles, durante la propagación a través de una distancia  $d$ , en metros, está dada por la Ecuación 24.

$$A_{atm} = \left( \frac{\alpha d}{1.000} \right) \quad (24)$$

Donde:

$A_{Atm}$ : Atenuación por factores atmosféricos en (dB)

$\alpha$ : Coeficiente de atenuación atmosférica para cada banda de octava, depende de la frecuencia central (dB/km)

$d$ : distancia (m)

En la Tabla 2 se muestran los valores de atenuación ( $\alpha$ ) en dB/km en función de la temperatura, la humedad relativa y frecuencias del sonido, para algunos valores comunes de estas variables.

Tabla 2- Atenuación del sonido por absorción del aire (dB/km)

T (°C)	HR (%)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
-5	10	0,55	1,69	4,20	6,86	8,29	9,18	11,10	18,30
	15	0,36	1,11	3,49	8,34	13,10	15,60	18,10	25,50
	20	0,28	0,80	2,60	7,72	16,00	22,40	26,40	34,30
	30	0,22	0,52	1,58	5,33	15,70	31,80	44,20	55,40
	40	0,19	0,42	1,12	3,71	12,40	33,20	58,70	78,60
	50	0,18	0,38	0,90	2,80	9,68	30,10	66,40	100,00
	60	0,17	0,36	0,79	2,25	7,74	26,00	67,70	118,00
	70	0,16	0,35	0,72	1,90	6,38	22,20	65,00	131,00
	80	0,15	0,34	0,68	1,68	5,42	19,10	60,50	138,00
	90	0,14	0,34	0,66	1,52	4,72	16,70	55,50	140,00
	100	0,13	0,33	0,65	1,42	4,20	14,80	50,70	139,00
0	10	0,42	1,30	4,00	9,25	14,00	16,60	19,00	26,40
	15	0,30	0,82	2,63	8,14	18,30	27,20	32,60	40,90
	20	0,26	0,61	1,85	6,16	17,70	34,60	47,00	58,10
	30	0,22	0,47	1,17	3,73	12,70	36,00	69,00	95,20
	40	0,20	0,43	0,92	2,63	9,00	29,80	75,20	127,00
	50	0,18	0,41	0,82	2,08	6,83	23,80	71,00	147,00
	60	0,17	0,40	0,78	1,78	5,50	19,30	63,30	154,00
	70	0,15	0,39	0,76	1,61	4,64	16,10	55,50	153,00
	80	0,14	0,38	0,76	1,51	4,06	13,80	48,90	147,00
	90	0,13	0,37	0,76	1,45	3,66	12,10	43,20	138,00
	100	0,12	0,35	0,76	1,42	3,37	10,80	38,60	129,00
5	10	0,36	0,97	3,11	9,34	20,00	28,50	33,50	41,80
	15	0,29	0,66	1,90	6,32	18,90	39,60	56,20	69,10
	20	0,26	0,55	1,38	4,42	14,80	40,50	73,70	98,70
	30	0,23	0,49	1,01	2,74	9,18	30,90	82,60	147,00
	40	0,20	0,47	0,92	2,10	6,48	22,70	72,50	169,00
	50	0,18	0,46	0,89	1,82	5,08	17,50	60,20	168,00
	60	0,16	0,44	0,89	1,69	4,29	14,20	50,20	156,00

T (°C)	HR (%)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
	70	0,14	0,42	0,90	1,64	3,80	12,00	42,70	142,00
	80	0,12	0,39	0,90	1,63	3,50	10,50	37,00	128,00
	90	0,11	0,37	0,90	1,64	3,31	9,39	32,70	116,00
	100	0,10	0,35	0,89	1,66	3,20	8,58	29,40	105,00
10	10	0,34	0,79	2,29	7,52	21,60	42,30	57,30	69,40
	15	0,30	0,62	1,48	4,59	15,40	43,80	84,00	115,00
	20	0,27	0,58	1,20	3,27	11,00	36,20	91,50	154,00
	30	0,23	0,55	1,05	2,28	6,77	23,50	76,60	187,00
	40	0,19	0,52	1,04	1,98	5,07	16,80	59,00	177,00
	50	0,16	0,49	1,05	1,90	4,26	13,20	46,70	155,00
	60	0,14	0,45	1,05	1,90	3,86	11,00	38,40	134,00
	70	0,12	0,41	1,04	1,93	3,66	9,66	32,80	117,00
	80	0,11	0,38	1,02	1,97	3,57	8,76	28,70	103,00
	90	0,10	0,35	1,00	2,00	3,54	8,14	25,70	92,40
100	0,09	0,32	0,96	2,03	3,55	7,71	23,50	83,70	
15	10	0,35	0,74	1,78	5,58	18,40	43,90	87,30	114,00
	15	0,31	0,67	1,33	3,49	11,50	38,30	99,90	174,00
	20	0,27	0,65	1,22	2,70	8,17	28,20	88,80	202,00
	30	0,21	0,60	1,21	2,23	5,45	17,70	82,00	190,00
	40	0,17	0,54	1,23	2,18	4,51	13,10	45,70	156,00
	50	0,14	0,48	1,22	2,24	4,16	10,80	36,20	129,00
	60	0,12	0,43	1,18	2,31	4,06	9,50	30,30	108,00
	70	0,11	0,38	1,13	2,36	4,08	8,75	26,40	93,70
	80	0,09	0,34	1,07	2,40	4,15	8,31	23,70	82,80
	90	0,08	0,31	1,02	2,41	4,25	8,07	21,70	74,60
100	0,08	0,29	0,96	2,41	4,35	7,95	20,30	68,10	
20	10	0,37	0,78	1,58	4,25	14,10	45,30	109,00	175,00
	15	0,31	0,75	1,39	2,97	8,72	29,90	95,10	221,00
	20	0,26	0,71	1,39	2,60	6,53	21,50	74,10	215,00
	30	0,19	0,62	1,42	2,52	5,01	14,10	48,50	166,00
	40	0,15	0,52	1,39	2,63	4,65	11,20	36,10	128,00
	50	0,12	0,45	1,32	2,73	4,66	9,86	29,40	104,00
	60	0,10	0,39	1,23	2,79	4,80	9,25	25,40	87,80
	70	0,09	0,34	1,13	2,80	4,98	9,02	22,90	76,60
	80	0,08	0,30	1,04	2,77	5,15	8,98	21,30	68,60
	90	0,07	0,27	0,97	2,71	5,30	9,06	20,20	62,60
100	0,06	0,25	0,90	2,63	5,42	9,21	19,40	58,10	
25	10	0,37	0,87	1,61	3,56	10,70	36,60	110,00	233,00
	15	0,30	0,82	1,60	2,92	7,13	23,00	79,40	232,00
	20	0,24	0,74	1,64	2,86	5,87	17,00	58,80	196,00
	30	0,17	0,59	1,60	3,04	5,27	12,20	38,80	137,00
	40	0,13	0,48	1,47	3,19	5,39	10,70	30,10	104,00
	50	0,11	0,40	1,32	3,23	5,68	10,20	25,70	85,40
	60	0,09	0,34	1,18	3,18	5,96	10,20	23,20	73,40
	70	0,08	0,03	1,06	3,08	6,19	10,40	21,90	65,40
	80	0,07	0,03	0,96	2,96	6,35	10,70	21,10	59,80
	90	0,06	0,24	0,88	2,80	6,44	11,00	20,80	55,80
100	0,05	0,21	0,80	2,66	6,47	11,40	20,60	52,80	
30	10	0,36	0,96	1,82	3,40	8,67	28,50	96,00	260,00
	15	0,27	0,85	1,88	3,26	6,52	18,50	63,50	211,00
	20	0,21	0,73	1,87	3,41	6,00	14,50	47,10	165,00
	30	0,15	0,54	1,68	3,67	6,15	11,80	32,70	113,00
	40	0,11	0,43	1,45	3,70	6,63	11,40	27,00	87,10
	50	0,09	0,35	1,25	3,57	7,03	11,70	24,50	73,10
	60	0,08	0,30	1,09	3,36	7,29	12,20	23,40	64,70
	70	0,07	0,26	0,96	3,14	7,41	12,70	23,10	59,30

T (°C)	HR (%)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
	80	0,06	0,23	0,86	2,91	7,41	13,30	23,10	55,70
	90	0,05	0,20	0,78	2,71	7,32	13,80	23,50	53,30
	100	0,05	0,18	0,71	2,52	7,17	14,20	24,00	51,80
35	10	0,34	1,01	2,13	3,66	7,71	22,80	78,30	249,00
	15	0,24	0,83	2,13	3,88	6,74	16,00	51,30	179,00
	20	0,19	0,68	2,00	4,12	8,82	13,70	39,30	138,00
	30	0,13	0,49	1,65	4,22	7,55	12,80	29,70	94,50
	40	0,10	0,38	1,36	4,00	8,15	13,40	26,50	75,90
	50	0,08	0,31	1,14	3,66	8,43	14,20	25,70	66,20
	60	0,07	0,26	0,98	3,32	8,45	15,10	25,80	60,70
	70	0,06	0,22	0,85	3,01	8,30	15,90	26,50	57,70
	80	0,05	0,20	0,76	2,73	8,03	16,40	27,40	56,00
	90	0,04	0,17	0,68	2,50	7,71	16,80	28,30	55,20
	100	0,04	0,16	0,61	2,30	7,37	17,10	29,30	55,00
40	10	0,31	1,01	2,45	4,28	7,68	19,30	63,60	217,00
	15	0,21	0,77	2,28	4,68	7,68	15,20	43,20	149,00
	20	0,16	0,62	2,02	4,82	8,25	14,30	35,00	114,00
	30	0,11	0,43	1,55	4,56	9,24	15,00	29,30	82,80
	40	0,08	0,33	1,23	4,04	9,62	16,40	28,50	69,90
	50	0,07	0,27	1,02	3,54	9,52	17,70	29,20	64,00
	60	0,06	0,22	0,88	3,12	9,14	18,60	30,60	61,40
	70	0,05	0,19	0,75	2,77	8,66	19,20	32,10	60,50
	80	0,04	0,17	0,66	2,48	8,14	19,40	33,70	60,70
	90	0,04	0,15	0,59	2,25	7,62	19,40	35,10	61,50
	100	0,03	0,14	0,53	2,05	7,14	19,30	36,30	62,70

Nota. Presión atmosférica de referencia: 101,325 kPa. Fuente: Basado en ISO 9613-Parte 1

### 3.4.6 Suelo

El suelo, es otro elemento que interfiere en la propagación del sonido en exteriores, tanto como por ser una superficie absorbente como por ser un elemento que genera reflexión de las ondas sonoras.

*“Además de la absorción en el aire en sí, el sonido es también atenuado al propagarse sobre el suelo. Las áreas boscosas son más eficaces como atenuadoras del sonido que las pasturas. Las colinas y las montañas ayudan también a dispersar el sonido”* (Beranek 1969 p. 368 y 369).

En cuanto a la reflexión, cuando la atmósfera es homogénea, el coeficiente de reflexión de las ondas sonoras sobre el suelo depende de las propiedades del suelo, del ángulo de reflexión y de la geometría a través de la distancia (Attenborough, 1980).

#### 3.4.6.1 Tipo de suelo

La composición y propiedades mecánicas del suelo, asociadas mediante el concepto de impedancia acústica, serán fundamentales para determinar el rol que juega en los fenómenos de refracción, absorción y reflexión del sonido.

Las propiedades acústicas de la superficie del suelo son particularmente importantes a frecuencias inferiores a 500 Hz. A frecuencias más altas, el viento, los gradientes de temperatura y la turbulencia, influyen en la propagación del ruido de tal manera que los efectos del suelo se vuelven casi insignificantes (Glaretas, 1981). En el mismo sentido, la impedancia



del suelo, sobre el cual se propaga el sonido, afecta a la atenuación, principalmente a bajas frecuencias, en el rango de 250-500 Hz (Tarrero 2002).

Everest et al. (2009) mencionan que, en el exterior, en un espacio abierto, el único plano reflectante puede ser el suelo (p.226).

De acuerdo con el método de Concawe, la atenuación por efecto del suelo se calcula de la siguiente manera

$$A_{suelo} = a + b(\log r) + c(\log r^2) + e(\log r^3) \quad (25)$$

Donde:

$A_{suelo}$ : Atenuación por efecto del suelo (dB)

$a, b, c, e$ : Constantes que dependen de la estabilidad y la frecuencia

$r$ : distancia entre fuente y receptor (m).

Los valores de  $a, b, c$  y  $e$  se calculan de acuerdo con la ecuación de Concawe (aplicables para distancias mayores a 100 m entre la fuente y el receptor) y se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3- Atenuación por efecto del suelo según Concawe (constantes para el cálculo)

Constante	Frecuencias (Hz)						
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000
a	33,4	8,96	-64,2	-74,9	-100,1	-7,0	-16,9
b	-35,04	-35,8	48,6	82,23	104,68	3,5	6,7
c	9,159	20,4	-9,53	-26,921	-34,693		
e	-0,3508	-2,85	0,634	2,9258	3,8068		

Nota. Fuente: Basado en Echeverri C. (2017)

En cuanto a la norma ISO 9613-2, esta plantea cómo el efecto del suelo sobre la atenuación de las ondas sonoras está relacionado con dos aspectos: el tipo de suelo, y el camino de propagación de las ondas. El tipo de suelo es de relevancia para las frecuencias más bajas y se asocia a un factor de absorción (G), el cual se obtiene por métodos experimentales y cuyos valores se presentan en la Tabla 4

Tabla 4- factor de absorción del suelo

Tipo de suelo	Ejemplos	G
Suelo duro	Superficies con baja porosidad como: pavimentos, concretos, hielo y mezclas de suelos	0
Suelo poroso	Suelo cubierto por pasto, árboles u otro tipo de vegetación, y todo tipo de suelo adecuado para el crecimiento de vegetación, tal como las tierras de cultivo.	1
Suelo mixto	Si la superficie consiste de suelos duros y porosos.	0-1

Nota. Fuente: Basado en ISO 9613-2

### 3.4.6.2 Topografía: Suelo plano o de pendiente constante

Para suelos planos o con pendiente constante, el efecto del suelo varía en función de la proximidad a la fuente y al receptor, por ello para estudiar sus efectos se diferencian tres zonas: una zona cercana a la fuente, zona media y zona cercana al receptor.

- o Zona A o zona emisora: Es la zona cercana a la fuente. Si  $h_f$  es la altura de la fuente, la zona A irá desde la fuente hasta una distancia de  $30h_f$  en la dirección fuente-receptor.
- o Zona C o zona receptora: Es la zona cercana al receptor. Si  $h_r$  es la altura del receptor, la zona C irá del receptor a la fuente hasta una distancia de  $30h_r$  en la dirección receptor-fuente.
- o Zona B o zona intermedia: Es la zona comprendida entre las zonas A y C.

Si  $r$  es la distancia total proyectada en el plano del suelo entre la fuente y el receptor y si  $r$  es menor que  $30h_f + 30h_r$ , las zonas A y C están sobrestimadas y no existe la zona intermedia B.

La atenuación total por efecto del suelo se calcula según la Ecuación 26.

$$A_{suelo} = A_f + A_m + A_r \quad (26)$$

Donde:

$A_{suelo}$ : Atenuación del sonido por efecto del suelo (dB)

$A_f$ : Atenuación del sonido por efecto del suelo en la zona A (dB)

$A_m$ : Atenuación del sonido por efecto del suelo en la zona B (dB)

$A_r$ : Atenuación del sonido por efecto del suelo en la zona C (dB)

En la Tabla 5 se presenta para cada frecuencia, la relación de factor G con la expresión de atenuación en cada una de las zonas mencionadas.

Tabla 5- Atenuación por efecto del suelo- ISO 9613

Frecuencia (Hz)	$A_f$ o $A_r$ (dB)	$A_m$ (dB)
63	-1,5	-3e
125	(a)G-1,5	-3e(1-G)
250	(b)G-1,5	-3e(1-G)
500	(c)G-1,5	-3e(1-G)
1.000	(d)G-15	-3e(1-G)
2.000	(1-G)-1,5	-3e(1-G)
4.000	(1-G)-1,5	-3e(1-G)
8.000	(1-G)-1,5	-3e(1-G)

Nota. Fuente: Basado en ISO 9613-2

Los factores de atenuación se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6- Factores de atenuación por el suelo- ISO 9613

<i>Factor de atenuación</i>	<i>Método de calculo</i>
<i>a</i>	$a = 1,5 + 3,0e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-r/50}) + 5,7e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} r^2})$
<i>b</i>	$b = 1,5 + 8,6e^{-0,09h^2} (1 - e^{-r/50})$
<i>c</i>	$c = 1,5 + 14,0e^{-0,46h^2} (1 - e^{-r/50})$
<i>d</i>	$d = 1,5 + 5,0e^{-0,09h^2} (1 - e^{-r/50})$
<i>e</i>	$Si r < = 30 (h_f + h_r) \quad e = 0$
	$Si r > 30 (h_f + h_r) \quad e = 1 - \frac{30 (h_f + h_r)}{r}$

Nota. Fuente: Basado en ISO 9613-2

### 3.4.6.3 Topografía: pendiente no homogénea o no uniforme

Grandes variaciones en la topografía del terreno ente la fuente sonora y el receptor tienen incidencia en la atenuación del sonido debido a reflexiones que se generan sobre las superficies encontradas en el camino de la propagación.

El cálculo de atenuación de sonido por mecanismos, como refracción o reflexión del suelo, descrito en ISO 9613-2, aplica para suelos relativamente planos o con una pendiente constante, pero en la práctica no siempre se tiene dicha condición.

En algunas situaciones el terreno sobre el cual se evalúan los niveles sonoros no es totalmente plano, encontrándose diferencias en las cotas de nivel significativas entre la fuente y el receptor o en el trayecto. En estos casos según la Norma ISO 9613-2, la atenuación debida al suelo se trabaja con el concepto de altura media del camino de propagación sobre el suelo cuyos componentes se muestran en la Figura 7 y se define como:

$$h_m = \frac{F}{d} \quad (27)$$

Tomando la altura media del camino de propagación, la atenuación del suelo se expresa mediante la siguiente ecuación, según esta norma:

$$A_{\text{suelo}} = 4,8 - \left( \frac{2h_m}{d} \right) \left( 17 + \frac{300}{d} \right) \quad (28)$$

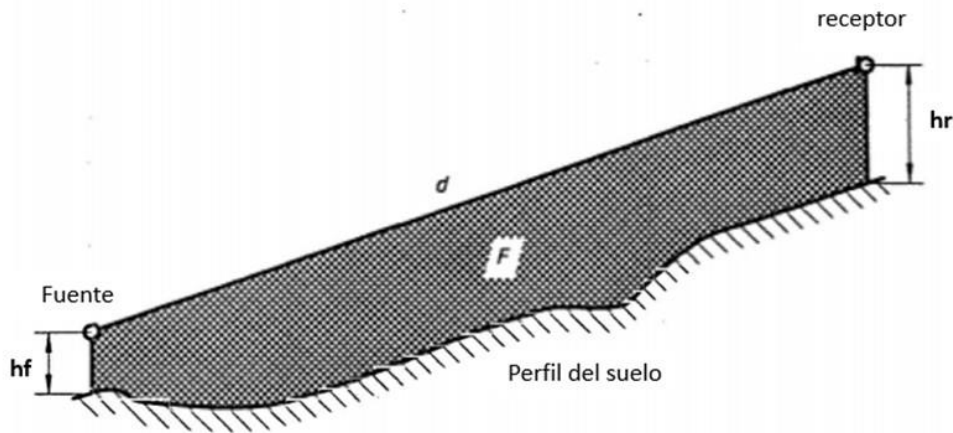
Donde:

$h_m$ : altura media del camino de propagación sobre el suelo (m)

$F$ : Área (m<sup>2</sup>)

$d$ : distancia real entre la fuente y el receptor (m)

Figura 7. Suelos con diferencia topográfica entre fuente y receptor.



Nota. Fuente: Adaptado de ISO 9613-2

Donde:

$A_{\text{suelo}}$ : Atenuación debida al suelo (no homogéneo, no plano ni con pendiente constante (dB)

$h_m$ : altura media del camino de propagación por encima del suelo (m)

$d$ : distancia entre la fuente y el receptor (m)

En caso de obtener valores negativos, estos deberán ser reemplazados por ceros.

Este método alternativo de cálculo es aplicable bajo las siguientes condiciones:

- Solo es de interés el nivel de presión acústica ponderado A en el receptor.
- La propagación del sonido se produce sobre suelos porosos o mixtos que en su mayoría sean porosos.
- El sonido no es un tono puro, y para superficies del suelo de cualquier forma.

Uno de los casos en donde existen diferencias topográficas importantes entre la fuente y el receptor es en minería a cielo abierto donde las fuentes sonoras están generalmente dentro del open pit y los receptores se encuentran en niveles muy superiores, como se muestra en la Figura 8.

De acuerdo con Pathak (1996), el nivel de presión sonora en el receptor teniendo en cuenta estas diferencias de cotas de terreno por la pendiente del open pit está dado por la siguiente expresión

$$L_p = L_w - A_s - A_g - A_a - A_b + D_c + R_c \quad (29)$$

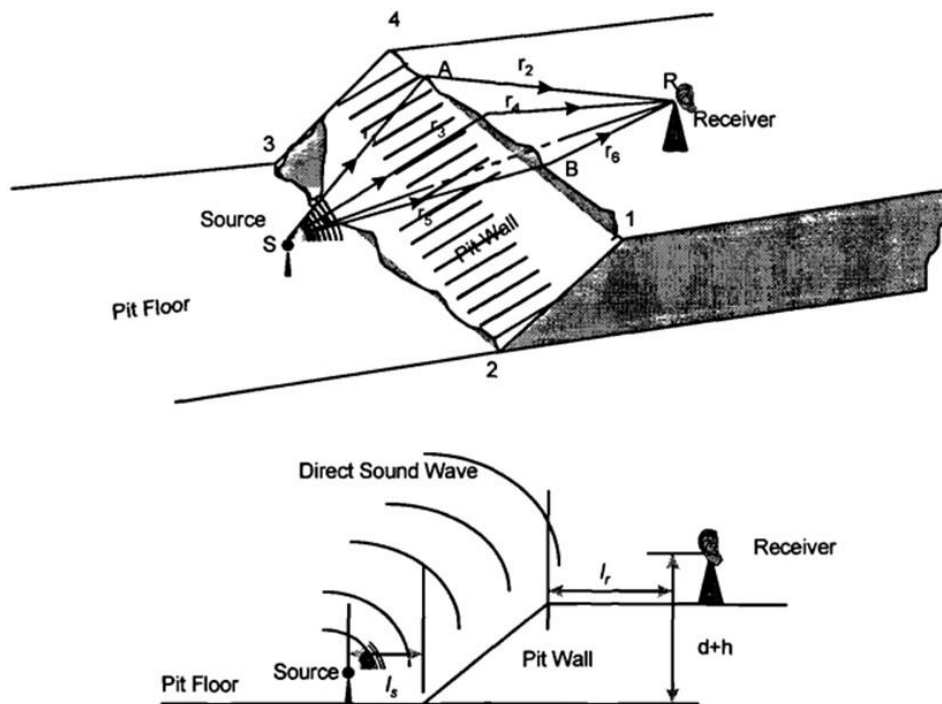
Donde:

$L_p$ : Nivel de presión sonora en el receptor

$L_w$ : Nivel de potencia sonora del Centro Acústico Equivalente<sup>2</sup>

<sup>2</sup> El Centro Acústico Equivalente es un concepto que se usa para representar como una única fuente puntual, varias fuentes generadoras de ruido en una misma área. Se utiliza sobre todo en zonas industriales donde hay presencia de varias fuentes de ruido trabajando de manera simultánea. Este Centro Acústico Equivalente debe estar caracterizado por una ubicación, por el nivel de potencia  $L_w$  y por un Índice de directividad  $a$  (Aister, 1982, citado por Kanhindra Pathak 1996).

Figura 8. Paredes del open pit como barrera acústica



Nota. Fuente: Pathak K. (1996)

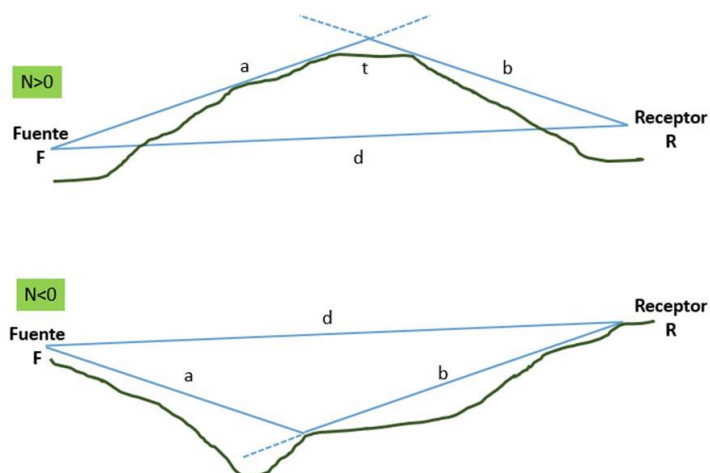
- $A_s$ : atenuación debido a la propagación (divergencia)
- $A_g$ : atenuación debida a la absorción del suelo
- $A_a$ : atenuación debida a la absorción del aire
- $A_b$ : atenuación debida a la pendiente del terreno como barrera de ruido
- $D_c$ : Corrección por directividad
- $R_c$ : Corrección por efectos de la reflexión

El efecto de las diferencias topográficas y terrenos accidentados entre la fuente y el receptor ha sido estudiado a través del tiempo, desarrollando modelos de predicción cuyo objetivo es incluir los aspectos topográficos, haciéndolos cada vez más precisos y aplicados a las condiciones que se encuentran en exteriores.

El Modelo Nord200 considera las diferencias en la topografía haciéndolo apto para ser usado en terrenos montañosos (Doran et al., 2016).

El modelo ENM (ver 3.4.3) posibilita que una topografía accidentada puede ser considerada como una hipotética barrera gruesa. Algunos ejemplos de terreno accidentado se presentan en la Figura 9.

Figura 9. Perfil terreno accidentado



Nota. Fuente: adaptado de Álvarez (2002)

El análisis en exteriores es generalmente complejo por la presencia de factores como fuentes múltiples, turbulencia atmosférica y la alta posibilidad de tener un terreno que en condiciones naturales no sea totalmente homogéneo y uniforme.

Attenborough, a través de varias investigaciones, demuestra el efecto del suelo en la propagación de las ondas sonoras. Algunas de estas investigaciones fueron consultadas en la realización de este trabajo, destacando aquí algunos aspectos de las más recientes.

En 2016, en su trabajo “*Exploiting ground effects for surface transport noise abatement*”, presenta cómo el suelo influye en la atenuación del sonido, donde juegan un papel relevante las propiedades de porosidad y rugosidad del suelo y su relación con los efectos de refracción, reflexión y la absorción, los cuales se tratarán en el capítulo 3.5.

*Los efectos del suelo en la propagación del sonido son el resultado de la interacción entre el sonido que viaja desde la fuente al receptor directamente y el sonido de la fuente al receptor que se refleja en el suelo y que tienen relación con dos propiedades del suelo: la porosidad (para suelos blandos) y la rugosidad (para otro tipo de suelos).*

*Las propiedades acústicas del suelo poroso están relacionadas con la capacidad del aire para moverse dentro y fuera de la superficie del suelo. La mayoría de las superficies exteriores naturales son porosas y, como resultado, el sonido puede penetrar en esta superficie porosa. El sonido reflejado en el suelo está, por lo tanto, sujeto a un cambio de fase, además de que parte de su energía se convierte en calor. (Attenborough, 2016, p.1)*

Si el suelo tiene un efecto en el comportamiento de las ondas sonoras, este puede ser tenido en cuenta como una medida de mitigación de ruido bajo ciertas circunstancias. Attenborough (2016) destaca el hecho de aprovechar los efectos de suelo para controlar el ruido a través de tratamiento o modificaciones sobre este, como, por ejemplo:

- (i) reemplazar el suelo acústicamente duro por un suelo acústicamente más blanda en una sola franja o en múltiples franjas o parches,
- (ii) elegir la superficie blanda que logre la mayor atenuación, aumentando su contribución con la vegetación, y,
- (iii) mediante laboreo de terrenos duros.

Se concluye que, si bien la atenuación por el efecto del suelo no es comparable con la que se obtendría al tener una barrera de ruido tradicional, presenta una ventaja desde el punto de vista visual y de impacto sobre el paisaje al no generar una divisoria en altura. Además, es posible explotar su capacidad de atenuación al complementarlo con vegetación.

La sustitución del suelo acústicamente duro por el suelo acústicamente blando ofrece además la oportunidad de aumentar el componente "verde" al paisaje, que resulta de gran interés en las ciudades (Attenborough, 2016 p.23).

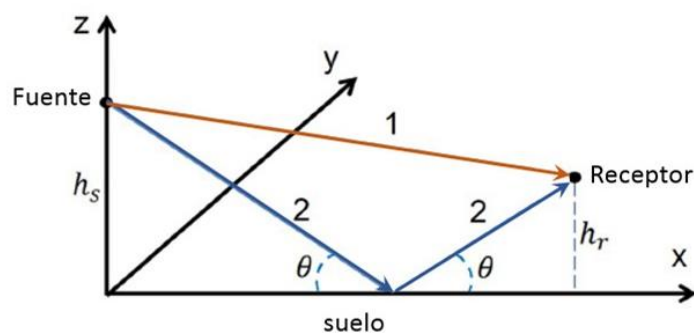
En 2018, en “*Correspondence between sound propagation in discrete and continuous random media with application to forest acoustics*”, Attenborough menciona que el suelo es un elemento que tiene influencia en la propagación del sonido y que, para el caso específico de un bosque, el suelo junto a otros factores como los troncos de los árboles, ramas, la atenuación visco-térmica, la vibración inducida en las copas de los árboles, y la micro meteorología complejizan el análisis de la propagación del sonido. Sin embargo, a pesar de tener varios elementos presentes al mismo tiempo, es posible mediante desarrollos matemáticos tener una aproximación de cálculo para la propagación del sonido en presencia de estos elementos. Parte del enfoque que la propagación del sonido en un bosque puede asimilarse a la propagación del sonido en una atmósfera turbulenta.

Cada componente presente en un bosque: suelo, troncos, ramas, y copas de los árboles puede tener una representación analítica que permita estudiar su comportamiento e interacción con las ondas sonoras.

*Por primera vez, la interferencia de las ondas directas y reflejadas en el suelo en un bosque se formuló analíticamente, ya que la mayoría de los modelos se basan en enfoques de ingeniería donde los diferentes factores de propagación se contabilizan por separado y sus interacciones se ignoran.* (Attenborough, 2018, p.1)

La Figura 10 muestra un esquema básico que describe la trayectoria de las ondas en relación con el suelo, tomado como uno de los puntos de partida del análisis realizado en su investigación.

Figura 10. Interferencia de ondas directas (1) y ondas reflejadas en el suelo (2)



*Nota.* Fuente: Basado en Attenborough et al., 2018

La interferencia entre las ondas directas y reflejadas resulta en máximos y mínimos del nivel de presión sonora en el receptor, lo cual depende tanto de la frecuencia como del factor de coherencia.

- Para un suelo desnudo en una atmósfera libre (factor de coherencia  $C_{coh}=1$ ), la interferencia entre las ondas directas y reflejadas en el suelo da como resultado máximos y mínimos del nivel de presión sonora en función de la frecuencia  $f$  del sonido.
- Cuando se trata de un bosque (suelo no desnudo y relativamente blando), donde además del suelo hay otros elementos presentes en el camino de la propagación de las ondas sonoras (para el caso estudiado  $C_{coh}=0,935$ ), al haber una pérdida de coherencia entre las ondas directas y reflejadas en el suelo, se genera un aumento aparente en el nivel de presión sonora.  
Esta disminución en la coherencia entre las ondas directas y reflejadas en el suelo se explica con la dispersión del sonido por la turbulencia atmosférica y los árboles.
- Cuando las ondas directas y reflejadas en el suelo son totalmente incoherentes ( $C_{coh}=0$ ), los máximos y mínimos se suprimen completamente y el nivel de presión sonora pasa a depender ligeramente de la frecuencia.

Es así cómo, el nivel de presión sonora que llega a un receptor, que es la suma de las ondas directas y reflejadas en el suelo, depende significativamente del factor de coherencia  $C_{coh}$ .

Otro factor que también influye en el comportamiento del suelo frente al sonido, es la presencia de nieve sobre este. Se menciona la nieve como otro elemento que tiene influencia en la propagación del sonido en exteriores, pero no se desarrolla este tema en el presente estudio, porque no está relacionado con las condiciones en las que se desarrolla el estudio de caso.

Capelli et al. (2016) presentan una revisión bibliográfica sobre diversos estudios que desde 1953 se han realizado sobre la nieve y sus propiedades acústicas. Se menciona, entre otros, a Oura (1953), quien fue uno de los primeros en medir la velocidad del sonido en la nieve; a Sommerfeld (1982) quien afirma que la nieve modifica las condiciones de transmisión no en el medio, sino en el suelo, modificando así las características del mismo; Attenborough y Buser (1988) y Marco et al. (1998), Boeckx et al. (2004) aplicaron el modelo de Johnson-Champoux-Allard (Allard y Attala, 2009, Champoux y Allard, 1991, Johnson et al., 1987) a la propagación del sonido sobre terreno cubierto de nieve.

### 3.4.7 Niebla

La niebla es considerada como un factor atmosférico que también tiene influencia en la atenuación del sonido en exteriores. Ha sido un fenómeno muy estudiado a través del tiempo pero que tiene pocos modelos validados en exteriores experimentalmente.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define la niebla atmosférica como la suspensión de gotas pequeñas de agua (con frecuencia, microscópicas) en el aire que también reduce la visibilidad horizontal en la superficie terrestre a menos de un kilómetro, a diferencia de la neblina, donde valores de la visibilidad se mantienen entre uno y dos kilómetros, calima o bruma donde la visibilidad es superior a dos kilómetros.

La niebla es por tanto un fenómeno meteorológico que se genera por la condensación del vapor de agua de la atmósfera y su formación es similar a las nubes, solo que se identifica por darse a una altura más baja. Se genera en condiciones estables, donde los fenómenos de turbulencia son mínimos



González Arias (2016), en su investigación sobre la propagación del sonido en exteriores en condiciones de niebla natural, no ácida<sup>3</sup>, menciona que ante la presencia de niebla suceden procesos no solo físicos, sino dinámicos y termodinámicos que influyen en la transmisión del sonido en la atmósfera como son: nucleación, difusión de vapor, colección o condensación, redistribución espacial y la radiación.

De la rigurosa revisión bibliográfica que realizó y a través del trabajo experimental en exteriores en presencia de niebla se resaltan los siguientes aspectos, sin entrar en el detalle y formulación de cada caso por no ser este el foco del presente estudio.

Cuando se iniciaron estudios relacionados con la niebla y su influencia en la propagación del sonido, William Derham en 1708, o John Herschel o en 1830, plantearon la posibilidad de que la niebla actuara como un fenómeno atenuador del sonido. En la medida que el fenómeno se ha ido estudiando y con base en la experimentación se ha llegado a conclusiones más específicas, que no son del todo apartadas de este planteamiento.

Entre los autores que cita González Arias (2016), se destacan los siguientes<sup>4</sup>:

- La niebla frecuentemente viene acompañada de unas condiciones atmosféricas homogéneas, faltas de viento y desprovistas de gradientes térmicos. El sonido se transmite frecuentemente con facilidad a través de la niebla y si el aire en el que existe la niebla, el granizo, la lluvia o la niebla es homogéneo, entonces el sonido lo atravesará con una pequeña modificación debido a la materia en suspensión (John Tyndall, 1873).
- Trabajos con niebla artificial en sitio cerrado permitieron estudiar la absorción del sonido por la condensación (Vern Oliver Knudsen, 1931).
- La evaporación y la condensación de las gotas de agua son el efecto más importante cuando hay presencia de niebla. Las partículas volátiles realizan transferencias de calor con el gas que las envuelve, pero sin interacciones viscosas entre las partículas y el gas (Oswatitsch, 1941).
- Hay movimiento de las partículas (Horace Lamb, 1945) y hay importantes intercambios térmicos en el proceso (Isakovich, 1948).
- Las pequeñas oscilaciones en un medio viscoso y la transferencia de calor con el medio son las causas principales de la atenuación del sonido por la niebla (Epstein y Carhart, 1953).
- En 1970 se llegó al primer gran modelo teórico que explica la transmisión del sonido en atmósfera con niebla donde juegan un rol predominante el tamaño de las gotas y la concentración de las mismas (Cole y Dobbins, 1970).
- Los procesos térmicos son los principales factores en la atenuación del sonido en medios con partículas suspendidas (Allegra y Hawley, 1971).
- Se considera que la niebla es una mezcla ideal de gas inerte y vapor conteniendo pequeñas gotas esféricas de líquido, todas de igual tamaño, donde las transferencias de masa entre las gotas y el vapor, así como las transferencias de momento y de calor entre las gotas y la mezcla de gas, son las que influyen en la dinámica de la niebla y por tanto en la atenuación del sonido (Davidson, 1975).

---

<sup>3</sup> Por niebla ácida se puede entender, aquella que se genera en zonas urbanas o industriales donde el aire no es del todo limpio y puede existir presencia de compuestos o radicales como el SO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, entre otros.

<sup>4</sup> Las referencias entre paréntesis son las citadas por González Arias en su trabajo, pero no fueron consultadas por el autor de la presente investigación.

- La cantidad de agua en suspensión en la niebla por unidad de volumen juega un papel primordial en la transmisión del sonido en medios con niebla y es la gran responsable de la absorción (Rozenfel'd, 1983).
- Incluso para una niebla densa, el calor específico y la masa del aerosol no cuentan más que una pequeña parte del uno por ciento del calor específico y masa del gas portador (Rozenfel'd, 1983).
- El tamaño de las gotas suspendidas en el aire tiene el efecto más significativo en la absorción de la energía acústica, y cuanto menor es el tamaño de las gotas en suspensión, mayor es la atenuación del sonido (Davidson, Mahanta et al., 1986).
- Para bajas frecuencias existe una dependencia no monótona entre la atenuación de la onda y la concentración másica de gotas, que es la mayor causa de atenuación. Lo anterior basado en el estudio de la propagación del sonido en sistemas reales de dos componentes vapor-gas-gotas, y teniendo en cuenta la no homogeneidad del medio (Nigmatulin y Gubaidullin, 2000).
- Cuando el medio es homogéneo, es decir el tamaño de las gotas es uniforme, el fenómeno más importante es la absorción. Si hay otro fenómeno que prevalezca es porque el medio no es homogéneo. Existe una variación con respecto a lo predicho por Cole y Dobbins, debido a varios factores, entre ellos el efecto de la relajación no lineal de las partículas en suspensión sobre el coeficiente de absorción (Max Kandula, 2012).
- En el caso de la niebla, las interacciones térmicas entre el aire y las gotas de líquido siempre van acompañadas de evaporación o condensación en la superficie de las gotas. La dispersión del sonido en la niebla se determina por la combinación de mecanismos de fuerza e interacción térmica entre el aire que contiene vapor de agua y gotas de agua (Shagapov y Sarapulova, 2014).

Con base en lo anterior, se destaca que el efecto de la niebla en la atenuación del sonido está relacionado con el tamaño medio de las gotas de agua, concentración de las gotas, y la fracción másica (relación entre la masa de las gotas de líquido y la del aire en un volumen dado).

De manera general y en relación a la influencia de los factores atmosféricos, se destaca que los efectos meteorológicos del viento, humedad relativa, temperatura del aire, presencia de nieve y presencia de niebla influyen porque alteran la dirección de las ondas sonoras, la turbulencia causa distorsión, y la viscosidad es la responsable de la absorción. Este último efecto es mucho mayor para las frecuencias altas que en las bajas.

### **3.4.8 Barreras u obstáculos**

Las condiciones atmosféricas y el suelo son factores que afectan la propagación de las ondas sonoras y pueden generar efectos de atenuación. Sin embargo, no son los únicos elementos que se encuentran en el camino de propagación del sonido en exteriores. Existen también las llamadas barreras, obstáculos o pantallas, que son elementos interpuestos entre la fuente y el receptor, que interfieren con la propagación del sonido y pueden llegar a generar una atenuación del mismo en función de variables como: material de la barrera, dimensiones, la ubicación respecto a la fuente. Todas estas variables jugarán un papel importante respecto a la efectividad de la barrera.

A la atenuación adicional que se produce por efecto de la presencia de la barrera y del suelo se la conoce como Exceso de atenuación (EA) y cuando solo se tiene en cuenta el efecto de la

barrera, la atenuación generada por esta se conoce como pérdidas de Inserción, Insertion Loss en inglés (IL).

Las pérdidas por inserción se pueden determinar por varios métodos analíticos cada uno de los cuales tiene alguna condición que los hace más o menos adecuados en su aplicación.

Para entender cada uno de los métodos es necesario tratar antes cada uno de los fenómenos físicos que suceden ante la presencia de una barrera, los cuales se describen en el siguiente capítulo.

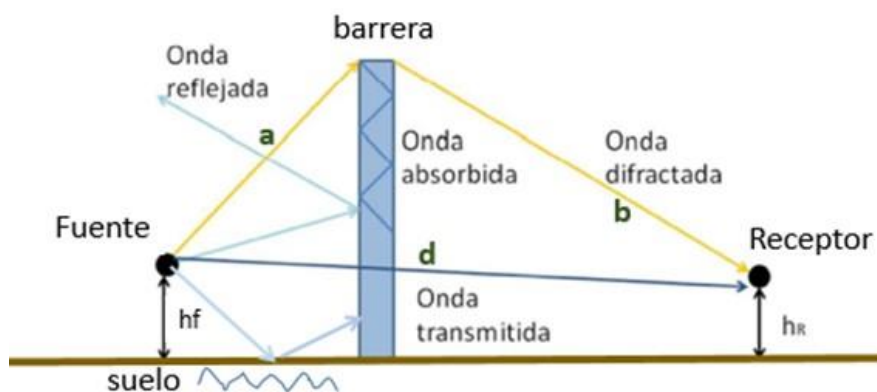
### 3.5 FENÓMENOS ANTE LA PRESENCIA DE UNA BARRERA

En la propagación del sonido a través de una barrera suceden fenómenos físicos que afectan la propagación y que están relacionados con el grado de atenuación del sonido.

En una barrera acústica ocurren varios fenómenos: reflexión, absorción, refracción (o transmisión) y difracción.

En la Figura 11 se observa un esquema general de la trayectoria de las ondas que permiten visualizar cada uno de estos fenómenos.

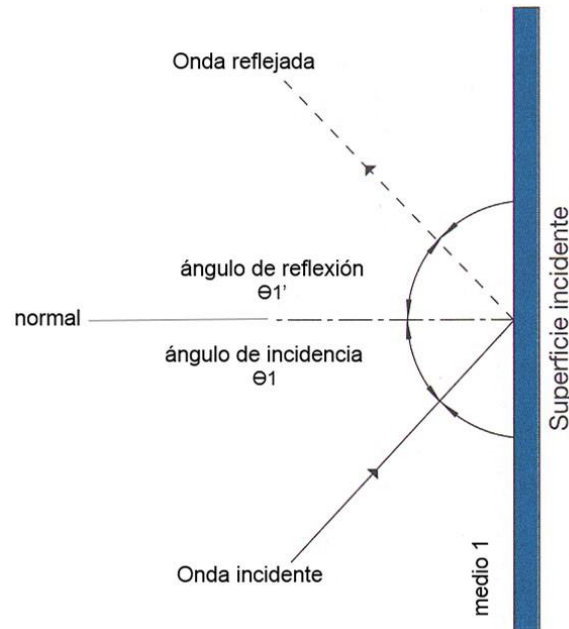
Figura 11. Fenómenos generados en una barrera acústica



#### 3.5.1 Reflexión

Ocurre cuando las ondas chocan contra la barrera (o el suelo) y parte de ellas no pueden atravesarla o no pueden pasar a través del material de la barrera. Parte de las ondas, al “rebotar” sobre la barrera, se devuelven al medio original (donde se produjo la onda) generando un ángulo de reflexión que es igual al ángulo de incidencia, siempre y cuando la barrera o superficie sobre la cual chocan sea lisa o relativamente uniforme, como se presenta en la Figura 12.

Figura 12. Reflexión del sonido



La reflexión varía en función de las frecuencias del sonido; es diferente para frecuencias altas que para bajas. Para el caso de las bajas frecuencias, al tener una longitud de onda grande, las ondas sonoras pueden rodear la barrera acústica y por consiguiente aumentar la posibilidad de continuar su viaje hacia al receptor.

La reflexión se da ante la presencia de cualquier elemento distinto a la onda sonora, es decir las ondas se reflejan sobre la barrera, sobre el suelo o sobre otros elementos presentes.

Cuando las ondas reflejadas llegan al origen antes que la onda transmitida llegue al receptor, se produce lo que se conoce como reverberación. Se caracteriza porque se sigue escuchando el sonido aún un tiempo después de que la fuente dejó de emitir.

Si las ondas sonoras se han extinguido, pero el sonido aún no es devuelto como una onda reflejada, se genera lo que se conoce como eco. En este caso, la onda reflejada llega al receptor en un tiempo superior al de la persistencia acústica<sup>5</sup>.

Tanto el eco como la reverberación son fenómenos relacionados con la reflexión, que adquieren importancia en los casos de acondicionamiento acústico de recintos como salones, restaurantes, auditorios, sitios delimitados, mas no así en estudios a campo abierto como el presente caso de estudio.

<sup>5</sup> “Persistencia acústica” es el fenómeno por el cual el cerebro humano interpreta como un único sonido dos sonidos diferentes recibidos en un corto espacio de tiempo.

### 3.5.2 Refracción

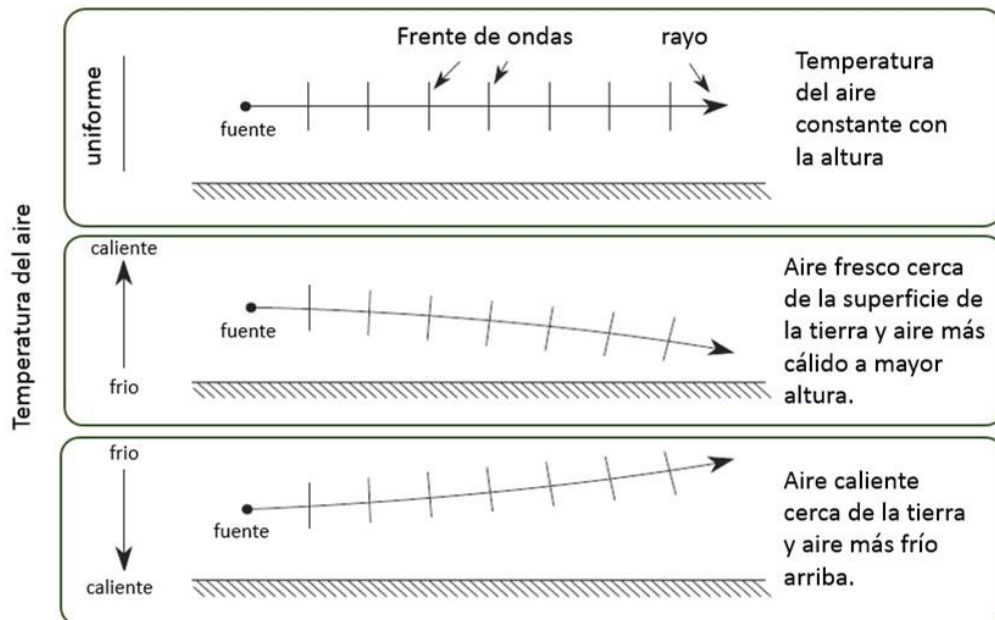
La refracción es el efecto por el que una onda sonora se desvía (“se curva”) hacia regiones donde la velocidad del sonido es menor. Esto puede originarse por las condiciones atmosféricas (refracción atmosférica) como se muestra en la Figura 13 o ante la presencia de obstáculos.

La refracción atmosférica se origina por el cambio de dirección que experimentan las ondas sonoras en función de la dirección del viento y la temperatura, que se resume así:

- Si las ondas sonoras tienen la misma dirección del viento, las ondas sonoras se curvarán hacia el suelo
- Si las ondas sonoras tienen dirección contraria a la del viento, las ondas sonoras se curvarán hacia arriba, alejándose del suelo.

Reviste interés en la zona cercana a la fuente y en la zona cercana al receptor.

Figura 13. Refracción atmosférica



*Nota.* Fuente: Basado en Everest (2009)

La refracción reviste importancia en la propagación del sonido en campo libre, ya que es en estas condiciones cuando pueden presentarse grandes distancias que traen asociadas diferencias importantes en cuanto a la temperatura, a la dirección y velocidad del viento, situación que para recintos cerrados no tiene impacto significativo.

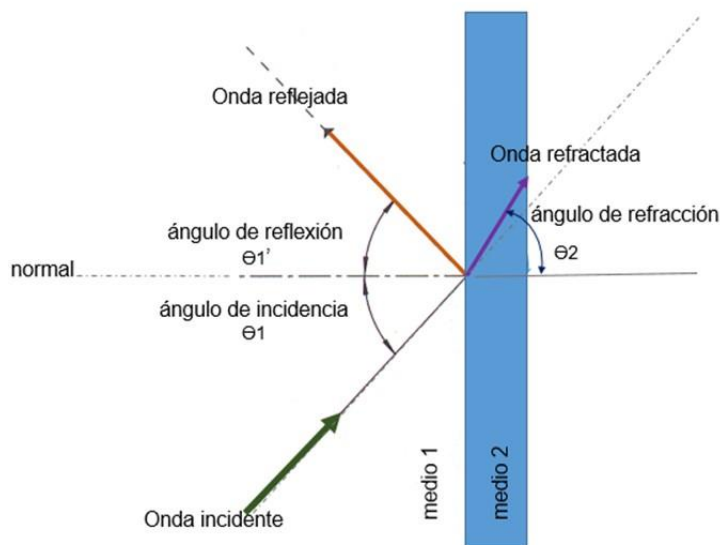
Para el caso de presencia de obstáculos, cuando las ondas chocan con dicho obstáculo, tienen contacto con otro medio, y pueden reflejarse o pueden entrar en este otro medio, el cual tiene una impedancia acústica distinta al medio de donde provienen. Esto origina un cambio en su velocidad de propagación y una alteración en su dirección.

Contrario a la reflexión, el ángulo de refracción ya no es igual al de incidencia.

Tanto la reflexión como la refracción son entendidas a través de las Leyes de Snell, que son leyes físicas que muestran cómo varían los ángulos de dirección de las ondas ante cambios del medio.

En la Figura 14 se observa la relación entre los fenómenos de reflexión y refracción explicada desde las Leyes de Snell.

Figura 14. Reflexión y Refracción del sonido en presencia de obstáculos



Según las Leyes de Snell:

$$\theta_1 = \theta_1'$$

El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión y,

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2} \quad (30)$$

Donde:

- $\theta_1$ : ángulo de incidencia en el medio 1
- $\theta_1'$ : ángulo de reflexión que se da en el medio 1
- $\theta_2$ : ángulo de refracción que se da en el medio 2
- $v_1$ : velocidad de la onda sonora en el medio 1
- $v_2$ : velocidad de la onda sonora en el medio 2

### 3.5.3 Difracción

La difracción es el fenómeno que ocurre en la propagación del sonido cuando las ondas sonoras encuentran un obstáculo como es una barrera que tiene bordes y que incluso puede tener aberturas. En este encuentro, las ondas se curvan alrededor de los bordes del obstáculo y pasan a través de la abertura con distintas características en función del tamaño de la abertura y en los dos casos en función de la longitud de onda.

La difracción junto con la reflexión y la refracción del sonido empezó siendo estudiado en el campo de la óptica en 1678 por el físico Christian Huygens. Se tenían como base los estudios de Grimaldi de 1665 pero se requería la aplicación de conceptos de ondas ondulatorias que fueron aportados posteriormente por Christian Huygens y Thomas Young (1804), recopilados y analizados por Agustín-Jean Fresnel (1818). Fresnel calculó con precisión el efecto de la difracción de la luz, lo que se conoce como el principio Huygens- Fresnel.

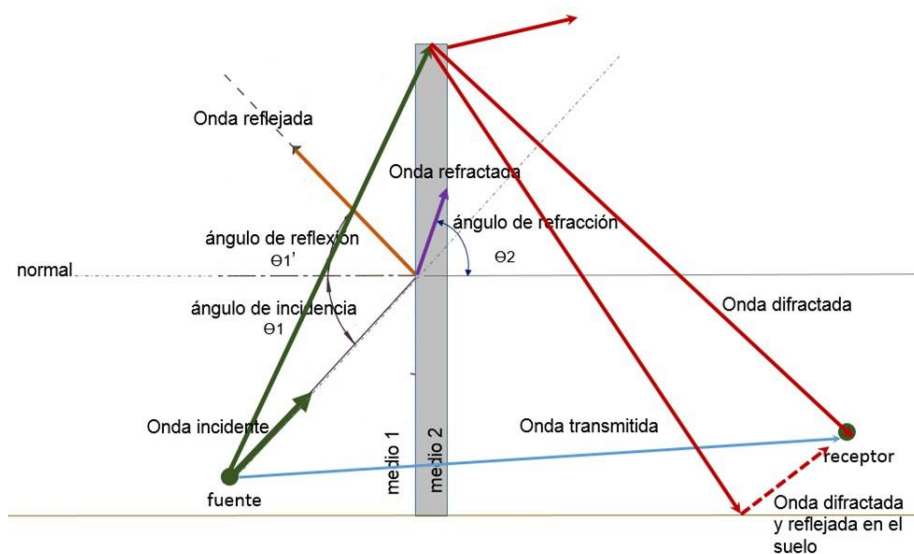
Este principio se basa en lo analizado por Huygens respecto al comportamiento de las ondas según el cual, cada punto alcanzado por un frente de onda, da origen a un nuevo frente de onda y este se propaga en todas las direcciones con una velocidad igual a la velocidad de propagación de la onda inicial. Transcurrido un tiempo se cuenta con una envolvente de todas las ondas generadas. Hasta este momento no se consideraba la longitud de onda.

Fresnel determina cómo esas ondas esféricas secundarias generadas interfieren entre sí, cómo se lleva a cabo la superposición de trenes de onda considerando en adelante las amplitudes y las fases relativas. Es por esto que, cuando se menciona la difracción de Fresnel, se hace referencia a frentes de onda curvos que están interactuando.

Los sonidos de alta frecuencia cuya longitud de onda es más corta experimentarán mayor difracción que los de baja frecuencia. Si las dimensiones de la barrera son menores o incluso iguales a la longitud de onda, la mayor parte del sonido se difractará.

En la Figura 15 se presenta un esquema ilustrativo de la difracción ante la presencia de una barrera.

Figura 15. Difracción del sonido en presencia de obstáculos



La curvatura depende de la relación entre la longitud de onda y el tamaño de los bordes y/o de la abertura en la barrera según sea el caso.

Una barrera acústica debe ser lo suficientemente alta y larga para que actúe como un verdadero obstáculo; de lo contrario, la difracción generada en los bordes laterales y por encima no permitiría lograr la atenuación esperada del sonido en el receptor.

### 3.5.4 Absorción

Es el fenómeno mediante el cual la energía acústica se disipa al entrar en contacto con un material. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, esta no se crea ni se destruye, sino que se transforma, y esto es lo que sucede cuando las ondas sonoras entran en contacto con un elemento. La energía acústica incidente que no es reflejada se transforma en energía mecánica, térmica o de deformación.

Una onda absorbida es aquella que tuvo la capacidad de penetrar en el material y convertirse en otro tipo de energía; por lo tanto, ya no regresará al medio incidente como onda reflejada.

La energía absorbida por un elemento se determina mediante la Ecuación 31

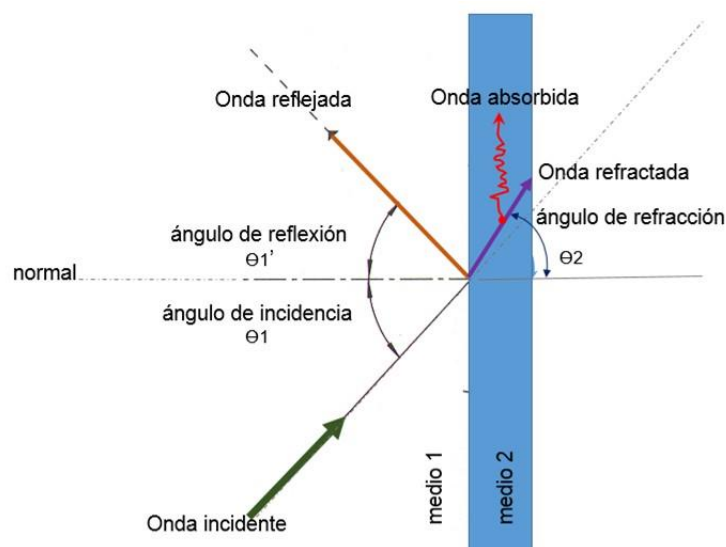
$$E_a = \alpha E_i \quad (31)$$

Donde:

- $E_a$ : Energía absorbida
- $\alpha$ : coeficiente de absorción
- $E_i$ : Energía incidente

En la Figura 16 se ilustra el comportamiento de las ondas absorbidas al entrar en contacto con una barrera.

Figura 16. Absorción del sonido en presencia de obstáculos





Todos los elementos materiales son absorbentes; lo que varía es su capacidad de absorción.

La capacidad de absorción está asociada con el tipo de material del que están hechos los obstáculos con los que se encuentran las ondas sonoras. La medida de la eficiencia de un material para absorber el sonido se representa mediante el coeficiente de absorción  $\alpha$ , el cual varía en función de la frecuencia del sonido, con valores entre 0 y 1. Si el material es totalmente absorbente, el valor de  $\alpha$  es 1 y si por el contrario no es absorbente, el valor de  $\alpha$  es 0.

La absorción se determina según la Ecuación 32:

$$A = \alpha S \quad (32)$$

Donde:

- $A$ : Absorción (Sabines o  $m^2$ )
- $\alpha$ : Coeficiente de absorción (adimensional)
- $S$ : Superficie expuesta ( $m^2$ )

En un mismo sitio pueden presentarse de manera simultánea varios elementos absorbentes y cada uno de ellos tiene su propio coeficiente de absorción. Para determinar la absorción total se deben considerar el coeficiente de absorción, el área superficial del material sobre el cual incide la onda y para el caso de existencia de personas (u otros absorbentes unitarios, es decir, que se cuantifican por cantidad y no por área), la cantidad de éstas.

Si existen varios elementos en el mismo recinto, la absorción total se calcula mediante la Ecuación 33:

$$A_T = A_s + A_o + A_a \quad (33)$$

Donde:

- $A_T$ : Absorción total (Sabines)
- $A_s$ : Absorción por superficie (Sabines)
- $A_o$ : Absorción por objetos (Sabines)
- $A_a$ : Absorción por el aire (Sabines)

$$A = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^{j=n} \alpha_j n_j + 4mV$$

Donde:

- $\alpha_i$ : Coeficiente de absorción de cada material  $i$
- $S_i$ : Superficie de contacto del material  $i$  ( $m^2$ )
- $\alpha_j$ : Coeficiente de absorción de cada tipo de elemento  $j$
- $n_j$ : número de elementos del tipo  $j$
- $m$ : Coeficiente de absorción del aire por metro lineal
- $V$ : volumen del recinto ( $m^3$ )

Para el caso de una barrera vegetal, las ondas sonoras se van a encontrar además del suelo, con elementos como los troncos, las ramas y hojas de los árboles que tienen sus propios coeficientes de absorción y por tanto cada elemento aporta de manera distinta en la reducción del nivel de presión sonora.

### 3.5.5 Transmisión

La transmisión es el fenómeno mediante el cual, las ondas que logran pasar a través de un obstáculo llegan hasta un receptor. Estas ondas tienen características distintas a las ondas incidentes ya que en el proceso de propagación han sufrido divergencia geométrica y al entrar en contacto con obstáculos, han sufrido los procesos de difracción y absorción.

La masa del material y el área del obstáculo juegan un papel determinante en el comportamiento de las ondas sonoras y en las características de la transmisión.

Un ejemplo de ello es descrito por Kurze y Anderson (1971), que mencionan que la transmisión de sonido a través de una barrera es insignificante para un espectro típico de ruido de tráfico de automóviles si la masa por unidad de área de la barrera no excede 4 lb/ft<sup>2</sup>, es decir si la masa por unidad de área es menor que 20 kg/m<sup>2</sup> aproximadamente.

Cada tipo de material tiene asociado un factor de transmisión  $\tau$  de tal manera que la energía transmitida se expresa como sigue:

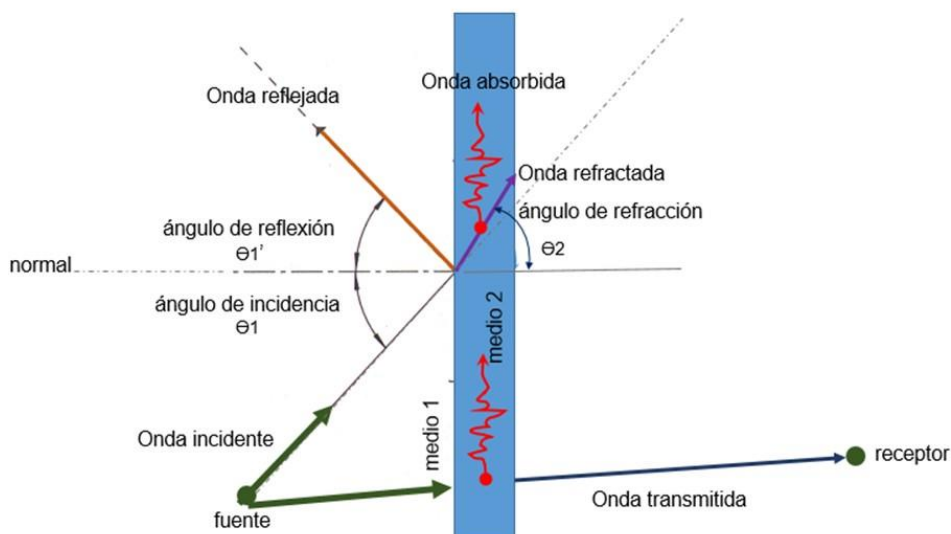
$$E_t = \tau E_i \quad (34)$$

Donde:

- $E_t$ : Energía transmitida
- $\tau$ : Coeficiente de transmisión (adimensional)
- $E_i$ : Energía incidente

En la Figura 17 se ilustra de manera esquemática el comportamiento de una onda transmitida, es decir, una vez que atravesó la barrera y llegó al receptor.

Figura 17. Transmisión del sonido en presencia de obstáculos



En la realidad es posible encontrar varios materiales en una misma barrera, lo que se conoce comúnmente como paramento compuesto.

Para determinar la potencia acústica total que pasa a través de un paramento es necesario determinar el aporte de cada uno de los materiales y sus áreas en el efecto de transmisión.

La energía acústica total es la suma de las energías acústicas transmitidas por cada elemento a una frecuencia específica. La energía acústica aportada por cada elemento se calcula multiplicando su área  $S_i$  por su coeficiente de transmisión  $\tau_i$ .

La energía acústica total transmitida a través de un paramento compuesto es, por lo tanto,  $\sum S_i \tau_i$ .

### 3.6 PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN TL

Las pérdidas de transmisión TL hacen referencia a la diferencia de los niveles de intensidad acústica antes y después de la barrera.

También se le conoce como Índice de reducción acústica (R) y su relación con el coeficiente de transmisión acústica se expresa como sigue.

$$\begin{aligned}
 TL &= 10 \log \frac{E_i}{E_t} \\
 TL = R &= 10 \log \frac{1}{\tau}
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

Donde:

*TL:* Pérdidas por transmisión (dB)

*R:* Índice de reducción acústica (dB)

*$\tau$ :* Coeficiente de transmisión acústica (adimensional)

La pérdida real de transmisión de sonido depende de la frecuencia específica y de las características del ambiente. Tanto las pérdidas de transmisión como la absorción acústica son propiedades intrínsecas de una barrera, relacionadas con los materiales que la componen.

### 3.7 PÉRDIDAS DE INSERCIÓN DE UNA BARRERA ACÚSTICA (IL)

Las pérdidas de inserción (IL) corresponden a reducción del nivel de presión sonora en el punto de interés en relación al nivel de presión sonora existente sin la presencia de la barrera.

Se trata de una característica extrínseca que va más allá del material de la barrera, ya que involucra las dimensiones, su posición respecto a la fuente y receptor y aspectos topográficos y meteorológicos del sitio.

La pérdida de inserción IL relaciona la Energía directa y la Energía difractada como se observa en la Ecuación 36.

$$IL = 10 \log \frac{E_{dir}}{E_{dif}}
 \tag{36}$$

Donde:

$IL$ : Pérdidas de inserción (dB)

$E_{dir}$ : Energía directa que llega al receptor

$E_{dif}$ : Energía difractada por la presencia de la barrera

La solución a este algoritmo ha sido estudiada a través del tiempo, por diversos autores, la mayoría de ellos basados en el fenómeno de difracción desarrollado por Keller, conocido como teoría geométrica de la difracción (GTD).

A continuación, se presentan algunos desarrollos para determinar las pérdidas de inserción con sus limitaciones de aplicación. La fecha es meramente indicativa, ya que algunos autores realizaron trabajos teóricos y luego experimentales que abarcaron períodos más largos de los que se presentan aquí.

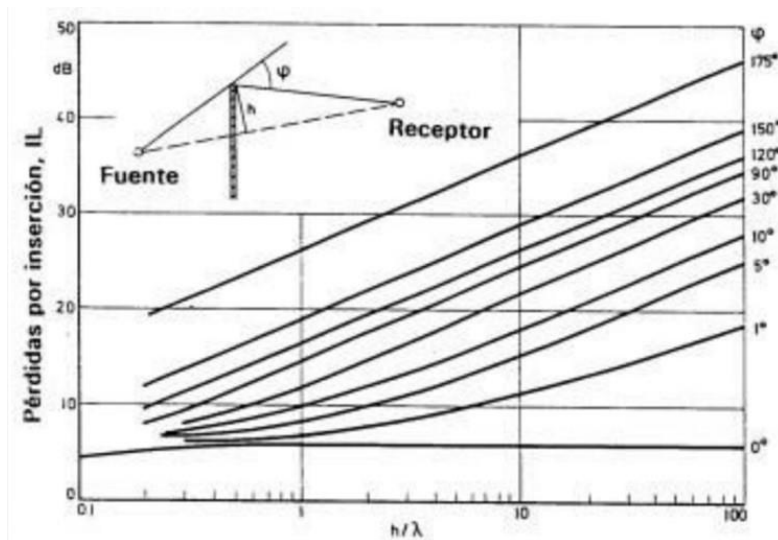
### 3.7.1 Redfearn

La propuesta de Redfearn (1940) se basa en una simplificación donde gráficamente se relacionan la atenuación del sonido en función de longitud de onda, la altura de la barrera y, al tratarse de una barrera de longitud infinita, no considera la difracción por los laterales de la misma. Es aplicable para una barrera plana de altura semiinfinita y longitud infinita en condiciones de campo libre.

En lo que respecta a las limitaciones, la formulación de Redfearn es válida si la fuente y el receptor se encuentran en un plano vertical perpendicular a la barrera y si las distancias fuente-barrera y barrera-receptor son mayores que la longitud de onda.

La teoría de Redfearn se simplifica en el conocido Ábaco de Redfearn que se presenta en la Figura 18.

Figura 18. Pérdidas de inserción  $IL$  - ábaco de Redfearn 1940



Nota. Fuente: Rosenhouse Giora (2019)

Las variables que relaciona Redfearn son las siguientes:

- $\varphi$ : ángulo de difracción
- $h$ : altura efectiva de la barrera (m)
- $\lambda$ : Longitud de onda (m)
- $h/\lambda$ : Parámetro de Redfearn

### 3.7.2 Hoover

De acuerdo con Bies (2003), si existe una zona muy densa (por ejemplo, un bosque) a lo largo del trayecto de propagación, el exceso de atenuación puede estimarse utilizando la expresión de Hoover obtenida empíricamente a partir de muchas mediciones y que se muestra en la Ecuación 37. Esta expresión es citada también en Palazzuoli y Licitra (2013), donde mencionan que la atenuación del ruido viajando en una distancia  $d$  a través de una densa forestación puede ser estimada con esta ecuación.

$$A_f = 0,01 d^3 \sqrt{f} \quad (37)$$

Donde:

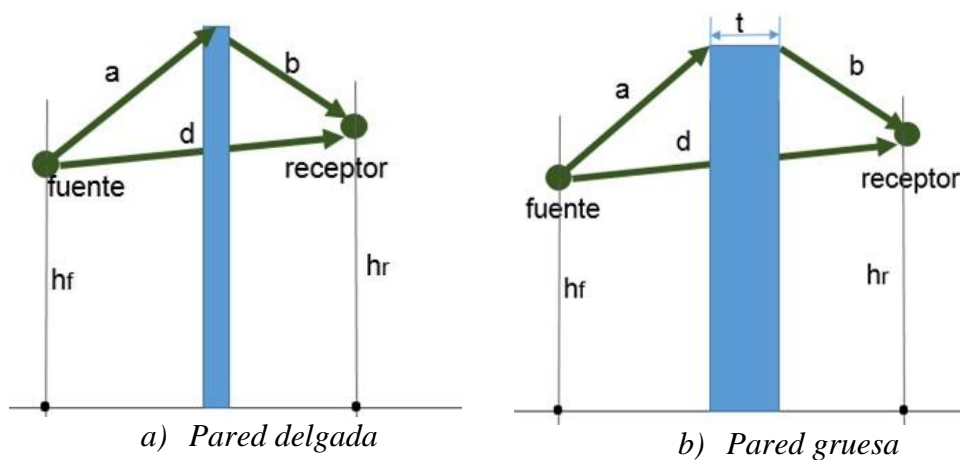
- $A_f$ : Atenuación generada por el bosque (dB)
- $d$ : Distancia que recorre el sonido a través del bosque (m)
- $f$ : frecuencia del sonido que se propaga ((Hz)

### 3.7.3 Maekawa

Maekawa (1965) presenta un método que tiene en cuenta la diferencia de caminos entre la onda difractada por el borde de la barrera y la onda directa sin presencia de la barrera, como se muestra en la Figura 19.

Caso general: Barrera plana semiinfinita en condiciones de campo libre.

Figura 19. Geometría ante la presencia de una barrera



Sommerfeld en 1896 en su trabajo ‘Teoría Matemática de la difracción’, definió la difracción como una desviación de los rayos de luz de las trayectorias rectilíneas que no puede ser

interpretada como una reflexión o una refracción. Maekawa (1965), tomando como punto de partida los estudios de Sommerfeld, llega a la siguiente formulación en función del número de Fresnel:

$$IL = 10 \log 20 N \quad (38)$$

Donde:

*IL:* pérdidas de inserción (dB)

*N:* Número de Fresnel

Para calcular la atenuación de la barrera, es necesario conocer la diferencia entre el camino directo (sin barrera) y el camino más corto difractado por efecto de la barrera. Esta diferencia en las trayectorias es la clave para determinar el número de Fresnel, el cual se define mediante la siguiente expresión.

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (39)$$

El cálculo del número de Fresnel para una barrera varía según se trate de una barrera acústica delgada o gruesa.

Para una barrera delgada, el número de Fresnel se calcula según la siguiente ecuación.

$$N = \frac{2}{\lambda}(a + b - d) \quad (40)$$

De acuerdo con González (2022), una barrera acústica se denomina gruesa si presenta más de un punto en que puede ocurrir difracción.

*Cuando la longitud de onda a controlar sea inferior al 20 % del ancho superior  $t$  ( $\lambda < t/5$ ), la barrera se considerará gruesa. Si el ancho superior supera los 3 m, la barrera se comportará como gruesa para todas las frecuencias. De lo contrario, la barrera se comportará como si fuera delgada y debe diseñarse de esa manera. En el caso de pantallas gruesas, se puede sumar el espesor  $t$  a la menor distancia  $a$  o  $b$  (Figura 19) para obtener los nuevos valores  $a'$  o  $b'$ . Todos los cálculos se pueden realizar utilizando los nuevos valores  $a'$  o  $b'$ .*

Para una barrera gruesa, el número de Fresnel  $N$  se calcula mediante la Ecuación 41.

$$N = \frac{2}{\lambda}(a + b + t - d) \quad (41)$$

Donde:

*N:* Número de Fresnel (adimensional)

*$\lambda$ :* Longitud de onda (m)

*a:* distancia entre la fuente y la parte superior de la barrera (m)

*b:* distancia entre la parte superior de la barrera y el receptor (m)

*t:* espesor de la barrera (m), que se suma a la distancia más corta entre  $a$  y  $b$

$d$ : camino directo fuente-receptor, como si no existiera la barrera (m)

Entre más alta es la barrera, mayor es el valor de  $a$  y  $b$ , mayor es el número de Fresnel y mayor es la pérdida de inserción IL.

La fórmula de Maekawa funciona mejor en las siguientes condiciones:

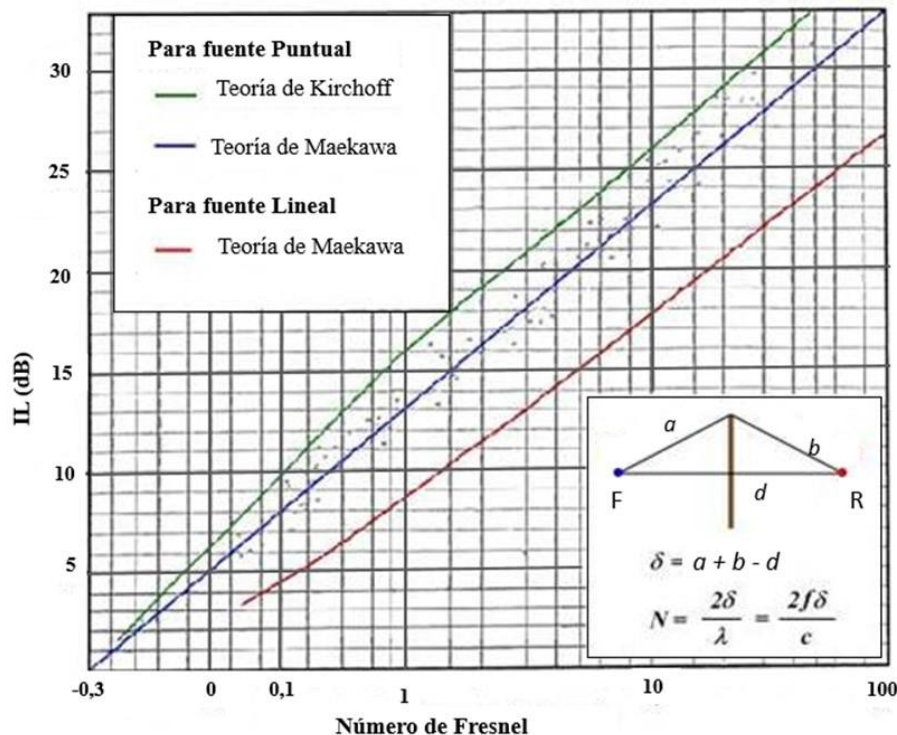
- Si la distancia  $a$  es inferior a 5 m
- Si la altura de la fuente  $h_f$  es mayor que la distancia  $a$
- Si la altura del receptor  $h_r$  es mayor que la distancia  $b$
- Para las frecuencias entre 100 y 5.000 Hz

Se debe tener en cuenta que la longitud de la barrera debe ser semi infinita, con una longitud muy superior a su altura, de tal manera que cubra el receptor que se desea proteger.

En lo que respecta a limitaciones del método, este no incluye los efectos generados por la reflexión de las ondas sobre el suelo, ni efectos de absorción del aire.

La resolución de la ecuación se representa gráficamente en el conocido ábaco de Maekawa, el cual se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Pérdidas de inserción IL-ábaco de Maekawa 1965



Nota. Fuente: Adaptado de:

[https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_02\\_03/Acustica\\_arquitectonica/practica/AISLAEXT.HTM](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_02_03/Acustica_arquitectonica/practica/AISLAEXT.HTM)

La teoría de Kirchoff que se presenta de manera comparativa en el ábaco de la Figura 20 hace referencia a los resultados matemáticos de la teoría de aproximación de Gustav Kirchoff, quien en 1882 expresó en forma matemática las ideas de Huygens y Fresnel.

Los resultados de Maekawa resultan ser más bajos que los de la teoría de Kirchhoff, como se muestra en la Figura 20.

Para los casos en que la barrera se encuentre a una distancia superior a 5 m respecto del receptor se deben considerar aspectos del suelo y meteorológicos, para lo cual Maekawa propuso otro método que considera las reflexiones que ocurren en el suelo, y que se sintetiza en la siguiente expresión.

$$IL = 10 \log (3 + 10NK) - A_{suelo} \quad (42)$$

Donde:

*N*: Número de Fresnel (adimensional)

*K*: factor de corrección por aspectos meteorológicos (adimensional)

*A<sub>suelo</sub>* atenuación por efecto del suelo (dB)

El factor K se calcula como se muestra en la Tabla 7. Para el caso de la distancia fuente-receptor entre 100 y 300 m, las distancias, a, b y d son las presentadas en la Figura 19.

Tabla 7- factor de corrección K para cálculo de IL

<i>Distancia fuente receptor (m)</i>	<i>K</i>
<100	1
>300	1
100-300	$K = e^{-0,0005 \sqrt{\frac{abd}{N\lambda}}}$

Nota. Fuente: Basado en González (2022)

En cuanto a la atenuación por efecto del suelo, en el ítem 3.4.6 se presentan las metodologías de cálculo de acuerdo con la norma ISO 9613-2.

### 3.7.4 Kurze y Anderson

Kurze y Anderson, (1971) proponen una ecuación que es una aproximación digital del ábaco de Maekawa, y emplea una sola variable: el número de Fresnel. Sus resultados concuerdan en gran medida con los resultados experimentales obtenidos por Maekawa y se basa en barreras semiinfinitas

El algoritmo de Kurze-Anderson facilitó el cálculo al emplear las características geométricas del sitio de interés: fuente-barrera-receptor, pero no contempla las reflexiones sobre el suelo.

Si  $N > 12,5$ , entonces  $IL = 24$  dB y si  $-0,2 < N < 12,5$ , entonces las pérdidas de inserción se calculan según la Ecuación 43.



$$IL_{KA} = 5 + 20 \log \left( \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right) \quad (43)$$

$$\tanh X = \frac{\sinh X}{\cosh X} = \frac{e^X - e^{-X}}{e^X + e^{-X}}$$

Ecuación 43-Pérdidas de inserción - Algoritmo de Kurze-Anderson

Donde:

$IL_{KA}$ : Pérdidas de inserción según Kurze y Anderson (dB)

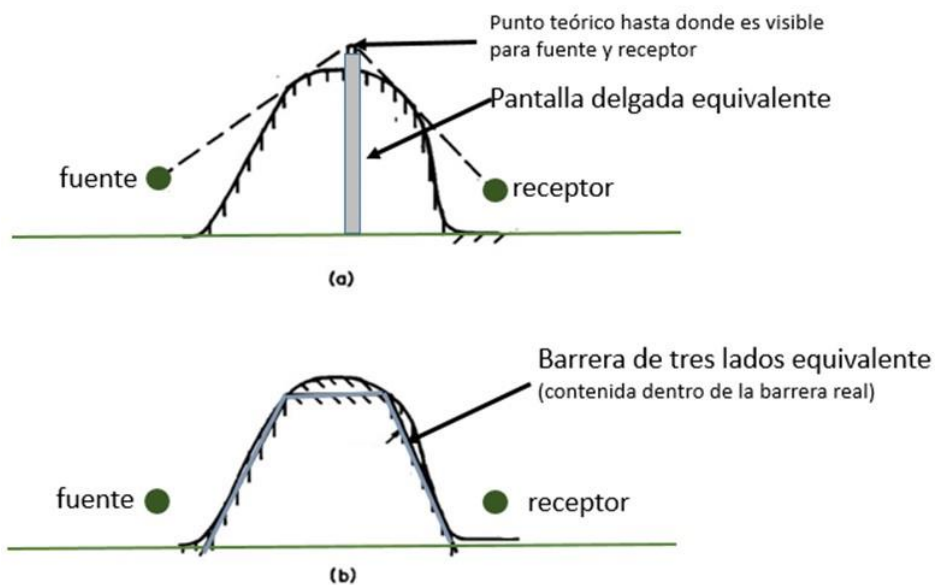
$N$ : Número de Fresnel (adimensional).

### 3.7.5 Pierce

Pierce (1974) evaluó la doble difracción que se genera en la corona de una barrera gruesa con base en los conceptos de la teoría geométrica de la difracción de Keller. Siguiendo el enfoque de Maekawa profundiza en las barreras gruesas basándose en la diferencia de caminos de la fuente al receptor con y sin barrera.

Para el caso de las barreras gruesas, Maekawa planteó la posibilidad de reemplazar la barrera gruesa por una barrera delgada equivalente y tratarla con la aproximación de Kirchhoff, pero de acuerdo con Pierce, esta aproximación podría conducir a errores. Por lo anterior, Pierce plantea un análisis basado en el reemplazo de una barrera gruesa real por una barrera de tres lados como se muestra en la Figura 21.

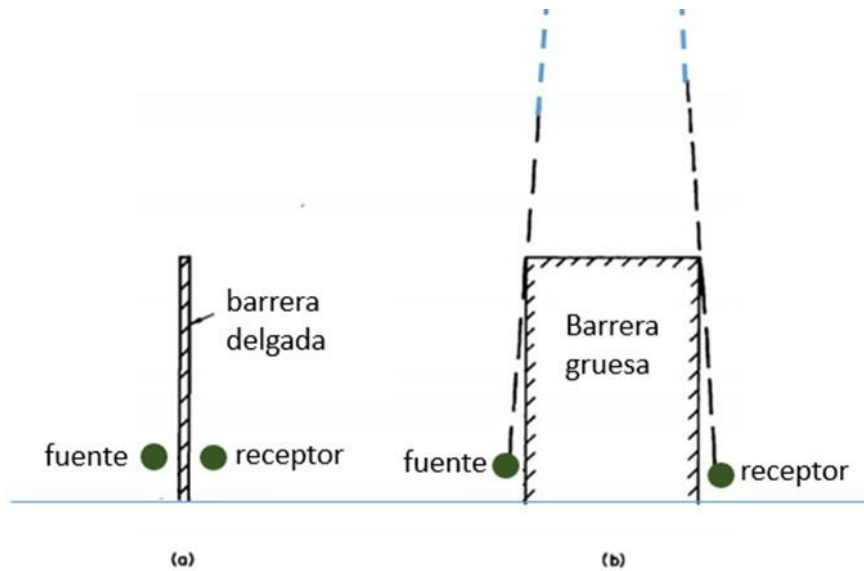
Figura 21. Aproximaciones - estudio de una barrera gruesa de forma arbitraria



Nota. Fuente: Adaptado de Pierce (1974)

Pierce plantea que en el caso en que la fuente y el receptor están muy próximos a la barrera, considerar una barrera delgada equivalente, según la aproximación simple de Maekawa puede generar errores. Las distancias que se consideran para el camino teórico recorrido de la fuente al receptor se asumirían más grandes que los valores reales, como se muestra en la Figura 22.

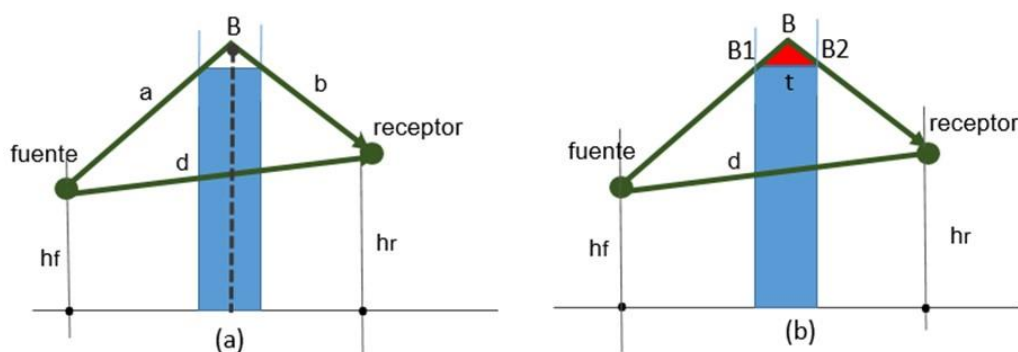
Figura 22. Caso de sobreestimación de la difracción



Nota. Fuente. Adaptado de Pierce (1974).

La diferencia con lo expuesto por Maekawa está en el triángulo que se forma en la corona de la barrera gruesa como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Triángulo Maekawa-Pierce-cálculo de pérdidas de inserción IL



- (a) Aproximación de Maekawa (barrera delgada equivalente)
- (b) Triángulo de Maekawa-Pierce (barrera gruesa)

La diferencia de camino por la presencia de la barrera gruesa para los dos casos sería según la aproximación de Maekawa: (Fuente a B) + (B a receptor) – (camino directo fuente-receptor). En resumen,  $a + b - d$

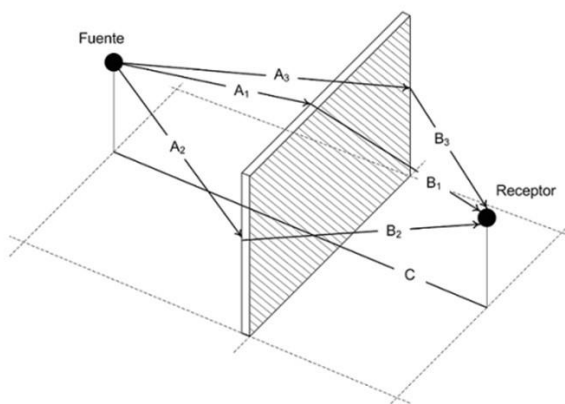
Mientras que siguiendo el triángulo de Pierce: (Fuente a B1) + (B1 a B2) + (B2 a Receptor) – (camino directo fuente-receptor  $d$ )

Las aproximaciones hasta aquí presentadas (Redfearn, Maekawa, Kurze-Anderson y Pierce) no consideran el efecto de las reflexiones que se generan sobre el suelo donde se ubica la barrera.

### 3.7.6 Norma ISO 9613-2

La Norma ISO 9613-2 (1996) menciona que la pérdida de inserción de una barrera es la atenuación ( $A_{bar}$ ) generada por la presencia de esta en el sitio. El método presentado incluye el efecto de la difracción por encima y por los laterales de la barrera como se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Difracción por presencia de barrera



*Nota.* Difracción de una barrera finita. Fuente: Estevens J (2008)

Para la propagación del sonido a favor del viento, el efecto de la difracción (en decibeles) se calcula mediante las siguientes expresiones

$$A_{bar} = D_z - A_{suelo} > 0 \quad (44)$$

$$A_{bar} = D_z > 0 \quad (45)$$

Donde:

$D_z$ : Atenuación de la barrera para cada banda de octava

$A_{suelo}$ : Atenuación del suelo en ausencia de la barrera

Para calcular la atenuación de la barrera  $D_z$ , se parte de que existe una ruta de propagación del sonido significativa desde la fuente de sonido hasta el receptor. Si esta suposición no es válida, se requieren cálculos separados para otras rutas de propagación y se suman las contribuciones de las diversas rutas a la presión sonora al cuadrado (es decir, a la energía sonora) en el receptor.

$$D_z = 10 \log \left[ 3 + \left( \frac{C_2}{\lambda} \right) C_{3z} K_{met} \right] \quad (46)$$

Donde:

$C_2$ : Es igual a 20 e incluye el efecto de las reflexiones del suelo. En caso de que las reflexiones del suelo se tengan en cuenta por separado por las fuentes imagen,  $C_2 = 40$

$C_3$ : Este coeficiente varía según la cantidad de difracciones presentes. Para una difracción simple es igual a 1 y para difracción doble se calcula según se muestra en la Tabla 8

$\lambda$ : Longitud de onda para cada frecuencia en bandas de octava (m)

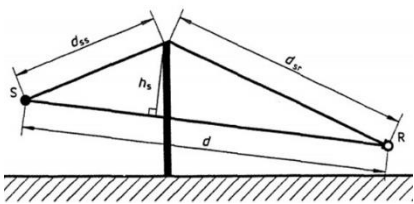
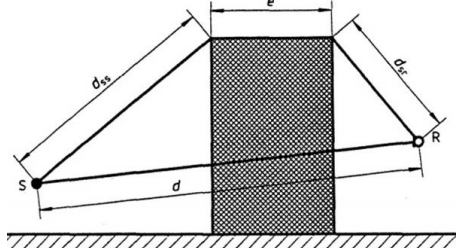
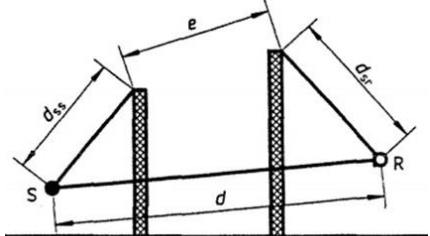
$Z$ : Es la diferencia entre las longitudes de trayectoria del sonido difractado y directo, calculada según se muestra en la Tabla 8

$K_{met}$ : factor de corrección por factores meteorológicos. Si  $z \leq 0$ , el valor de  $K_{met}=1$ . Si  $z > 0$ , el valor de  $K_{met}$  se calcula según la siguiente ecuación:

$$K_{met} = \exp \left[ - \left( \frac{1}{2.000} \right) \sqrt{d_{ss} d_{sr} \frac{d}{2z}} \right] \quad (47)$$

*Nota:* Para distancias de fuente a receptor inferiores a 100 m, el cálculo mediante la Ecuación 46 muestra que se puede suponer que  $K_{met}$  es igual a 1, con una precisión de 1 dB.

Tabla 8- Elementos para cálculo de la atenuación de la barrera

Parámetro	Difracción sencilla	Difracción doble o múltiple
Esquema ilustrativo	 <p>Barrera delgada <math>e = 0</math></p>	 <p>Barrera gruesa</p>
		 <p>Doble barrera</p>

Parámetro	Difracción sencilla	Difracción doble o múltiple
$C_3$	1	$C_3 = \frac{\left[1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2\right]}{\left[\left(\frac{1}{3}\right) + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2\right]} \quad (48)$ <p>La ecuación proporciona una transición continua del caso de difracción simple (<math>e = 0</math>) donde <math>C_3 = 1</math>, al de una difracción doble con dos bordes de difracción bien separados (<math>e \gg \lambda</math>), donde <math>C_3 = 3</math>.</p>
$z$	$z = \sqrt{(d_{ss} + d_{sr})^2 + a^2} - d \quad (49)$	$z = \sqrt{(d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2} - d \quad (50)$
Notas	<p>La atenuación de la barrera <math>D_z</math>, en cualquier banda de octava, no debe considerarse superior a 20 dB</p>	<p><u>Barrera gruesa:</u></p> <p>La atenuación de la barrera <math>D_z</math>, en cualquier banda de octava, no debe considerarse superior a 25 dB en el caso de difracción doble.</p> <p><u>Doble o múltiples barreras:</u></p> <p>La atenuación para dos barreras se calcula usando la Ecuación 46, utilizando los valores de <math>C_3</math> y <math>z</math> como se indican en esta tabla.</p> <p>La atenuación de barrera para más de dos barreras también se puede calcular aproximadamente usando la Ecuación 46 eligiendo las dos barreras más efectivas, dejando de lado los efectos de las otras.</p>

Nota. Fuente. Basado en ISO 9613-2

Para el caso de áreas industriales, la norma indica que en el cálculo de la pérdida de inserción para plantas industriales de fuentes múltiples por edificios altos (más de 10 m sobre el suelo), y también para fuentes de ruido muy elevado dentro de la planta industrial, se debe usar la Ecuación 45 en ambos casos para determinar el promedio a largo plazo del nivel de presión sonora y usando la Ecuación 51.

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met} \quad (51)$$

Donde:

$L_{AT} (LT)$ : promedio ponderado A a largo plazo, donde el intervalo de tiempo  $T$  es de varios meses o un año. En estos periodos de tiempo se pueden presentar varias condiciones meteorológicas, tanto favorables como desfavorables para la propagación. (dB)

$L_{AT} (DW)$ : nivel de presión sonora ponderado A promedio (dB)

$C_{met}$ : Corrección por efectos meteorológicos a largo plazo (dB). Se calcula de acuerdo con la Tabla 9.

Tabla 9- Cálculo de  $C_{met}$  (dB)

Condición	$C_{met}$ (dB)
$d_p \leq 10(h_s + h_r)$	0
$d_p > 10(h_s + h_r)$	$C_{met} = C_0 \left[ 1 - \frac{10(h_s + h_r)}{d_p} \right] \quad (52)$

Donde:

$h_s$ : altura de la fuente (m)

$h_r$ : altura del receptor (m)

$d_p$ : es la distancia entre la fuente y el receptor proyectada al plano horizontal del suelo (m)

$C_0$ : es un factor, que depende de las estadísticas meteorológicas locales para la velocidad y dirección del viento y los gradientes de temperatura (dB)

Respecto a  $C_0$ , la Norma menciona:

- El valor de  $C_0$  puede estimarse a partir de un análisis básico de las estadísticas meteorológicas locales. Por ejemplo, si se determina que las condiciones meteorológicas favorables a la propagación se producen durante el 50 % del período de tiempo de interés y la atenuación durante el otro 50 % es superior en 10 dB o más, entonces la energía sonora que llega por condiciones meteorológicas desfavorables para la propagación puede ser despreciada, y  $C_0$  será de aproximadamente +3 dB.
- Las condiciones meteorológicas para evaluar  $C_0$  pueden ser establecidas por las autoridades locales.
- La experiencia indica que los valores de  $C_0$  en la práctica están limitados al rango de 0 (cero) a aproximadamente +5 dB y los valores superiores a 2 dB son excepcionales. Por lo tanto, solo se necesitan estadísticas muy elementales de la meteorología local para una precisión de  $\pm 1$  dB en  $C_0$ .

## 4 LA VEGETACIÓN Y EL RUIDO

Uno de los obstáculos que se puede encontrar en la propagación del sonido en exteriores es la vegetación, la cual puede estar inserta en el paisaje de manera natural o puede haber sido instalada con un objetivo específico como por ejemplo aspectos paisajísticos o para mitigar los niveles de ruido en un receptor.

El efecto en la mitigación del ruido ha sido estudiado a través del tiempo, tratando de analizar el efecto de un conjunto de árboles o arbustos dispuestos de una manera determinada entre una fuente y un receptor, así como el aporte de cada uno de los componentes que están asociados a la vegetación: tipo de suelo, la altura de los árboles y características más específicas como el tamaño del tronco, tipo y tamaño de las hojas.

En este capítulo se presenta un resumen de algunos estudios realizados sobre esta temática y a continuación la fundamentación teórica de la incidencia de cada uno de los elementos de la vegetación que están relacionados con la atenuación del sonido en exteriores.

### 4.1 ESTUDIOS PREVIOS

Estudios e investigaciones sobre el efecto de la vegetación en la mitigación del ruido se han realizado a través del tiempo. Gran parte de estos estudios se basan en determinar la atenuación del ruido generado por el tráfico en carreteras, mediante el efecto de una masa arbórea (árboles y arbustos en conjunto) que actúa como barrera.

La acústica de los bosques comenzó a ser estudiada en 1946 por Eyring (1946), quien encontró una atenuación de 0,05-0,13 dB/m (decibeles por metro), aumentando con la frecuencia. Algunos años más tarde, Embleton (1963) y Aylor (1972a y b) continuaron con el trabajo de Eyring. Embleton (1963) obtuvo un decaimiento importante, de 7 dB/100 pies para frecuencias por debajo de 2.000 Hz. Trató de explicar resultados tan altos pensando en ramas como absorbentes de resonancia, pero su teoría no era fácil de probar. Trabajos recientes, como el de Johansson (2010), muestran que el bosque es un sistema complejo que puede reducir (absorber) o amplificar los niveles de presión sonora, dependiendo de los fenómenos que se activen en cada caso.

Cook y Van Haverbeke (1971) realizaron experimentación con la vegetación como medida de mitigación del ruido de tráfico y mencionaban entre otros que, cuando se utilizan árboles y arbustos como medio de reducción de ruido entre la fuente y el receptor, los componentes estructurales que pueden afectar la transmisión del sonido son la altura, el ancho y la densidad general de la barrera en función de la especie, los patrones de plantación, el espaciamiento de los árboles en y entre las hileras y por distribución del follaje. Sin embargo, el análisis estadístico obtenido por ellos en esta experimentación particular reveló solo ligeras diferencias en la capacidad de las diferentes especies de árboles en la reducción de los niveles de ruido para los tipos de ruido del tráfico estudiados.

Cook y Van Haverbeke (1972) mencionaban que una combinación de árboles y arbustos generaría de una parte, variedad en alturas y de otra, mayor densidad del área; esto, sumado a una diferencia en niveles topográficos se convierte en una alternativa que puede ser tomada en cuenta en la atenuación del ruido.

Aylor (1972) demostró que las plantas tienen un buen comportamiento para el control del ruido. Trabajó con atenuación de ruido rosa a través de un denso pantano de juncos (*Phragmites communis*). La altura promedio de las cañas fue de 2,5 m, el área de hojas por unidad de volumen de copa fue de  $3,0 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y la densidad de plantas fue de  $59 \pm 10$  plantas/ $\text{m}^2$ . El ancho promedio de las hojas fue de 3,2 cm. Aylor encontró una atenuación creciente entre 500 Hz y 10.000 Hz, con una tasa creciente cercana a 4 - 4,5 dB/octava. Encontró una atenuación cercana a los 18 dB a 10.000 Hz para 12,2 m de ancho de cañas. Al comparar la atenuación con plantas de maíz (*Zea mays*), encontró que el mejor desempeño fue a una frecuencia de 2.000 Hz; el ancho de las hojas de las plantas de maíz fue de 7,4 cm en promedio. En otro estudio, Aylor (1972) midió la atenuación del sonido relacionada con troncos y tallos. Usó maíz de campo (*Zea mays*), tsuga (*Tsuga canadensis*), pino rojo (*Pinus resinosa*) y un cepillo de madera dura de unos 6 m de altura. Descubrió que cuanto más densa es la plantación y mayor es la superficie de las hojas, mejor es la atenuación. Además, los troncos tienen un efecto importante en la dispersión del sonido, si la longitud de onda es pequeña en comparación con el radio del tronco.

Price et al. (1988) midieron y estudiaron la atenuación acústica de diferentes bosques: picea de Noruega (*Picea abies*) y robles, con un sotobosque denso; un monocultivo de picea de Noruega de 11 m – 13 m de altura; una plantación de coníferas que incluye cedro rojo (*Thuja plicata*), abeto de Noruega y pino de Córcega (*Pinus nigra*). Se realizaron mediciones en verano e invierno. Se encontró un patrón general de atenuación, con un primer pico de absorción alrededor de los 250 Hz; una región de bajo rendimiento de absorción y posible amplificación resonante, alrededor de 1.000 Hz - 2.000 Hz; y una segunda región atenuante, de 2.000 Hz a 10.000 Hz aproximadamente. Los autores buscaron construir un modelo predictivo, sumando las contribuciones a la atenuación del sonido del suelo, los troncos y el follaje, calculando cada uno por separado. Por otro lado, Lee et al. (2008) examinaron 15 sitios con árboles de coníferas, a lo largo de algunas carreteras en Virginia, EE. UU. Llegaron a la conclusión de que solo se podía atribuir a los árboles una atenuación del sonido muy pobre. No encontraron diferencias según la edad de los árboles, la altura, la especie o la densidad de árboles en los sitios.

Huddart (1990) mencionaba que las barreras acústicas como muros, vallas o montículos de tierra se utilizan a menudo para reducir la contaminación acústica del tráfico, pero que una alternativa, que probablemente sea más agradable desde el punto de vista ambiental y estético, es un cinturón de vegetación. A través de un trabajo de campo midió la atenuación del ruido del tráfico a través de cinco tipos de vegetación hasta una profundidad de 30 m. Pudo verificar que el follaje es importante para reducir las altas frecuencias (por encima de 2.000 Hz), mientras que las bajas frecuencias (250 a 500 Hz) son atenuadas por las cualidades absorbentes del suelo, cualidades que pueden ser mejoradas por las raíces de las plantas y por la hojarasca.

Huisman y Attenborough (1991) demostraron que la respuesta acústica de un bosque depende directamente del tipo de interferencia de las ondas: para interferencias constructivas (ondas coherentes), se espera la reverberación del sonido; de lo contrario, podría producirse una atenuación del sonido. Los autores afirmaron que la dispersión del sonido por la turbulencia atmosférica es un fenómeno bien conocido, relacionado con la pérdida de coherencia de las ondas, para longitudes de onda menores al diámetro del tronco.

Alessandro, Barbera y Silvestrini (1987) y Stryjenski (1970), citados por Ochoa de la Torre (1999), comprobaron que la absorción acústica de algunas especies vegetales varía con el tamaño de las hojas y la densidad del follaje. Por lo tanto, la disminución de los niveles de ruido solo debe esperarse para frecuencias superiores a 2.000 Hz, con valores de atenuación de 1 dB cada 10 m de profundidad, hasta un máximo de 10 dB a 100 m o más. Además, Ochoa de



la Torre (1999) cita a Cook y Van Haerbeke (1971) y Alessandro et al. (1987) que, entre otras conclusiones, afirmaba que: “una pantalla colocada cerca de la fuente es más eficiente que otra junto al área a proteger”; y que “las especies a utilizar deben ser siempre verdes, evitando las coníferas, que son las menos eficientes”.

En la misma dirección, Tarrero (2002) cita a Martens y Huisman (1986) quienes demostraron que los árboles caducifolios atenúan más que el pasto sin árboles, pero menos que los perennifolios.

Tunick (2022) vinculó la meteorología y la propagación del sonido en un bosque. Encontró un microclima, donde la temperatura y la velocidad del viento son bastante uniformes. Los principales fenómenos de atenuación en el bosque son: la interferencia entre ondas sonoras, tanto directas como reflejadas en el suelo; dispersión y absorción por suelo, troncos, ramas y turbulencia atmosférica. En el rango de frecuencias medias (250 Hz a 500 Hz), la impedancia de la tierra es uno de los factores más influyentes. Para frecuencias de 1.000 Hz a 2.000 Hz, los troncos, ramas y copas son los principales agentes, actuando tanto por dispersión como por absorción sonora. Para estas altas frecuencias, estos fenómenos parecen tener más incidencia en la atenuación del sonido que los efectos de refracción relacionados con el microclima en el bosque.

Onuu (2006) encontró que la hierba puede introducir una atenuación en todas las frecuencias, el doble de la atenuación de un bosque. El mejor rendimiento se midió entre 1.000 Hz y 4.000 Hz. También afirmó que la mejor relación para representar la atenuación de la hierba es logarítmica, si para los árboles es una ecuación de potencia.

Swearingen y White (2007) propusieron un ajuste del método de cálculo de Defrance, para incluir otros fenómenos atmosféricos, especialmente los relacionados con la dispersión. Al igual que el modelo anterior, utilizaron la ecuación parabólica de la función de Green (GFPE) para modelar diferentes fenómenos que también midieron. Los autores agregaron esos fenómenos uno por uno a su simulación y encontraron que las condiciones atmosféricas tenían una fuerte influencia en la propagación del sonido. La dispersión de los troncos y el dosel se hizo más importante a mayor distancia de la fuente, pero no tuvo una influencia significativa en los niveles de presión sonora, en comparación con la incidencia atmosférica.

En su exhaustivo análisis de las barreras acústicas, Kotzen e English (2009) afirman que el mejor rendimiento de una barrera verde se produce a una frecuencia cuya longitud de onda es el doble del tamaño de las hojas de los árboles o arbustos. Concuerda con los hallazgos de Aylor (1972), casi 30 años antes.

Según Asdrubali et al. (2014), la parte más importante de la atenuación en un bosque la proporciona la superficie del suelo. Afirmaron: “*el principal absorbente es el sustrato suelo (...). La presencia de las plantas se vuelve útil solo cuando se instala una gran cantidad de ellas en la muestra, de lo contrario, es incluso perjudicial dentro de algunos rangos de frecuencias*”.

Por otro lado, contemporáneamente, Azkorra et al. (2015) obtuvo un coeficiente de absorción acústica ponderado de 0,40, con el mejor comportamiento de absorción en las frecuencias de 125 y 4.000 Hz, y el peor en las de 500 y 1.000 Hz.

Li et al. (2020) demostraron que la mayor parte de la absorción del sonido por parte de los árboles se debe a las propiedades de su corteza. Cuanto más rugosa sea la superficie de la corteza, se esperaría un mejor rendimiento de absorción del sonido. Cuando la corteza tenía

musgo, el rendimiento acústico mejoraba significativamente. En cualquier caso, los coeficientes de absorción para incidencia normal en el rango de 160 Hz a 1.600 Hz son realmente bajos: los valores más altos medidos fueron alrededor de 0,1, teniendo los árboles de hoja ancha peores resultados que las coníferas.

Otros estudios buscan determinar el efecto de la vegetación en la mitigación del ruido con énfasis en el tipo de ruido. Entre este tipo de estudios se tiene el realizado por Donald. G. Albert (2004), cuyo objetivo era determinar si los bosques tienen algún efecto en la reducción del ruido de explosión del entrenamiento de artillería u otras explosiones. Concluyó que, hasta esa fecha, desafortunadamente, había muy poco trabajo relevante que contribuyera a responder esta pregunta. Para las fuentes de ruido militar, las principales frecuencias de interés están por debajo de 100 Hz. La mayoría de las investigaciones anteriores se habían realizado a altas frecuencias utilizando fuentes de ruido de onda continua de baja amplitud, en lugar de fuentes impulsivas de gran amplitud.

Existen más investigaciones, algunas de las cuales se irán citando en el documento porque están referidas a temas específicos como por ejemplo a elementos de la vegetación y su influencia en la atenuación del ruido.

## **4.2 ELEMENTOS DE LA VEGETACIÓN**

Para que un obstáculo pueda considerarse como una barrera acústica según la Norma ISO 9613-2 debe cumplir con ciertas condiciones relacionadas con su masa superficial, no tener perforaciones o ranuras por las que pueda propagarse el sonido y tener una dimensión longitudinal mayor a la longitud de onda de la frecuencia a atenuar. Lo anterior lleva a pensar que una cortina de árboles difícilmente podría lograr la atenuación del sonido porque se trata de un conjunto de elementos insertos en un sitio con espacios entre cada árbol que permiten que el sonido se propague entre dichos espacios libremente sin encontrar mayor resistencia. Sin embargo, existen algunos elementos de la vegetación que van a incidir en los fenómenos de propagación como las reflexiones y difusión del sonido con los elementos de los árboles: troncos, hojas, y sobre todo su interacción con el suelo a través de las raíces y presencia de hojarasca. La influencia del suelo fue tratada en el ítem 3.4.6, pero en el presente capítulo se enfatizará en el suelo como soporte de la vegetación.

Otro aspecto importante está relacionado con la cantidad de árboles o arbustos por unidad de área y la ubicación dentro de esta, porque de ello depende la densidad de la masa arbórea y su funcionamiento como un cristal sónico, factores que serán determinantes en su rol como una barrera atenuadora de ruido.

### **4.2.1 Raíces**

La influencia que tienen las raíces de las plantas en la atenuación del sonido está determinada por su vínculo con el suelo sobre el cual se desarrollan.

Dickinson (1970), realizó una investigación para proporcionar algunos datos sobre las propiedades de absorción de sonido de las superficies del suelo y para desarrollar un método para la medición de campo de la impedancia acústica de la superficie del suelo. Entre otros aspectos mencionaba que cuando las raíces vegetales están presentes en el suelo, la absorción del sonido parece ser mayor que si no estuvieran.

Huddart L (1990) hacía referencia a que en bajas frecuencias (250 a 500 Hz) la atenuación se debe principalmente a las propiedades absorbentes del suelo, las cuales son mejoradas por las raíces de las plantas y por la hojarasca.

El suelo tiene una estructura interna caracterizado por tres propiedades físicas que son la porosidad, la resistividad al flujo y la tortuosidad, y la presencia de raíces en el suelo modifica estas condiciones, haciéndolo más o menos absorbente y, por lo tanto, influenciando la atenuación del sonido.

#### 4.2.1.1 Porosidad

La porosidad es una propiedad física del suelo<sup>6</sup> que hace referencia al porcentaje del volumen del suelo que no es ocupado por sólidos. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos y microporos, donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macroporos no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los microporos retienen agua, parte de la cual está disponible para las plantas. (<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>)

La porosidad es la relación entre la densidad aparente y la densidad real del suelo, según la siguiente expresión.

$$P = \left( 1 - \left( \frac{D_a}{D_r} \right) \right) \times 100 \quad (53)$$

Donde:

*P*: Porosidad del suelo o espacio poroso (%)

*D<sub>a</sub>*: densidad aparente del suelo (g/cm<sup>3</sup>).

*Se determina en Laboratorio como el peso volumétrico del suelo: volumen de sólidos + poros*

*D<sub>r</sub>*: densidad real que es el peso de las partículas sólidas de un suelo (g/cm<sup>3</sup>)

En la aparición de las raíces y su crecimiento se generan poros en el suelo, a través de los cuales, las raíces toman el aire y el agua, según sean macro o microporos respectivamente.

Algunos valores de porosidad para tipos de suelos más comunes se presentan a continuación.

---

<sup>6</sup> La porosidad es una de las propiedades físicas del suelo, junto con la textura, estructura, color, consistencia, temperatura y densidad. La porosidad es una consecuencia parcial de la estructura y la textura.

Tabla 10- Porosidad del suelo

Tipo de suelo	Porosidad rango de valores típicos (%)	Porosidad mínima para adecuado crecimiento de las plantas (%)
Suelos arenosos (poros más grandes)	35-50	35
Suelos arcillosos (poros más pequeños)	40-60	45

*Nota.* Fuente: Basado en <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/INTERPRETACION%20DE%20RESULTADOS%20DE%20TEXTURA%20Y%20HUMEDAD%20DEL%20SUELO.pdf>

Gerges, citado por Torres (2010) menciona que la energía acústica incidente entra por los poros y se disipa por el efecto de múltiples reflexiones y fricción viscosa, transformándose en energía térmica.

La porosidad del suelo desde el punto de vista acústico juega un papel importante, porque facilita la absorción del sonido a través de los intersticios del suelo, volviéndolo acústicamente suave o blando y por lo tanto, atenuando el sonido. Una mayor cantidad de raíces es indicio de una mayor porosidad.

En concordancia con la Norma ISO 9613-2, Attenborough (2016), reafirma que cualquier superficie de terreno de baja porosidad es “acústicamente dura”, es decir, que refleja perfectamente el sonido, y cualquier suelo cubierto de hierba, árboles o vegetación es "acústicamente blando", es decir, perfectamente absorbente del sonido. Aunque esta podría ser una representación adecuada en algunas circunstancias, simplifica en exceso el rango considerable de propiedades y efectos resultantes.

De otra parte, se debe tener en cuenta que las superficies de tierra porosas son tanto elásticas como porosas y su respuesta elástica puede ser significativa a bajas frecuencias, muy características del ruido de una explosión. Para predicciones de ruido más típicas, como el ruido del transporte o de fuentes puntuales, la elección de modelos de impedancia puede limitarse a aquellos que representan las propiedades acústicas de materiales porosos (Attenborough, 1985).

#### 4.2.1.2 Resistividad

Es la resistencia específica que opone el material, en este caso el suelo a que sea traspasado por un flujo de aire, siendo una característica de cada tipo de suelo e independiente de la configuración geométrica de fuentes y receptores de ruido existentes en un sitio.

Si un suelo tiene alta resistividad al flujo, significa que es difícil que el aire fluya a través de su superficie. La resistividad al flujo es proporcional al espesor e inversamente proporcional a la permeabilidad. Una baja permeabilidad resulta de baja porosidad en la superficie.

La presencia de raíces en el suelo, hace que este se vuelva más poroso, por lo tanto, más blando o más suave, y que los valores de resistividad sean más bajos.

En la Tabla 11 se muestran rangos de valores de resistividad para algunos tipos de suelos.

Tabla 11 -Resistividad para tipos de suelos

Tipo de suelo	Resistividad $\sigma$ ( $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}^4$ )
Nieve recién caída, espesor 10 cm	10-30
Hojasca	20-80
Hierba	150-300
Cuneta sucia, pequeñas rocas de hasta 10 cm	300-800
Sedimentos arenosos compactados	800-2.500
Lascas de calizas de 1 a 2,5 cm de espesor	1.500-4.000
Tierra compactada	4.000-8.000
Grava fina compactada	5.000-20.000
Asfalto	30.000

*Nota.* Fuente. Romero Ibáñez, A. (2010)

Las unidades de medida de la resistividad al flujo en el Sistema Internacional de unidades es  $\text{Ns}/\text{m}^4$ , con la equivalencia:  $1 \text{Ns}/\text{m}^4 = 1 \times 10^{-3} \text{Rayl}/\text{cm}$ . La resistividad al flujo es uno de los parámetros más importantes para determinar las propiedades de absorción de un material poroso, en este caso del suelo.

En general, es difícil tener una medida directa de  $\sigma$ , pero puede determinarse a través de métodos semiempíricos a partir de curvas de datos experimentales o puede obtenerse a través de métodos indirectos (Tarrero, 2000). En general  $\sigma$  presenta valores que oscilan entre 20 (suelos blandos, como nieve) y 30.000 (suelos duros, como asfalto)  $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}^4$  aproximadamente (Tarrero, 2002).

La resistividad es el parámetro que se usa para reflejar el comportamiento del suelo en algunos modelos de predicción de la propagación del sonido como por ejemplo el Nord 2000 <sup>7</sup>.

#### 4.2.1.3 Impedancia acústica del suelo

La impedancia de una superficie es la medida de la resistencia de la superficie contra el movimiento del aire. En este caso se trata de ondas sonoras que utilizan el aire como medio de propagación y la superficie que se tratará es el suelo. La impedancia acústica del suelo representa el comportamiento de este ante la incidencia de una onda sonora.

Cuanto más porosa es la superficie del suelo, menor es su impedancia y mayor capacidad para absorber las ondas sonoras.

La formulación de la impedancia del suelo ha sido estudiada a través del tiempo por distintos investigadores, en función de la frecuencia del sonido y de las propiedades del suelo.

En la Tabla 12 se muestra un resumen de algunos modelos que se usan para la determinación de la impedancia y los parámetros sobre los cuales se fundamentan. Incluye modelos

<sup>7</sup> El modelo Nord 2000 es un modelo de predicción de desarrollado por los Países Escandinavos para predecir la propagación de sonido en exteriores. Tiene en cuenta las características de la fuente, la divergencia geométrica, la absorción atmosférica, los efectos del suelo y la dispersión producida por obstáculos como árboles, viviendas, etc. Considera un amplio espectro de frecuencia en bandas de tercios de octava: entre 25 y 10.000 Hz.

empíricos<sup>8</sup>, fenomenológicos<sup>9</sup> y microestructurales,<sup>10</sup> y a continuación algunas notas sobre algunos de estos modelos citados.

Tabla 12- Modelos determinación Impedancia del suelo

Modelo	Cantidad de parámetros	Parámetro
Delany and Bazley	1	resistividad de flujo efectiva
Taraldsen	1	resistividad de flujo efectiva
Porosidad variable (dos parámetros)	2	resistividad de flujo efectiva tasa de variación de la porosidad con la profundidad
Voronina (2004)	3	dimensión media de grano número de granos por unidad de volumen, densidad de grano
Zwikker and Kosten	3	porosidad resistividad de flujo factor de estructura
Hamet fenomenológico	3	porosidad resistividad de flujo factor de estructura
Poros tortuosos idénticos	3	porosidad resistividad al flujo tortuosidad
Attenborough	4	porosidad resistividad al flujo tortuosidad factor de forma de poro
Relajación de Wilson	4	Tiempos de relajación viscosa y térmica para bajas y altas frecuencias
Distribución del tamaño de los poros	4	porosidad resistividad al flujo tortuosidad parámetro de distribución
Johnson/Allard/Umnova (2000)	4	porosidad resistividad al flujo tortuosidad longitud característica viscosa
Johnson/Allard (1993)	5	porosidad, resistividad al flujo tortuosidad longitudes características viscosas

<sup>8</sup> Los modelos empíricos, muestran relaciones a través del ajuste de gran cantidad de datos experimentales

<sup>9</sup> La aproximación fenomenológica consiste en sustituir un sólido poroso saturado por un fluido equivalente disipativo. Se han obtenido buenos resultados a bajas frecuencias [tesis doctoral 2008].

<sup>10</sup> La aproximación microestructural consiste en el estudio de la propagación de las ondas sonoras en el interior de un poro para, posteriormente, generalizar los resultados a escala macroscópica [tesis doctoral 2008 UPV: Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica]

Modelo	Cantidad de parámetros	Parámetro
		longitudes características térmicas
Johnson/Allard/ Lafarge	6	porosidad, resistividad al flujo tortuosidad longitudes características viscosas longitudes características térmicas permeabilidad térmica

*Nota.* Fuente: Adaptado de Attenborough K (2011).

De los modelos mencionados en la Tabla 12 el Modelo de Delany y Bazley es uno de los más conocidos y utilizados. La metodología de cálculo incluye un solo parámetro que es la resistividad al flujo ( $\sigma$ ) Se basa en un suelo poroso, por lo cual este modelo es usado cuando se estudia propagación en exteriores donde existen suelos con vegetación. Sin embargo, el modelo no es aplicable a la predicción de la absorción acústica en banda ancha. Miki en 1990 modificó la fórmula anterior para hacerla aplicable a un rango de frecuencia más amplio. (Attenborough, 2015)

Zwikker y Kosten realizaron investigaciones de materiales porosos, con un enfoque microestructural. Iniciaron investigando a nivel de microscopio, el radio medio de los poros, la densidad, el fluido que ocupan esos poros, entre otros. Estos modelos microestructurales requieren el conocimiento de parámetros como la porosidad, tortuosidad, resistividad, longitud característica térmica y longitud característica viscosa. (Attenborough, 2011)

Attenborough (1980, 1982, 1985), basado en las características acústicas de los materiales porosos rígidos, ha generado modelos de impedancia para varios tipos de suelos y a diferentes frecuencias. Trabajó un modelo de impedancia de cuatro parámetros para un suelo localmente reactivo, con poros rígidos, con adición de efectos térmicos y viscosos, con posiciones aleatorias de los poros. Suelos localmente reactivos son aquellos en los que la impedancia se considera independiente del ángulo de incidencia de la onda sonora, mientras que en los suelos de reacción extendida la impedancia depende del ángulo de incidencia, lo cual añade una variable más y hace más compleja su formulación.

Voronina trabajó sobre materiales porosos y fibrosos e introdujo un parámetro llamado característica estructural del material que depende de las propiedades físicas del material. Definiendo estos parámetros, evalúa el comportamiento acústico sin tener que realizar necesariamente medidas experimentales. En una de sus muchas investigaciones trabajó sobre medios con baja porosidad, encontrando nuevas ecuaciones empíricas para determinar la impedancia y la constante de propagación. (Attenborough, 2008)

Hamet utilizó un modelo fenomenológico y microestructural para caracterizar la impedancia. Estos enfoques introducen una dependencia viscosa y térmica, que representarían los fenómenos dentro de la estructura porosa. (Attenborough, 2011)

Allard y Champoux, teniendo en cuenta que el modelo de Delany y Bazley no era aplicable a frecuencias bajas, desarrollaron una serie de ecuaciones que solucionaban esta limitante y que tenían en cuenta la geometría de los materiales. Trabajaron sobre materiales fibrosos, con alta tortuosidad y alta porosidad, estableciendo una relación entre diámetro, la densidad del material y la propagación del sonido en dicho material. (Juliá E., 2008)

Taralsen, teniendo en cuenta que existen varios casos en los que el modelo simplificado de Delany-Bazley no es aplicable, establece que estos casos se describen mejor con modelos multiparamétricos basados en la física. Desarrolló un modelo de un parámetro que elimina los resultados no físicos, derivado de la ley de Darcy y de una relación entre la porosidad y la resistividad del flujo elegida de modo que el modelo resultante se aproxime al modelo de Delany-Bazley. En 2011 generalizó el modelo con dos parámetros, la resistividad de flujo efectiva y la profundidad de capa efectiva. Realizó extensas mediciones de campo de la impedancia acústica, basado en experimentación sobre varios tipos de suelos y en rangos de frecuencia entre 200 Hz y 2500 Hz, llegando a un ajuste del modelo de Delany-Bazley. (Attenborough, 2011)

Attenborough (2001) propone nuevos modelos para calcular la impedancia, algunos de ellos están basados en el cambio de la porosidad con la profundidad. En 2011, demuestra cómo el modelo de impedancia de un parámetro semiempírico de Delany y Bazley se ha utilizado con éxito para muchas superficies cubiertas de hierba, no da buenos ajustes a distancias pequeñas para superficies acústicamente "más blandas" como las de suelos forestales, asfalto poroso y grava.

Este modelo de un parámetro de Delany y Bazley se recomienda como modelo predeterminado para predecir la impedancia del suelo exterior (excepto para el asfalto poroso) en el esquema de predicción Harmonoise<sup>11</sup>.

El modelo Johnson-Allard-Umnova es un sofisticado modelo de impedancia multiparámetro para un medio granular en el que la longitud característica térmica se calcula a partir del conocimiento de la dimensión media del grano y la porosidad (Attenborough, 2008).

De acuerdo con Attenborough (2011), y con respecto a la mayoría de suelos porosos al aire libre, esta recomendación debe revisarse a favor de modelos de dos o tres parámetros (es decir, en los que al menos se incluya la profundidad de la capa porosa).

En lo que respecta a la medición de la impedancia acústica se puede realizar a través de métodos directos e indirectos. El método directo está basado en la utilización de montajes como por ejemplo los tubos de impedancia cuya precisión depende de la fidelidad con la que se puedan reproducir las condiciones del material en su estado natural.

En cuanto a los métodos indirectos, se basan en comparar las mediciones de los niveles de presión sonora teóricos obtenidos con la aplicación de un modelo, con los valores obtenidos en campo. Para que las situaciones sean comparables se deben medir de manera simultánea los niveles de presión sonora en el punto de emisión y en el punto de interés, e incluir los datos meteorológicos. No deberían existir obstáculos para no añadir más variables a este método indirecto.

En resumen, hay distintas formas de determinar la impedancia acústica del suelo, pero todas se basan en la relación con la frecuencia del sonido y de la resistividad al flujo como principal

---

<sup>11</sup> Harmonoise es un modelo europeo de predicción de la propagación del sonido en el aire libre. Calcula la atenuación del sonido que se propaga desde una fuente a un receptor, en un único plano de propagación; por lo cual se le llama "punto a punto". Considera que el método de propagación es independiente del modelo de la fuente de ruido y trabaja en un amplio espectro de frecuencia en bandas de tercios de octava: entre 25 y 10.000 Hz. Inicialmente, fue utilizado para la predicción de los niveles de ruido ambiental provocados por el tráfico por carretera y ferrocarril. Posteriormente se creó el proyecto IMAGINE que estandarizó los métodos de Harmonoise y desarrolló nuevos métodos de cálculo del ruido ferroviario, vial, industrial y aeronáutico.



característica del suelo y a partir de aquí se pueden incluir otras características en la medida que se tengan y que en definitiva hacen que el valor de la impedancia sea más preciso.

#### 4.2.1.4 Tortuosidad

La tortuosidad es un concepto físico que se interpreta como la razón entre la trayectoria seguida por un flujo al atravesar un medio poroso y el espesor de dicho material, en este caso el suelo.

El concepto de tortuosidad se utiliza para caracterizar la estructura interna de los medios porosos, para estimar su conductividad eléctrica e hidráulica, para estudiar el tiempo de viaje y la longitud para la dispersión de un trazador. (Ghanbarian et al., 2013)

Generalmente la tortuosidad no puede ser medida directamente y en la mayoría de los modelos de flujo y transporte en medios porosos se toma como un parámetro ajustable.

Attenborough (1985, 2001, 2005) ha trabajado con modelos de impedancia cada vez más complejos, incluyendo parámetros como la forma del poro, la forma del grano, la posición de los poros (tortuosidad), efectos térmicos y viscosos que implican un conocimiento más profundo de la microestructura del material, en este caso el suelo. Lo anterior con el fin de lograr más precisión con los resultados y encontrar mejores correlaciones entre lo teórico y lo experimental.

Attenborough (1982, 1988) desarrolló un modelo con cuatro parámetros que eran representativos del efecto del suelo, la resistividad, la porosidad, el factor de los poros y la tortuosidad, la cual definía como:

$$T = \Omega^{-n} \quad (54)$$

Donde:

*T*: Tortuosidad

*Ω*: Volumen de la porosidad. En este estudio se ha denominado como *P*.

*n*: factor de forma del grano

La porosidad,  $\Omega$ , para un volumen determinado es el cociente entre el volumen de aire contenido en las cavidades del suelo y el volumen total considerado.

El cuadrado de la tortuosidad es denominado como factor de estructura, que es uno de los parámetros utilizados en la determinación de la impedancia como se presentó en la Tabla 12.

El factor de forma del grano es un valor difícil de determinar para suelos al aire libre, por lo que el cálculo de la tortuosidad mediante algoritmos y ecuaciones se torna complicado y es necesario apoyarse en métodos experimentales. (Rodríguez, 2003)

De manera muy general se tiene que la tortuosidad del suelo reviste importancia en el sentido que, a mayor tortuosidad, mayor recorrido de las ondas sonoras, mayor disipación de la energía dentro de la capa porosa y por tanto mayor absorción.

En resumen:

Mayor porosidad → Mayor tortuosidad → Mayor disipación energía → Mayor atenuación

Mayor porosidad → menor resistividad al flujo → Mayor absorción → Mayor atenuación

#### 4.2.1.5 Rugosidad

Attenborough et al. (2014) demostraron que la rugosidad del suelo es un factor que incide en la atenuación del sonido en exteriores, para lo cual hicieron experimentación para sonido asociado al tráfico en carreteras. Para el caso estudiado, se obtuvieron reducciones significativas en el ruido de transporte terrestre de hasta 10 dB. El factor de rugosidad como tratamiento para el suelo puede ser una alternativa al uso de una barrera común, dado que es deseable preservar la línea de visión, y que el rendimiento acústico de los tratamientos de rugosidad superficial mejora si los elementos de rugosidad son ligeramente absorbentes.

Zhimin Xu et al. (2020) desarrollaron un modelo teórico para cuantificar la influencia de la rugosidad de la superficie en la propagación del sonido en materiales porosos que contienen tubos rugosos, extendiendo el modelo de Johnson - Champoux - Allard - Lafarge (JCAL). Demostraron que la existencia de rugosidad en el tubo debilita el efecto térmico, pero refuerza drásticamente el efecto viscoso en la disipación de la energía del sonido, lo que resulta en una mejor absorción del sonido. Este trabajo proporcionó información fundamental sobre cómo la rugosidad de la superficie afecta el rendimiento acústico de los materiales porosos que absorben el sonido.

#### 4.2.2 Tronco y corteza de los árboles

El tronco se refiere al principal elemento estructural de un árbol que soporta las ramas y todo el resto de la planta (hojas, flores, frutos, etc.). Los troncos de los árboles son superficies duras que pueden reflejar el sonido en muchas direcciones, algunas impredecibles.

El tronco es uno de los elementos de la vegetación que influye en la atenuación del sonido, debido a su textura, a su tamaño en relación con otros componentes del árbol, pero que depende de otros factores como es su ubicación y disposición dentro del área. Si no hay suficiente follaje, los espacios entre un tronco y otro generan una oportunidad para la transmisión directa del sonido.

La corteza del árbol es la parte exterior del tronco que le sirve de protección a la parte leñosa y cuyo efecto en la atenuación del sonido está relacionado con el fenómeno de absorción.

Reethof et al. (1975) realizaron un estudio experimental en un tubo de impedancia, calculando la absorción del sonido en 12 muestras de cortezas de árboles que correspondían a 6 especies de árboles. Encontraron que los coeficientes de absorción de las seis especies estudiadas eran bastante bajos y en gran medida independientes de la frecuencia (principalmente entre 0,05 y 0,10 para frecuencias de sonido entre 400 Hz y 1.600 Hz). La pequeña variación en la absorción entre las muestras demostró que la atenuación del sonido de los árboles forestales se ve poco afectada por las características de la corteza.

*Aunque cada tronco de árbol absorbe solo una pequeña fracción de la energía de la onda incidente, el efecto se repite cuando la onda de sonido se dispersa de un árbol a otro. No les fue posible establecer cómo se compara la absorción total de la corteza con la de los arbustos, el follaje, las ramas o el dosel en su conjunto. Se puede suponer que el proceso de dispersión hace que el sonido esté disponible para una mayor*

*superficie y, por lo tanto, le da al suelo y a los otros elementos del bosque más oportunidades de absorber la energía acústica*

Si bien los porcentajes de absorción fueron bajos, se destacó el comportamiento del nogal, que tuvo coeficientes de absorción entre 0,02 y 0,23 a frecuencias superiores a 1.250 Hz. La explicación está basada en el tipo de corteza que se caracteriza por capas similares a esquisto con espacios entre ellas y cuyos espacios estarían permitiendo que las capas individuales vibren, transformando la energía acústica incidente en energía mecánica y esto es lo que probablemente explica el valor de su absorción, de acuerdo con el autor.

Herrington y Brock (1977) investigaron la propagación del ruido sobre y a través de un rodal, llegando a conclusiones similares a las de Reethof, en cuanto a que los tallos y ramas de los árboles dispersan la energía acústica y que la absorción tiene lugar principalmente en la superficie del suelo, indicando además que también puede haber alguna atenuación en la parte más gruesa del dosel.

Lee et al. (2008) realizaron para el Departamento de Transporte de Virginia, un análisis experimental con el objetivo de determinar la atenuación del sonido de tráfico por algunas especies de árboles concluyendo que la dispersión de los troncos es un factor importante para la atenuación, así como las ramas y las hojas. La dispersión por troncos representa una mayor proporción de atenuación en los sitios de abetos y bosques mixtos en invierno que en los bosques mixtos de coníferas o bosques mixtos en verano. Además, mencionan que los troncos pueden generar reflexión del sonido en direcciones impredecibles.

Li et al. (2020), mencionan que la dispersión de las ondas sonoras por los troncos es un factor físico principal que conduce a la reducción del nivel de presión sonora por los cinturones de los árboles, y se ha demostrado anteriormente que las propiedades absorbentes de los troncos son importantes a este respecto. Sin embargo, la información detallada sobre la absorción de la corteza es actualmente muy escasa. Realizaron experimentos de laboratorio con un tubo de impedancia para medir la absorción de sonido de la corteza de varias especies de árboles, incluidas las caracterizaciones del grosor de la corteza, la rugosidad, la edad de los árboles y la cobertura de musgo. Concluyeron entre otros, que, en el caso de cinturones de árboles más densos, los pequeños efectos en el coeficiente de absorción son aún más fuertes debido al mayor número de interacciones entre las ondas sonoras y los troncos.

### **4.2.3 Ramas, hojas y follaje**

Las hojas y el follaje en general son elementos constitutivos de los árboles y arbustos que también influyen en la mitigación del ruido. Al tratarse de obstáculos generan reflexiones de una parte de las ondas sonoras y absorción debido a su naturaleza y estructura en el caso de las hojas.

Las ramas y el follaje dispersan parcialmente la energía acústica incidente hacia los lados y hacia atrás, produciendo una zona de sombra detrás de la vegetación. (Bucur, 2005)

En lo que respecta a las hojas, algunos estudios basados en experimentación han pretendido demostrar la influencia en la atenuación del sonido diferenciando árboles o arbustos de hojas caducas y los de hojas perennes, estudiando el comportamiento del sonido en distintas estaciones.

Martens (1981) evaluó a nivel de Laboratorio cuatro especies de plantas en un campo sonoro ante una vibración utilizando un sistema de vibrómetro láser-Doppler. Todas las hojas se comportan como sistemas mecánicos lineales cuando son impulsadas por energía acústica y aunque la cantidad de energía sonora absorbida de esta manera por una sola hoja es muy pequeña, este mecanismo puede contribuir de todos modos a la atenuación del sonido por parte de plantas y comunidades vegetales dada la cantidad de hojas que puede tener un solo árbol.

Watanabe y Yamada (1996) estudiaron el efecto de las hojas en la atenuación del sonido. Determinaron teóricamente el coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ) de los árboles mediante la expresión  $\alpha = G f_l / 2$ , donde  $f$  es la frecuencia y  $G$  es una constante. Dado que el valor de  $G$  no se puede calcular directamente, midieron experimentalmente los coeficientes de absorción de cuatro tipos de árboles en una cámara de reverberación. Concluyeron que la energía del sonido era absorbida principalmente por las hojas de los árboles y no por sus troncos. Los valores de  $G$  están entre 0,001 y 0,002 y la atenuación por la vegetación fue expresada teóricamente por este factor  $G$ . Para comprobar la precisión llevaron a cabo experimentos con dos tipos de árboles, y midieron la energía sonora absorbida por las hojas. Los valores teóricos tuvieron una coincidencia aceptable con los resultados experimentales, lo que indica que se puede predecir la atenuación por absorción.

Fan et al. (2010) evaluaron seis tipos de setos densos de hoja perenne: viburno o madera de flecha (*Viburnum odoratissimum*), adelfa (*Nerium indicum*), Photinia china (*Photinia serrulata*), bambú (*Oligostachyum lubricum*), Red Robin Photinia (*Photinia fraseri*) y Deodar Cedro (*Cedrus deodara*).

Los autores estudiaron la relación entre cada una de las características de la planta (área foliar, peso de la hoja fresca, tacto de la hoja y forma de la hoja), su atenuación de ruido relativo promedio ( $\Delta L_{Aep}$ ) y generaron el espectro de reducción de ruido de las seis plantas. Encontraron los mejores rendimientos para la llamada “forma de la hoja” (la relación entre la longitud de la hoja y el ancho de la hoja) entre 2 y 3, para la mayor área foliar y peso de la hoja: entre 3 y 4 dB/m. El bambú y la adelfa no presentaron buena atenuación, pero el cedro presentó muy buena atenuación a bajas frecuencias (inferiores a 100 Hz y entre 250 Hz y 800 Hz). Por otro lado, tanto las especies de Photinia como las de madera de flecha mostraron su mayor atenuación a frecuencias superiores a 2.000 Hz. Obtuvieron la Ecuación 55 por regresión, y lo proponen para el cálculo de la atenuación sonora de los setos, en dB/m

$$\Delta L_{Aep} = 2,705 + 0,266W - 3,337T - 0,094S \quad (55)$$

Donde:

- $\Delta L_{Aep}$ : atenuación sonora de los setos (dB/m)  
 $W$ : peso de la hoja (g)  
 $T$ : tactilidad;  $T = \text{peso de la hoja} / \text{área de la hoja}$  (g/cm<sup>2</sup>)  
 $S$ : forma de la hoja;  $S = \text{largo de hoja} / \text{ancho de hoja}$  (m/m)

Cada planta presenta un espectro de reducción de ruido específico por lo cual recomiendan la combinación de especies para lograr mayores beneficios en lo que a atenuación de ruido se refiere.

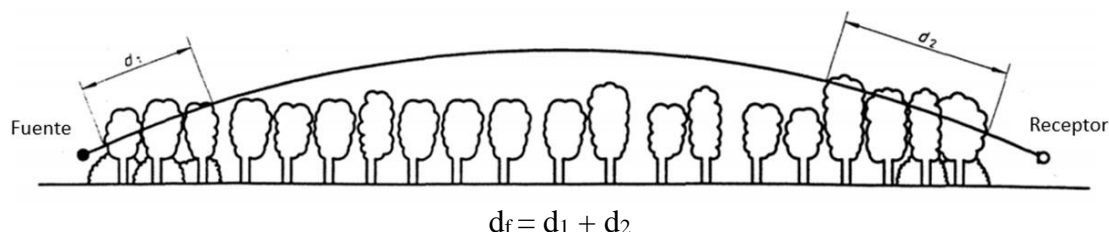
Murray (2012) menciona que la energía del sonido podría ser absorbida por el follaje al convertirse en energía vibratoria en las hojas y ramas, y reducir los niveles de ruido detrás de la barrera. Mencionan que las hojas tienen influencia en el sentido que pueden generar absorción y dispersión. Entre las conclusiones menciona que no se observó dispersión en frecuencias altas en setos de hoja perenne; si se va a construir una barrera cerca de un seto denso, el seto puede aumentar la eficacia de la barrera al dispersar y absorber el sonido y evitar que llegue a la zona de sombra. Si el seto no es denso y las hojas son pequeñas, los efectos del follaje son pequeños.

Horoshenkov et al. (2013) demostraron la importancia de las características de las hojas para su rendimiento acústico, especialmente como absorbentes del sonido. Los autores trabajaron con cinco tipos de plantas (*Geranium zonale*, *Hedera helix*, *Pieris japonica*, *Summer Primula vulgaris* y *Winter Primula vulgaris*). El trabajo de laboratorio se realizó utilizando un tubo de impedancia (o tubo de Kundt). Los autores también midieron el grosor, el peso y el área de las hojas individuales, el número de hojas en una planta, el volumen ocupado por la planta, el ángulo dominante de orientación de las hojas, el área total de hojas por planta, la densidad superficial de una sola hoja y el peso total de hojas y tallos. *Winter Primula Vulgaris* tuvo el mejor desempeño acústico, con un coeficiente de absorción de 0,6 o mayor para frecuencias entre 500 Hz y 1.600 Hz. El coeficiente de absorción más bajo fue el de *Hedera helix*, con valores inferiores a 0,2 para todas las frecuencias inferiores a 1.600 Hz.

Jung et al. (2020), también a nivel de Laboratorio, evaluaron la propiedad de absorción de sonido de las hojas de dos especies de árboles de hoja ancha perenne, *Dendropanax morbiferus* y *Fatsia japonica*. Las propiedades de absorción acústica fueron evaluadas para tamaños de hojas de 0,5 x 0,5 cm, 1,0 x 1,0 cm y 2,0 x 2,0 cm y para muestras formadas por capas de hojas con espesores de 1,0 cm, 1,75 y 2,5 cm. Entre otros resultados, se destaca que los efectos de absorción de sonido más altos para todas las condiciones en este estudio, son para la especie *F. japonica*, en la muestra de 2,50 cm de espesor compuesta por hojas de un tamaño de 0,5 x 0,5 cm, por lo cual plantea la expectativa de uso como material natural para absorbentes de sonido.

En cuanto al follaje de árboles y arbustos, este proporciona una atenuación, solo si es lo suficientemente denso para bloquear completamente la vista a lo largo del camino de propagación, es decir, cuando es imposible ver una distancia corta a través del follaje. La atenuación puede deberse a la vegetación cercana a la fuente, o al receptor, o ambas situaciones, como se ilustra en la Figura 25 (ISO 9613-2 Anexo A9).

Figura 25. Propagación del sonido a través del follaje de los árboles.



Para calcular  $d_1$  y  $d_2$ , el radio de la trayectoria curva puede ser asumido como 5 km.

*Nota.* Fuente: Adaptado de ISO 9613-2

La atenuación debida a la propagación a través del follaje aumenta linealmente con la distancia de propagación  $d_f$ , a través del follaje. En la Tabla 13 se muestran valores de atenuación de referencia por frecuencia y en función de la distancia  $d_f$ .

Tabla 13- Atenuación del sonido a través de follaje denso-ISO 9613-2

Distancia de propagación $d_f$ (m)	Frecuencia nominal (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
$10 \leq d_f \leq 20$ Atenuación en dB	0	0	1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$ Atenuación en dB/m	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

*Nota.* Fuente: Adaptado de ISO 9613-2

En lo que respecta al efecto en función de la frecuencia, el follaje puede atenuar el sonido a frecuencias superiores a 2.000 Hz, mientras que las propiedades absorbentes del suelo pueden ayudar a reducir el sonido de frecuencias más bajas (250 a 500 Hz) (Lee, 2008).

En un estudio de propagación del sonido en terrenos blandos con y sin cultivos y para la reducción del ruido en el transporte terrestre, se concluye que la atenuación del sonido por la vegetación es el resultado de la dispersión múltiple entre los tallos y las hojas, la pérdida de coherencia y las pérdidas viscosas y térmicas debido al follaje; la mayor contribución está asociada con pérdidas térmicas y viscosas (Attenborough et al., 2015).

#### 4.2.4 Altura de los árboles

La altura de los árboles parecería afectar la reducción del ruido debido a la mayor superficie presentada al frente de onda que avanza y, en consecuencia, a las mayores oportunidades de difusión y absorción. Los resultados indican, en general, que la altura de los árboles está significativamente correlacionada con la reducción del ruido (Cook, 1971). Estudios más recientes han determinado que es un factor que contribuye en la atenuación del sonido, pero no siempre es el predominante, juegan un papel muy importante la disposición de los árboles y la densidad dentro del área de estudio, entre otros.

Pathak et al. (2008) determinaron que la profundidad del cinturón de árboles y su altura están correlacionados positivamente con la reducción del ruido del tráfico evaluado.

Otros estudios han demostrado la efectividad en la atenuación del ruido mediante combinación de árboles y arbustos, los cuales presentan alturas diferentes generan una densidad distinta a si se tratara solo de árboles o solo de arbustos. (Karbalaie et al., 2015).

Karbalaie et al. (2015) evaluaron el papel potencial de los cinturones verdes en 9 estaciones a lo largo de la carretera para la atenuación del ruido utilizando varias especies de árboles y arbustos en tres masas arbóreas a 25, 50 y 100 m de profundidad. En todos los cinturones verdes examinados, la combinación de árboles y arbustos fueron los más efectivos para atenuar el ruido mediante la dispersión del follaje y la densidad de ramas, mientras que el cinturón de árboles con altura aceptable fue superior debido a la difusión y absorción de ondas acústicas. Aunque la mayoría de los arbustos son bajos, tanto los arbustos como los árboles pueden utilizarse para atenuar el ruido. Menciona sin embargo que se requieren más estudios para

determinar con precisión la altura aceptable del árbol que permitiría mayor atenuación del ruido. Señalan que la densidad, altura, longitud y anchura de los árboles son los factores más importantes para atenuar el ruido, más que el tamaño de las hojas y las características de ramificación. La difusión prevaleció más que la absorción en la atenuación de la energía acústica. En consecuencia, el diseño y la forma del cinturón de árboles son los factores más importantes en la atenuación del ruido.

#### **4.2.5 Masa arbórea**

Cada uno de los elementos de la vegetación, incluido el suelo tienen una incidencia particular en la atenuación del sonido que a veces no es fácil de cuantificar de manera independiente, sobre todo en exteriores, donde el control de cada variable es de por sí un desafío. Por ello, muchos estudios analizan el efecto de la vegetación como un todo, es decir que el conjunto de árboles y arbustos y sus elementos constitutivos actúan como una barrera, determinando la atenuación generada por el efecto conjunto de toda la masa arbórea.

Con este enfoque, entran a jugar un papel importante otros aspectos, como son la disposición de los árboles y arbustos dentro del área de interés, la profundidad y la densidad de la masa arbórea.

##### **4.2.5.1 Profundidad de la masa arbórea**

La profundidad de la franja de vegetación influye en la reducción del ruido, debido al mayor número de árboles y, en consecuencia, al mayor número de elementos absorbentes y difusores que impiden el paso del sonido. Los resultados indican, en general, que la profundidad de la franja de vegetación está significativamente correlacionada con la reducción de ruido. En general, los cinturones profundos de árboles altos son los más efectivos (Cook, 1971).

Maleki (2010) investigó sobre el efecto de la masa arbórea en la atenuación del ruido en el parque forestal de Chitgar (Teherán). Realizó mediciones a 7 profundidades diferentes de una fuente puntual, ubicándose detrás de los rodales a 10, 20, 30, 40, 50, 75 y 100 m. Sus mediciones las realizó para un Blanco (área sin plantación), un área plantada con *Robinia pseudoacacia*, una con *Pinus eldarica* y un área mixta con las dos especies mencionadas. Entre sus hallazgos se destaca que los rodales mixtos tuvieron el mejor efecto en la reducción de la contaminación acústica, que fue de 16,91 dB a una distancia de 100 metros, observando además que a 50 m ya se obtuvo una reducción de 15,77 dB. De acuerdo con estos resultados, a partir de los 50 m la atenuación no presenta diferencias importantes, pero como mínimo se requiere esta profundidad de 50 m para ver resultados significativos.

Karbalae et al. (2015) realizaron mediciones a 25, 50 y 100 m de una fuente y a través de 9 tipos de plantaciones, encontrando que la mayor atenuación fue de 44 dB en la profundidad de 100 m y en el área que tenía plantación mixta de árboles y arbustos.

##### **4.2.5.2 Densidad de la masa arbórea**

La vegetación solo tiene efecto significativo si su densidad genera un bloqueo de la línea de propagación de la señal acústica. La densidad es reflejada a través del parámetro forestal

conocido como “área basal”<sup>12</sup> el cual se determina para un individuo (árbol) o para un bosque según sea requerido. El área basal de un individuo se determina según la siguiente expresión:

$$g = \pi \left( \frac{DAP}{2} \right)^2 \quad (56)$$

Donde:

*g*: Área basal de un individuo (árbol, arbusto) en m<sup>2</sup>

*DAP*: Diámetro a la altura del pecho. Es el diámetro del fuste a 1,30 m del suelo

El Área basal por unidad de superficie es la suma de todos los DAP en un área dada en un momento determinado que tiene que ver con la edad del individuo.

Kellomäki et al. (1976), midieron la atenuación del sonido en varios tipos de rodales utilizando un modelo basado en la física de la propagación del sonido. Sus resultados muestran que el exceso de atenuación del ruido causado por los árboles puede llegar a ser, en los mejores casos, de un 60 % en términos de energía, en comparación con la atenuación causada por la dispersión geométrica. Esto es de 5 a 8 dB. La cantidad total de agujas (acículas), hojas y ramas de un rodal resultó ser el factor más importante en la atenuación del ruido. Sin embargo, la densidad y la altura de un rodal tuvieron bastante incidencia para predecir el comportamiento del ruido en los rodales de árboles.

Vikrant Tyagi et al. (2013) realizaron mediciones de ruido en once sitios diferentes ubicados en tres ciudades prominentes de la región de Tarai en India para evaluar la efectividad de los cinturones de vegetación en la reducción del ruido de tráfico a lo largo de los bordes de las carreteras. La profundidad del cinturón de vegetación en cada sitio fue de aproximadamente 15 m. Generalmente, en todos los sitios, el cinturón de vegetación comenzó en 1–1,5 metros desde el borde de la carretera.

Calcularon la atenuación por la distancia para cada sitio y estimaron el exceso de atenuación a diferentes frecuencias en bandas de tercios de octava. Encontraron que el exceso de atenuación promedio es de aproximadamente 15 dB en las frecuencias bajas (200 Hz a 500 Hz) y entre 15 dB y 20 dB en las frecuencias altas (8 kHz a 12,5 kHz). En las frecuencias medias críticas (1-4 kHz), el exceso de atenuación promedio está entre 10-15 dB, aunque no tan alto, sigue siendo significativo, y varios sitios muestran un exceso de atenuación de 15 dB o más a 1 kHz. Los resultados indican que los cinturones de vegetación suficientemente densos a lo largo de los bordes de las carreteras pueden resultar barreras de ruido efectivas y se puede lograr una atenuación significativa en las frecuencias medias críticas (1-4 kHz).

Trimpop y Mann (2014) realizaron mediciones demostrando que, a partir de un cierto valor mínimo de la densidad, el coeficiente de atenuación medido tiene una relación casi lineal con la densidad de la población arbórea. Compararon bosques con diferentes diámetros de troncos y alturas de árboles, y la relación lineal de los valores del coeficiente de atenuación con el área

---

<sup>12</sup> Área basal: Es el área de la sección transversal de un árbol, tomada a una altura de 1,30 metros del suelo. Se utiliza como parámetro para representar la densidad de un bosque, expresada en metros cuadrados por hectárea. Entre más grosor tenga el fuste y más árboles existan, mayor será el área basal. (Salguero, Arias y González, 2014).



basal (pero no con los otros dos parámetros) del rodal forestal es nuevamente casi lineal. Para dos bosques con valores de área basal comparables pero diferente diámetro de troncos, encontraron valores de atenuación más altos para el bosque con diámetros de tronco grandes.

En otros estudios la atenuación obtenida por efecto de la vegetación no ha sido tan significativa, encontrando reducciones de 2 a 5 dB. Alegre (2006) menciona que se necesita un ancho del orden de 50 m de bosque denso de pinos, para obtener una reducción de 2 a 3 dB, no siendo eficaces las plantaciones de algunas pocas filas de árboles o arbustos junto a la carretera, o a una línea de ferrocarril, etc.

#### **4.2.6 Árboles dispuestos como cristales sónicos**

Un cristal sónico o fonónico es una estructura sólida de elementos (generalmente cilindros) hechos de metamateriales y creados para producir ciertos efectos acústicos.

Los metamateriales son medios estructurados que presentan propiedades inusuales, no encontradas en los materiales naturales que los constituyen. Estas propiedades son debidas al comportamiento de la estructura en si más que en la de sus componentes elementales. En un sentido más estricto se considera metamaterial a aquel material constituido por una estructura periódica de unidades elementales, cuya dimensión y periodicidad sea menor que la longitud de onda con la que se vaya a trabajar (Graciá, 2014).

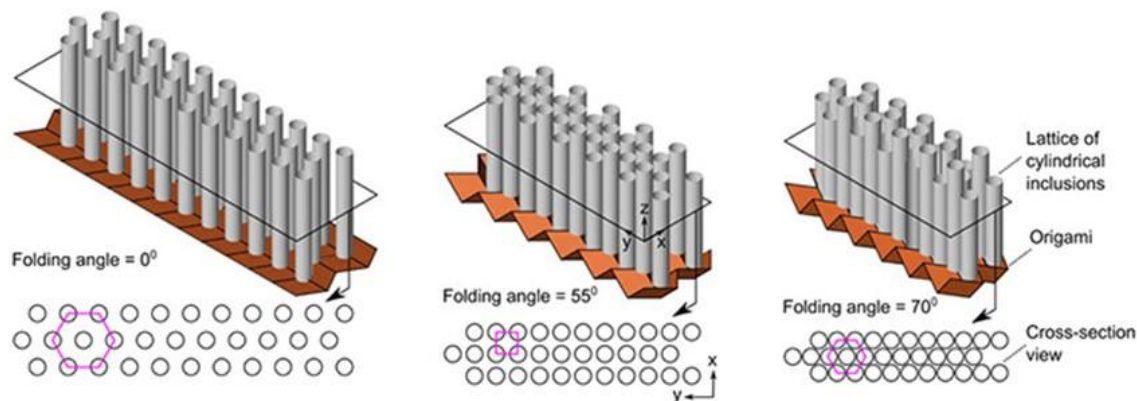
Cuando una onda sonora incide en un cristal sónico, su periodo inicial coincide con el periodo de las ondas incidentes creando una anulación entre ellas evitando su propagación en ciertas frecuencias. (<https://www.diffusionmagazine.com/index.php/nosotros/noticias/221-cristal-sonico>)

Un cristal sónico es una estructura que consta de arreglos periódicos de dispersores que inhiben la transmisión de sonido para ciertos rangos de frecuencias llamados bandgaps o bandas prohibidas, como lo hacen los cristales fotónicos con la luz. (García y Sánchez, 2012).

El concepto de “banda prohibida” se puede entender teniendo en cuenta la interferencia de las ondas dispersas al multiplicarse dentro de un cristal sonoro. Cuando un conjunto de dispersores se coloca periódicamente, las ondas quedan muy dispersas entre un obstáculo y el obstáculo contiguo, terminan llenando todo el espacio disponible y propagándose en todas las direcciones posibles. Interfieren constructiva o destructivamente, dependiendo de la frecuencia de las ondas y de la geometría de los cristales sónicos. Una banda prohibida aparece cuando las ondas dispersadas interfieren de forma destructiva en una dirección dada, de modo que su intensidad disminuye exponencialmente al atravesar el cristal. (Redondo et al., 2011)

A continuación, se presenta una ilustración de lo que podría considerarse como un cristal sónico

Figura 26. Cristales sónicos



Nota. Fuente: <https://physicsworld.com/a/sonic-barrier-quietens-traffic-noise-with-origami/>

Estudios han demostrado que la distribución de los elementos en una forma regular genera atenuación del sonido por la interferencia destructiva de las ondas dispersadas por cada elemento en las frecuencias según sea su estructura, logrando una “invisibilidad acústica”, por lo cual este enfoque es utilizado en el diseño de barreras acústicas.

Algunas plantaciones vegetales, a diferencia de un bosque, tienen técnicas de plantación que se caracterizan por una distribución periódica entre sus elementos, con una misma distancia entre cada elemento y una misma distancia entre filas de elementos, asemejándose hasta cierto punto a un cristal sónico. Lo anterior ha motivado la realización de investigaciones en este campo con el objetivo de determinar hasta qué punto una plantación vegetal de estas características funciona como un cristal sónico y si se obtienen resultados de atenuación interesantes a frecuencias bajas.

Martínez Salaa et al. (2006) realizaron un estudio con plantaciones vegetales (álamos, cipreses, laureles y naranjos), demostrando que es posible mejorar la atenuación del sonido obtenida de una masa de árboles si sus elementos están ordenados de una forma periódica; trabajaron con una disposición en filas periódicas, una configuración cuadrada, rectangular y triangular de los árboles. Sus resultados experimentales al aire libre demostraron que la mayor atenuación del sonido, dentro de un cierto rango de frecuencias, se obtuvo para un rango de frecuencias relacionadas con la periodicidad del arreglo. Este comportamiento los llevó a creer que estos conjuntos de árboles funcionan como cristales sónicos. Los resultados experimentales obtenidos demostraron que un cinturón de árboles organizado en una matriz periódica produce picos de atenuación a bajas frecuencias ( $f < 500$  Hz), no como consecuencia del efecto suelo sino como resultado de la interferencia destructiva de las ondas dispersas. Por lo tanto, estas matrices periódicas podrían usarse como pantallas acústicas vegetales.

El nivel de atenuación obtenido depende de la fracción de llenado, y la posición de los picos de atenuación obtenidos a lo largo de un cierto rango de frecuencias depende del tipo de configuración utilizada, así como del ángulo de incidencia en el que el sonido incide sobre la barrera. (Martínez-Salaa et al., 2006)

García et al. (2012) realizó una experimentación con barreras de 3 m de alto formadas por tres capas de unidades cilíndricas de migas de caucho, un material fonoabsorbente obtenido del reciclaje de neumáticos usados. Desarrollaron un algoritmo de optimización para obtener la distribución de materiales y las dimensiones de las unidades que den las mejores propiedades de atenuación del ruido del tráfico, encontrando una buena correspondencia entre las predicciones y las mediciones. Sugieren además que dicho algoritmo se podría ampliar al diseño de barreras basadas en cristales sónicos para atenuar otros tipos de ruido de banda ancha, como los provenientes de maquinaria industrial, con perfiles bien definidos (estacionarios).

Van Renterghem et al. (2012) demostraron también cómo el hecho de poder contar con arreglos periódicos en plantaciones vegetales parece merecer el esfuerzo en lo que a reducción del ruido se refiere, además que trae beneficios en el costo computacional de las modelaciones. Las simulaciones numéricas 3D normalmente necesitan una gran cantidad de recursos computacionales. Sin embargo, como resultado de aprovechar la periodicidad, el dominio computacional puede reducirse en gran medida. Esto se hace usando planos de espejo en el dominio de simulación y solo modelando una franja representativa de la cuadrícula. Se aprovecha la simetría; es un enfoque usual en las simulaciones acústicas, y las aplicaciones de este concepto son numerosas.

Con base en lo anterior, además de los componentes del árbol, el suelo y las dimensiones de la barrera, un factor a considerar es la configuración en la que se plantan los árboles no solo por estar estrechamente relacionada con la densidad del área, sino porque la forma incide en su comportamiento como cristal sónico, y es posible obtener una atenuación significativa para ciertas frecuencias bajas.

## 5 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se localiza en una Industria ubicada en una zona rural de Uruguay, en la cual se realizaron varias plantaciones vegetales en su perímetro para mitigar el impacto sobre el paisaje por la inserción de la industria en el entorno rural. Para esto se instalaron una serie de cortinas de árboles por sectores específicos. La Plantación se inició en el año 2016, y hasta el año 2021 se hizo seguimiento en su crecimiento. Si bien el objetivo era mitigar el impacto sobre el paisaje, a través de este estudio se pretende evaluar si la inserción de estas cortinas de árboles tuvo algún efecto en la mitigación del ruido exterior. Lo anterior, partiendo de la base que las cortinas de árboles están ubicadas entre las principales fuentes de ruido y los receptores, que para este caso son 3 (tres) ubicados en puntos estratégicos.

Para esta evaluación se realizó una identificación de las fuentes sonoras y receptores una identificación del camino preponderante de propagación a efectos de incluir algunas características del suelo, y se realizaron mediciones tanto para caracterizar las principales fuentes sonoras como los niveles de presión sonora en los receptores. Se evaluaron diferentes escenarios de operación de la industria.

En general, las barreras acústicas amortiguan el ruido cuanto más cerca se colocan a la fuente del ruido, condición esta que no se dio en todos los Puntos del estudio, dado que esas cortinas de árboles no tenían el objetivo de actuar como barreras acústicas.

### 5.1 DESCRIPCION DE LA INDUSTRIA

La Planta Industrial está ubicada en área rural de la zona este de la República Oriental del Uruguay, instalada sobre un predio de 114 ha y se dedica a la producción de sustancias refinadas a partir del procesamiento y calcinación de piedra caliza.

El proceso de la fabricación de la cal inicia con la extracción de la piedra caliza desde el yacimiento, la cual es llevada en camiones a la industria en bloques de tamaño de hasta 1 (un) m<sup>3</sup>. En este caso, el yacimiento se ubica a 5.000 m de la industria y no es integrado a la investigación, ya que las fuentes de ruido de este sitio no interfieren de manera directa con la operativa de la Planta industrial, por la distancia, la topografía y por la operativa en sí misma, que es diferente a la de la industria.

Una vez llega la piedra a la industria, es sometida a dos procesos de trituración: trituración primaria y secundaria para que esta piedra obtenga las dimensiones aptas para su ingreso al horno (hasta 50 mm). La piedra triturada es transportada a través de cintas hacia una zaranda donde se le hace una última retención de polvo y partículas finas que no deben ingresar al Horno. La piedra llega al precalentador y de allí finalmente al horno rotatorio horizontal donde se calcina. El combustible utilizado es petcoke, el cual es triturado en un molino antes de su ingreso al horno. Una vez realizado el proceso de combustión se obtiene la cal viva en piedra, se lleva a una molienda para obtener el producto comercial que se conoce como cal viva molida.

### 5.2 FUENTES SONORAS FIJAS

Las fuentes sonoras fijas presentes en este tipo de industrias están representadas por el equipamiento y maquinaria industrial, las cuales generan ruido y vibraciones en mayor o menor

medida siendo algo intrínseco a su funcionamiento. Al vibrar, las máquinas transmiten oscilaciones a las estructuras sobre las que se apoyan (pisos, paredes, tuberías).

Parte del ruido estructural (ondas elásticas que se propagan por medios sólidos) se convierte, por radiación, en ruido aéreo.

Las principales fuentes de ruido asociadas al proceso productivo se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14-Fuentes fijas principales

<b>Identificación</b>	<b>Descripción</b>
F1	Trituradora de piedra Tipo 1
F2	Trituradora de piedra Tipo 2
F3	Zaranda vibratoria
F4	Molino de combustible sólido

Existen otras fuentes de ruido como bombas, transformadores, compresores, zarandas, molinos, etc., que para efectos del presente estudio no fueron consideradas de manera independiente puesto que, de la caracterización de las fuentes, se dedujo que las fuentes incluidas en la Tabla 14 son las que presentan los mayores niveles de potencia acústica. Adicional a lo anterior, muchas de estas fuentes adicionales están ubicadas muy cerca o en el mismo edificio de las fuentes principales caracterizadas, por lo cual el ruido generado por estas fuentes secundarias ya está incluido en las mediciones realizadas.

## 5.2.1 Descripción de las fuentes

Una descripción de cada una de las fuentes sonoras incluidas en el estudio se presenta a continuación

### 5.2.1.1 Fuente - F1

Se trata de una trituradora de mandíbula o de quijada (ver Figura 27) que realiza una primera trituración gruesa o media de la piedra. Este nombre surge porque los movimientos que realiza en el proceso de trituración son parecidos a los de una mandíbula al masticar. El ruido se genera con el desplazamiento de la piedra que golpea contra las paredes metálicas de la trituradora, por la ruptura de la piedra y por el funcionamiento de los motores que accionan el mecanismo de trituración.

Figura 27. Trituradora de piedra-Tipo mandíbula



Fuente:  
<https://www.directindustry.es/prod/fls-midth-dorr-oliver-eimco/product-62016-1488735.html>



Fuente:  
<https://www.sciexaminer.com/news/%EF%BB%BFglobal-crusher-market-insights-2019-metso-sandvik-terex-astec-industries-weir-atlas-copco-hitachi-construction-machinery-46679.html>

### 5.2.1.2 Fuente - F2

Se trata de una trituradora de cono (ver Figura 28) que rompe la piedra haciendo presión sobre ella entre los ejes giratorios excéntricos. El ruido se genera por el contacto mecánico de piezas y los motores que accionan el mecanismo.

Figura 28. Trituradora de piedra-Tipo cono



Nota. Fuente:  
<https://www.savonaequipment.com/es/trituradora-de-cono-raptor-xl300-nueva-p197719>



Nota. Fuente  
<https://www.youtube.com/watch?v=IRae8qnrbcQ>

En el área donde se ubica esta fuente se encuentran también una zaranda vibratoria de similares características a la Fuente F3, y otro tipo de equipamiento, pero todo está concentrado en una misma área. Las mediciones para caracterizar esta fuente se hicieron a 35 m, de tal forma que el ruido medido es representativo del conjunto del equipamiento, pero para facilidad en la interpretación se ha denominado como Fuente F2.

### 5.2.1.3 Fuente - F3

Se trata de una zaranda vibratoria como la que se presenta en la Figura 29.

El ruido se genera por el movimiento de la piedra dentro del equipo, por la vibración y por los motores que accionan los mecanismos de funcionamiento.

Figura 29. Zaranda vibratoria



*Nota.* Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=vsvf5M8EuWA>

En la Industria hay tres zarandas de este tipo, pero ésta se ha tomado como fuente independiente por su ubicación aislada de otras fuentes.

### 5.2.1.4 Fuente - F4

Esta fuente corresponde al molino de carbón (ver Figura 30) y se trata de un molino con cuerpos molidores en su interior (bolas de acero).

Se trata de un recipiente cilíndrico que gira sobre su eje y funciona por impacto y fricción. El medio de la molienda son bolas o esferas de acero inoxidable que impactan con el carbón y entre ellas mismas generando la reducción del tamaño del carbón y una mezcla de este combustible.

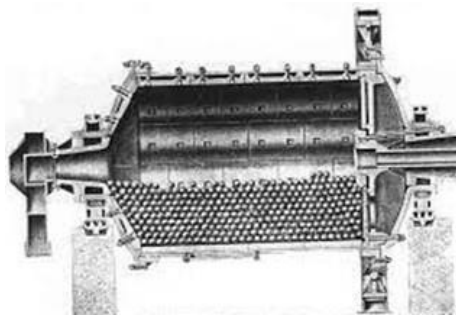
El ruido se genera por el impacto de las bolas sobre las paredes del cilindro, y entre ellas, por la vibración y por los motores asociados al mecanismo de operación.



Figura 30. Molino de carbón- Tipo bolas o cuerpos moledores



*Nota.* Fuente:  
<https://stolmx.pl/products/molino-de-bolas.html>



*Nota.* Fuente:  
[https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8.\\_molienda.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8._molienda.pdf)

El molino está ubicado en el área de producción, donde existen otras fuentes sonoras muy cerca como son el horno-precalentador y el molino de cal, entre otros. El punto de medición se ubicó a 12 m del molino en un punto representativo del ruido del área.

### 5.2.2 Recintos de las fuentes

La totalidad de las fuentes sonoras presentadas en la Tabla 14 se encuentran en edificios abiertos, apoyadas sobre estructuras de hormigón, pero no confinadas en recintos cerrados.

En la Figura 31 se muestran fotografías de los edificios y recintos donde se alojan las fuentes sonoras del presente estudio.



Figura 31. Recintos de las fuentes sonoras

Fuente F1-Trituradora 1



Fuente F2-Trituradora 2



Strippers- cerca de F2



Zarandas vibratorias- cerca de F2



Fuente F3- zaranda



Fuente F4-Molino del petcoke



*Nota.* Fuente: Fotografías de propiedad de la Industria

### 5.2.3 Altura de las fuentes

La altura representativa de cada una de las fuentes sonoras se muestra en la Tabla 15.

La altura de cada máquina se determinó con base en las cotas de ubicación de cada máquina según se observa en sitio y verificado con los planos según lo construido.

Tabla 15- altura de las fuentes sonoras

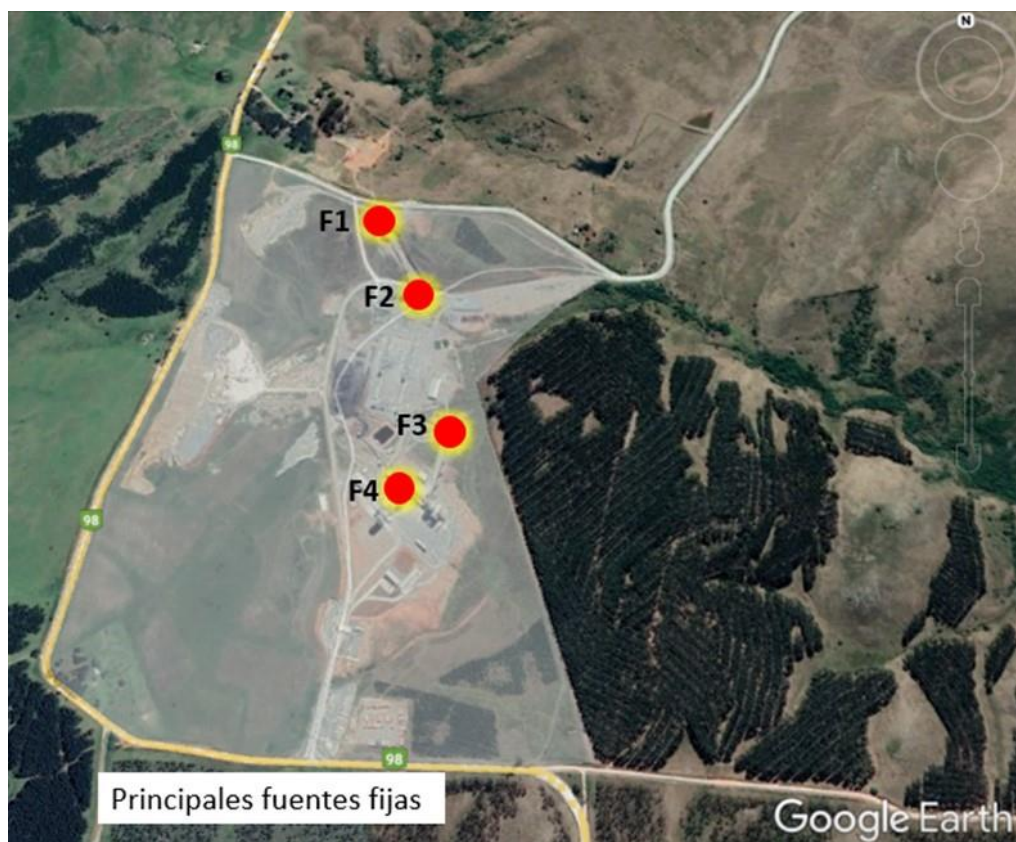
Identificación	Altura de la fuente $h_f$ (m)
F1	5,9
F2	17,0
F3	8,6
F4	3,6

### 5.2.4 Localización de las fuentes

En la Figura 32 se presenta un esquema de la localización de las fuentes de ruido principales (en color rojo y amarillo) a fin de visualizarlas espacialmente en el área de estudio.

Para efectos del procesamiento de la información, cada una de las fuentes sonoras fue georreferenciada.

Figura 32. Ubicación fuentes sonoras



*Nota.* Fuente. Ilustración sobre imágenes de Google Earth 2021

### 5.3 FUENTES SONORAS MÓVILES

Se identificaron como fuentes móviles principales, la maquinaria y los vehículos livianos y pesados que circulan dentro y fuera del sitio, en el transporte de materia prima (piedra), combustible, producto final (cal), insumos y transporte de personal.

A efectos de la presente investigación, no fue considerada la presencia de vehículos circulando en el exterior del predio ya que estos no son de operación permanente, la ruta que bordea el predio no es muy transitada y fue posible identificar la presencia de vehículos para no incluirlos en las mediciones. En cuanto a la maquinaria interna de operación industrial, como pala cargadora, montacargas, su aporte está considerado en las mediciones si es que estaban operando en el momento de realizar las mediciones.

### 5.4 RUIDO DE FONDO

En este estudio se considera como ruido de fondo aquel que es capaz de generarse cuando las fuentes principales se encuentran apagadas. Incluye la operación de equipamiento de menor porte que puede funcionar independiente de las fuentes principales, el ruido generado por la presencia de personal, y el ruido de la naturaleza. Este último corresponde al sonido generado por la fauna propia del lugar como aves, grillos, ranas, etc., que fueron identificadas y que son normales por tratarse de una industria ubicada en un medio rural.

### 5.5 RECEPTORES Y PUNTOS DE CONTROL

Los puntos definidos como receptores están ubicados dentro del predio industrial, en el perímetro del mismo.

#### 5.5.1 Descripción de los receptores

Son identificados como R1 y R2. Se cuenta además con puntos de control identificados como P1, P2, P3 y P4 y están ubicados antes y después de la barrera de árboles B2 con las características que se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16- Receptores y puntos de control

Identificación	Descripción
R1	Ubicado en sur oeste del predio. Está separado de las fuentes F1 y F2 por tres cortinas de árboles y está separado de las fuentes F3 y F4 por una cortina de árboles. Este conjunto de cortinas conforma la barrera 1-B1 Este punto está a 82 m de una vivienda que es habitada de manera temporal.
R2	Ubicado en el este del predio, es el punto más cercano a la infraestructura de producción y a las fuentes sonoras: F3 y F4. No tiene ningún tipo de cortina de árboles en el camino y tampoco tiene ninguna vivienda cerca.
P1	Punto ubicado antes de la cortina de árboles B2
P2	Punto ubicado después de la cortina de árboles B2

Identificación	Descripción
P3	Punto ubicado antes de la cortina de árboles B2
P4	Punto ubicado después de la cortina de árboles B2
P5	Punto ubicado a 131 m de la Fuente F1. Se utiliza para determinar el tipo de propagación de esta fuente

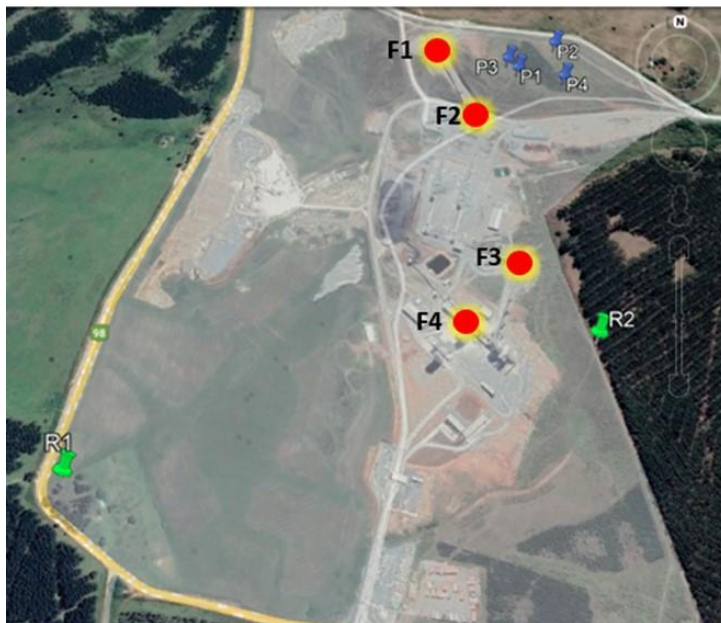
### 5.5.2 Altura de los receptores

La altura de los receptores corresponde a 1,5 m, que es la altura del sonómetro a la cual se realizaron las mediciones en cada punto.

### 5.5.3 Ubicación de los receptores

En la Figura 33 se muestra la ubicación de los receptores y los puntos de control en relación a la ubicación de las fuentes sonoras. A efectos del manejo de la información, cada punto de medición ha sido georreferenciado.

Figura 33. Ubicación de receptores y puntos de control

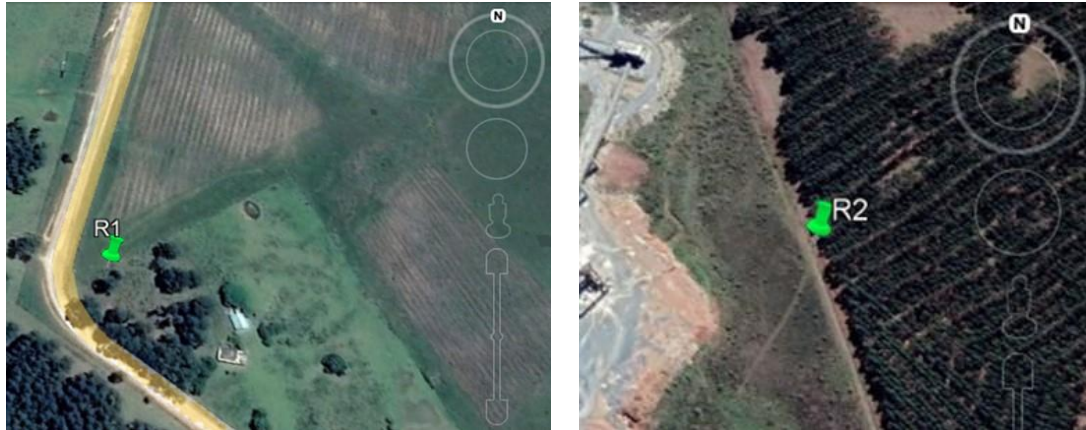


*Nota.* Fuente. Ilustración sobre imágenes de Google Earth

En la Figura 34 se presenta una ilustración más detallada de cada uno de los receptores R1 y R2 y en la Figura 35, la ubicación de los puntos de control de la barrera de árboles 2.



Figura 34. Receptores R1 y R2



Nota. Fuente: Ilustración sobre imágenes de Google Earth 2021

Figura 35. Puntos de control Barrera 2



Nota. Fuente: Ilustración sobre imágenes de Google Earth 2021

## 5.6 DESCRIPCIÓN DE LA VEGETACIÓN

La vegetación del presente estudio está conformada por una serie de cortinas de árboles de la especie *Eucalyptus dunnii*, que fueron plantadas en el año 2016 en el perímetro del predio industrial principalmente y cuyo objetivo fue mitigar el impacto sobre el paisaje de la inserción de la industria en un medio rural.

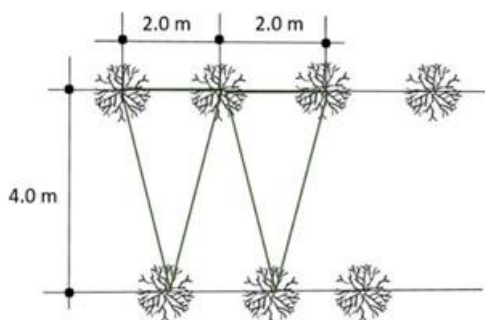
Las características más importantes de esta vegetación se presentan a continuación.

### 5.6.1 Configuración de la plantación

La plantación se hizo en una distribución triangular uniforme de 2,0 m entre individuos y 4,0 m entre filas de árboles aproximadamente con una orientación del laboreo perpendicular a la pendiente del terreno para evitar la erosión, como se muestra en la Figura 36.

Se sembraron aproximadamente 17.000 plantas de *Eucalyptus dunnii* en una superficie total efectiva de 17,03 ha, con un promedio de 1.000 individuos por ha.

Figura 36. Tipo de plantación triangular uniforme



Nota. Ilustración sin escala

La Plantación no cuenta con mantenimiento periódico referido a poda o raleo en la parte inferior, por lo cual las ramas que caen y la maleza del sitio generan que la masa arbórea sea más densa y se obstruya la visual a través de cada área sembrada.

### 5.6.2 Barreras de interés

La masa de árboles no es totalmente homogénea, en el sentido estricto de la palabra dado que nunca un árbol será idéntico a otro, ni es posible garantizar la distancia entre ellos con exactitud a pesar de tener una única configuración de plantación (4 x 2 m), pero al tratarse de una misma especie sembrada en un mismo momento, con la misma técnica , y que a través de ella no se

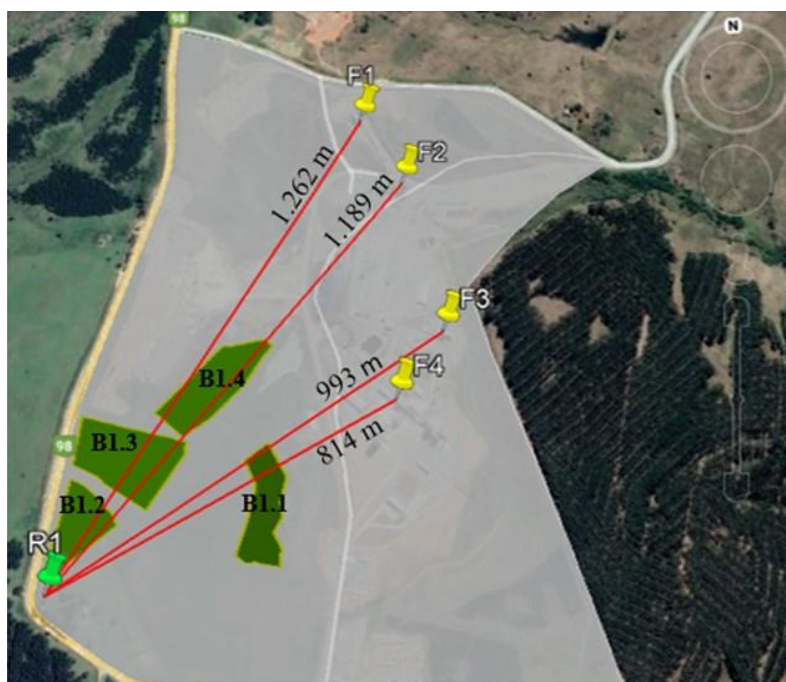
tiene visibilidad, para efectos de la investigación se asume que el conjunto es uniforme y por ello, las cortinas de árboles son consideradas como barreras vegetales.

Las cortinas de árboles de interés en este estudio se han denominado como Barrera 1 y Barrera 2. La descripción de cada una de ellas se presenta a continuación.

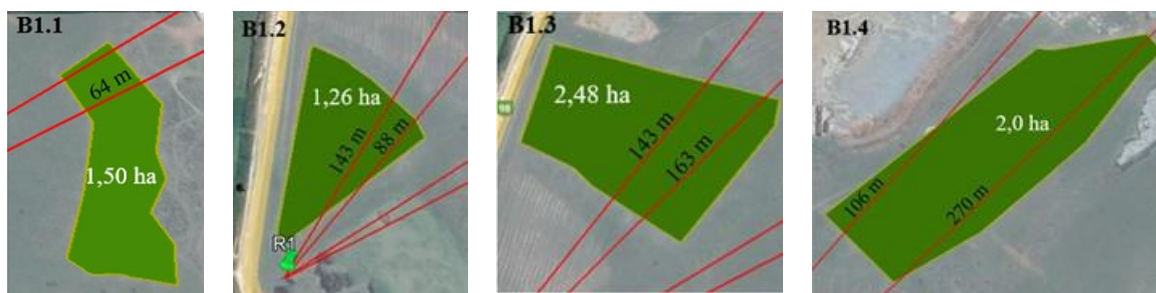
### 5.6.2.1 Barrera 1

Se ha denominado como Barrera 1 a un conjunto de cortinas de árboles interpuestas entre las fuentes sonoras y el receptor R1. En la Figura 37 se presenta la ubicación de estas cortinas de árboles con algunos datos de interés, como son las fuentes y las distancias al punto receptor.

Figura 37. Barrera 1



*Nota:* Las distancias mostradas son las existentes entre fuentes y receptores



*Nota.* Las distancias que aparecen en estas ilustraciones corresponden a las distancias a través de la vegetación en el camino de propagación directa de cada fuente a R1

Fuente: Ilustraciones sobre imágenes del Google Earth 2021

En la Figura 38 se presentan algunas fotografías de las cortinas de árboles que conforman la Barrera 1 desde diferentes puntos de observación.



Figura 38. Cortinas de árboles - barrera 1



Vista desde la fuente F1 hacia R1



Vista desde la fuente F2 hacia R1



Vista desde la zona de la fuente F4 hacia R1

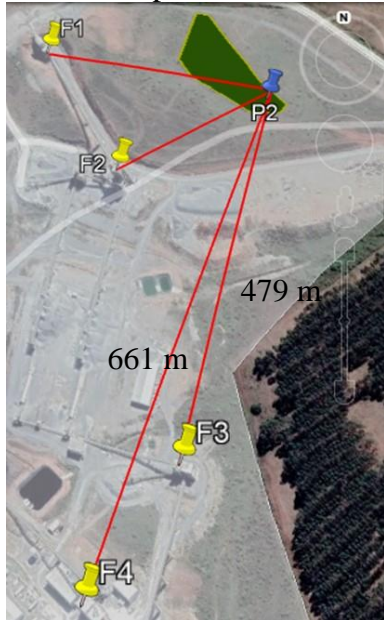
### 5.6.2.2 Barrera 2

La barrera 2 es una sola cortina de árboles ubicada al noreste del predio. En la Figura 39 se presentan sus principales características.

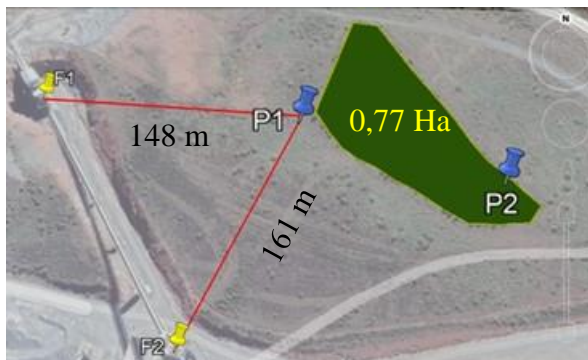
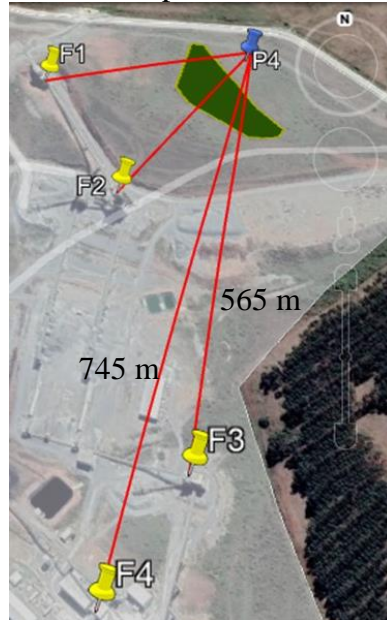


Figura 39. Barrera 2

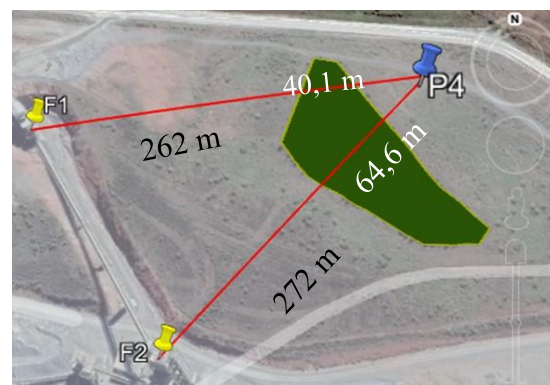
Punto P2 después de la barrera 2



Punto P4 después de la barrera 2



*Nota.* Las distancias que aparecen en blanco corresponden al tramo recorrido a través de la vegetación en el camino de las fuentes sonoras más cercanas (F1 y F2) hacia P2



*Nota.* Las distancias que aparecen en blanco corresponden al tramo recorrido a través de la vegetación en el camino de las fuentes sonoras más cercanas (F1 y F2) hacia P4  
 Fuente. Ilustraciones sobre imágenes del Google Earth 2021

En la Figura 40 se aprecian fotografías de la barrera 2, tomadas desde distintos puntos.

Figura 40. Fotografía Barrera 2



Nota. Vista desde la fuente F2



Nota. Vista desde una zona cercana a la fuente F1

### 5.6.3 Especie

Se trata de *Eucalyptus dunnii*, una especie cuyas condiciones de adaptación requieren climas tropicales a subtropicales con precipitaciones superiores a los 950 mm anuales, con nulo a escaso déficit hídrico. No obstante, es más resistente al frío que otras especies, lo cual le genera una ventaja porque es posible cultivarlo en zonas donde las temperaturas mínimas descienden hasta  $-7^{\circ}\text{C}$ .

Se plantó esta especie porque el objetivo era lograr una transición visual entre el paisaje existente en sitio y la industria instalada, y es la especie que predomina en el área circundante.

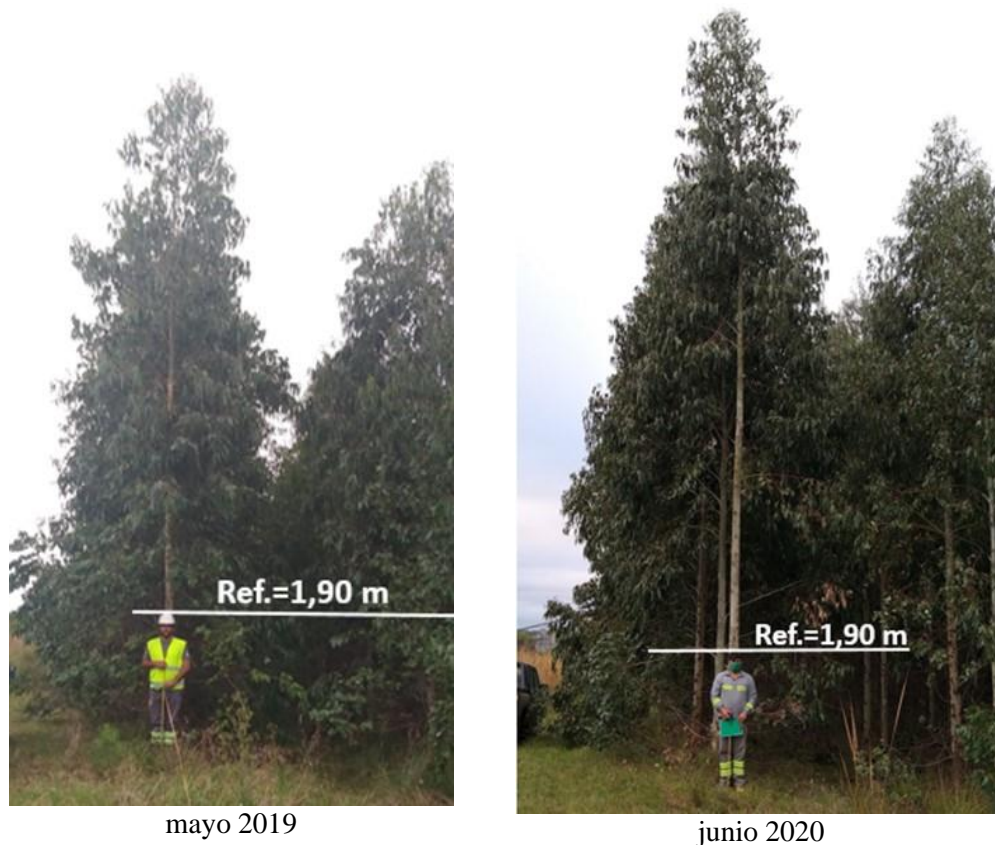
Por un tema de paisajismo, en algunos sectores junto con las cortinas de *Eucalyptus dunnii* fueron plantadas cortinas de otra especie llamada *Eucalyptus cinerea*. Estas cortinas de *cinerea* son de altura y profundidad mucho menor que las de *Eucalyptus dunnii*, están ubicadas más hacia el interior del predio por lo cual desde el punto de vista de su función como barrera acústica no fueron tenidas en cuenta en la investigación.



### 5.6.4 Características morfológicas

El *Eucalyptus dunnii* es un árbol de fuste recto, follaje denso y péndulo como se muestra en la Figura 41.

Figura 41. Vegetación estudiada



*Nota.* Fuente: fotos de propiedad de la industria

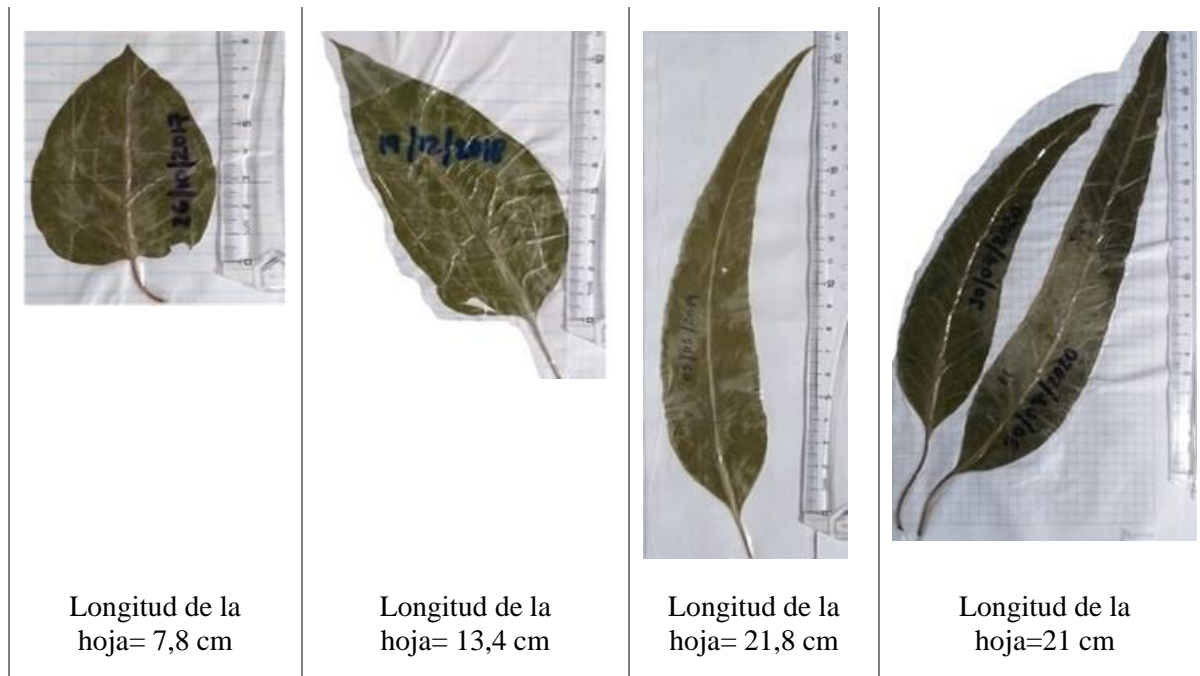
Las características morfológicas a las cuales se le hizo seguimiento son: las hojas y el tronco de los árboles, las cuales se describen a continuación.

#### 5.6.4.1 Hojas

El *Eucalyptus dunnii* posee hojas juveniles ovales o elípticas de base muchas veces cordada; intermedias de hasta 30 cm de largo (Brussa, 1994). Del seguimiento realizado se observa que las hojas son semi redondeadas en su inicio y, con el paso del tiempo, se agrandan y toman forma alargada.

En la Figura 42 se presentan algunas fotografías de las hojas de la plantación.

Figura 42. Hojas



*Nota.* Fuente: fotos propiedad de la industria

#### 5.6.4.2 Troncos

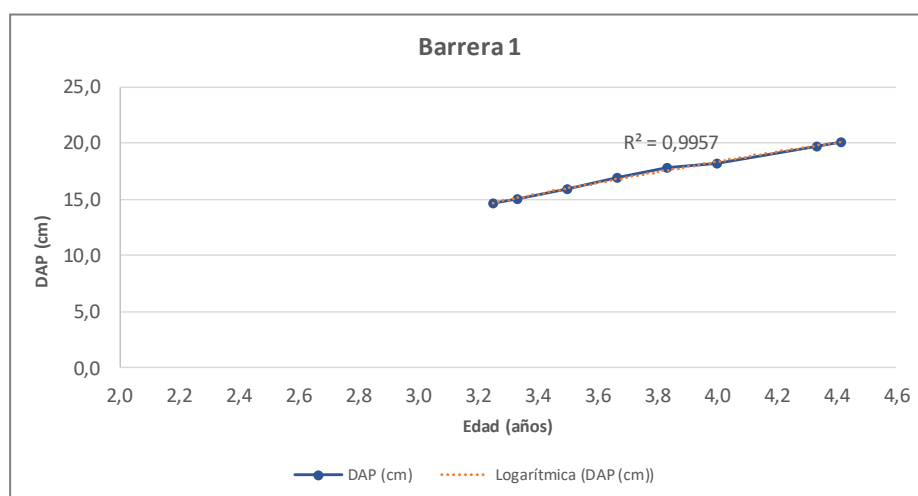
Como característica distintiva posee una corteza lisa en casi todo el tronco.

Para caracterizar los troncos de los árboles se hicieron mediciones del perímetro y a partir de este dato se calculó el diámetro de cada tronco. Las mediciones se hicieron a 1,30 m, que se conoce como diámetro a la altura del pecho (DAP).

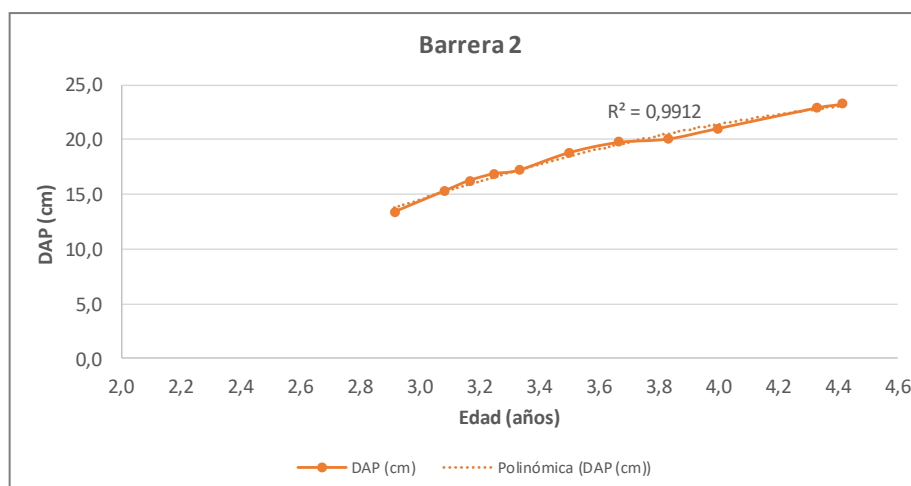
Los resultados de los DAP obtenidos se muestran en la Figura 43.

Figura 43. DAP

edad (años)	DAP (cm)
3,3	14,6
3,3	15,0
3,5	15,9
3,7	16,9
3,8	17,8
4,0	18,1
4,3	19,7
4,4	20,1



edad (años)	DAP (cm)
2,9	13,4
3,1	15,3
3,2	16,2
3,3	16,9
3,3	17,2
3,5	18,8
3,7	19,7
3,8	20,1
4,0	21,0
4,3	22,9
4,4	23,2



### 5.6.5 Edad de la vegetación

La Plantación se realizó en marzo de 2016, por lo cual, en el período de las mediciones de ruido (2019-2021), los árboles tenían entre 3 y 5 años de crecimiento.

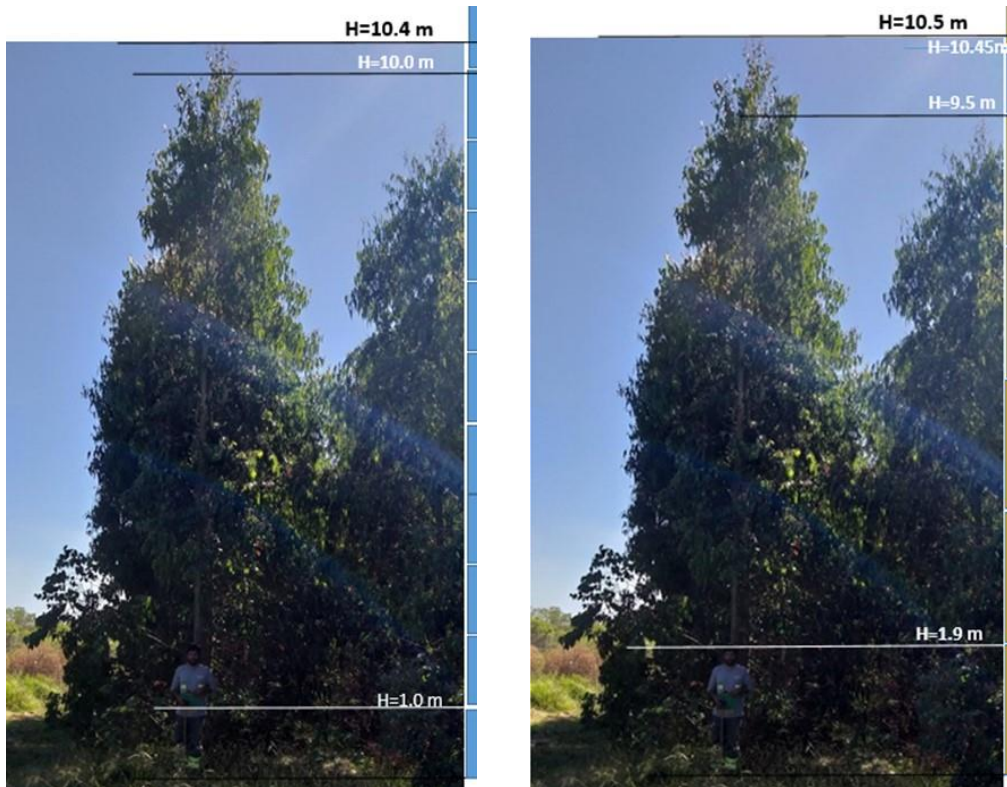
### 5.6.6 Altura de los árboles

Todos los árboles fueron plantados en el mismo mes (marzo 2016), por lo cual la altura de todas las cortinas de árboles es muy similar. En cada zona de forestación se encuentran árboles bajos, medianos y altos en función de su posición respecto al área (en el borde, o al interior), a su adaptabilidad al suelo y a la competencia entre ellos.

La medición de la altura de los árboles fue hecha mediante comparación con un elemento de referencia, de una altura fija como se muestra en la Figura 44 y se realizó una medición intermedia en el período de estudio con estación total, actividad realizada por Ingeniero

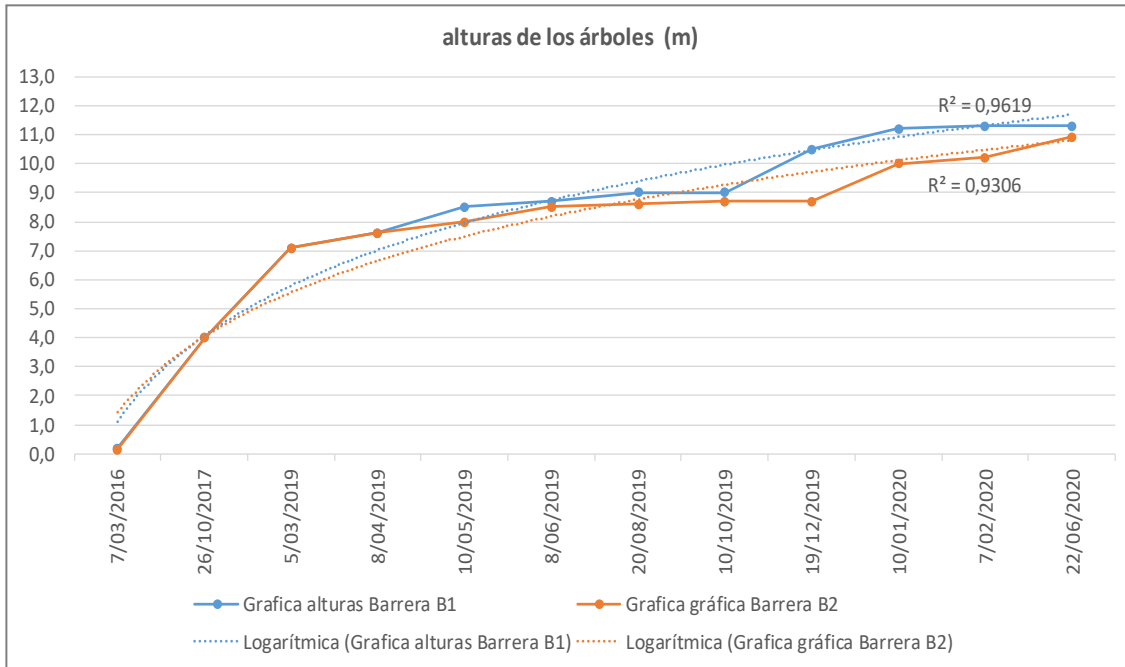
agrimensor. Esta última tuvo la finalidad de verificar que los resultados obtenidos por comparación no difieran de manera significativa de la realidad.

Figura 44. Medición altura de los árboles



*Nota.* Medición realizada el 19/12/2019. Fuente: fotos de propiedad de la industria  
Los resultados fueron tabulados y se realizó la gráfica que se muestra en la Figura 45.

Figura 45. Altura de los árboles



En el año 2019, los árboles de la barrera 1 presentaron una altura promedio de 8,6 m y los árboles de la Barrera 2, 8,2 m de altura. En el año 2020, la barrera 1 presentó una altura promedio de 11,3 m y la Barrera 2, de 10,4 m.



## 6 CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

Se realizaron campañas de medición de los niveles de presión sonora con distintas condiciones de operación de la Industria, y de las condiciones meteorológicas asociadas a cada medición.

### 6.1 MEDICIÓN DE LAS FUENTES SONORAS

El objetivo es determinar el espectro sonoro de cada fuente, a partir del cual se verifica la propagación hacia receptores y puntos de control.

#### 6.1.1 Equipo de medición

Se utilizó un sonómetro Cesva SC-30, capaz de registrar datos como sonómetro y como analizador en bandas de octava. Se trata de un sonómetro integrador promediador de precisión (tipo 1 según norma IEC 60651:01 e IEC 60804:00) cuya calibración se verificó antes y después de cada campaña, empleando un calibrador Cesva CB006 tipo 1 que emite tonos puros de 1.000 Hz a 94 dB.

En todos los casos se utilizó pantalla antiviento y el instrumento fue apoyado sobre un trípode a una altura de 1,50 m para evitar apantallamiento o absorción por parte del cuerpo del operador. En la Figura 46 se aprecia el equipo utilizado.

Figura 46. Equipo de medición niveles de presión sonora



Nota. Vista hacia la fuente sonora F2

#### 6.1.2 Metodología

Las mediciones de las fuentes sonoras se iniciaron en el año 2019. Durante cada campaña de medición de las fuentes sonoras se registró el espectro de frecuencias en bandas de octavas (31,5 a 16.000 Hz) con ponderación Z ( $L_{ZF,eq,1s}$ ).

En cada medición se hizo un registro de los eventos encontrados en campo, y estos fueron incluidos en los Informes de cada campaña.



La información del funcionamiento de las fuentes en el horario de cada medición fue constatada en sitio y verificada con fecha y hora en la planilla del área de producción de la Industria donde se registra la operativa del equipamiento.

La distancia a la cual se hizo la medición de cada una de las fuentes se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17- Distancia medición fuentes sonoras

Fuente	Distancia $r_0$ (m)
F1	25
F2	35
F3	10
F4	12

## 6.2 MEDICION EN RECEPTORES Y PUNTOS DE CONTROL

El objetivo de la medición en los receptores y puntos de control es determinar los niveles de presión sonora en cada uno de ellos y comparar lo realmente medido en sitio con lo teórico esperado aplicando las ecuaciones de propagación.

### 6.2.1 Equipo de medición

El equipo de medición utilizado es el mismo descrito en el ítem 6.1.1 para medición de fuentes sonoras.

### 6.2.2 Metodología

Entre los años 2016 a 2018 se contó con mediciones en los Receptores R1 y R2 con resultados en valores globales, que permiten tener datos de la evolución de los niveles de presión sonora, pero sin el detalle de la contribución en cada una de las bandas de octava. De todas maneras, esta información es válida para analizar la evolución de los niveles de presión sonora en cada punto.

A partir de año 2019 se realizaron las mediciones, registrando los resultados en bandas de octava de 31,5 a 16.000 Hz. En cada medición se registraron los siguientes parámetros:  $L_{Zeq,1s}$ ,  $L_{AFeq,1s}$ ,  $L_{AFmax}$ ,  $L_{AFmin}$

## 6.3 MEDICION DE VARIABLES METEOROLÓGICAS

Las mediciones meteorológicas son necesarias para determinar la absorción atmosférica en la propagación del sonido en exteriores.

### 6.3.1 Equipos de medición

Para determinar los valores de las condiciones meteorológicas en cada punto de medición, se utilizó una estación climática portátil con anemómetro digital marca Speedtech, modelo WindMate 300 y se contó con una estación meteorológica fija como elemento de apoyo,

ubicada en un punto del perímetro de la Industria y que funciona de manera permanente en mediciones de calidad de aire. Esta estación mide de manera continua y registra cada diez minutos, fecha, hora, velocidad del viento (m/s), dirección del viento (grados), Temperatura (°C) y Humedad relativa (%).

La georreferenciación de cada punto se hizo mediante un GPS marca Garmin.

En la Figura 47 se muestran los equipos utilizados.

Figura 47. Equipos de medición meteorología y posicionamiento



### 6.3.2 Metodología

Los resultados de las variables meteorológicas en cada medición fueron incluidos en cada uno de los registros de la actividad. En algunos casos los resultados fueron contrastados con los medidos en la estación de monitoreo continua de calidad de aire que, como ya fuera mencionado, tiene sensores meteorológicos

## 6.4 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Para el presente estudio se cuenta con mediciones realizadas durante varios años y en distintas condiciones de operación de la industria. Estas condiciones de operación fueron registradas en cada una de las mediciones realizadas.

### 6.4.1 Fuente sonora F1

Las mediciones se realizaron a 25 m de la trituradora de mandíbula, la cual se encuentra entre dos taludes de tierra y alejada de otras fuentes de ruido, por lo que esta medición es representativa de la operación de esta trituradora y su equipamiento asociado. Los resultados de las mediciones se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18- Mediciones de F1 a 25 m

Medición	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
F1-01	84,0	85,4	84,8	85,0	83,1	81,1	81,2	74,9	64,3	50,5	86,9
F1-02	85,0	86,0	85,3	84,9	83,2	81,2	81,3	74,6	63,6	49,8	87,0
F1-03	85,9	87,1	85,5	83,6	83,1	81,8	82,2	76,4	66,4	53,6	87,5

### 6.4.2 Fuente sonora F2

Las mediciones para caracterizar la fuente sonora se realizaron a 35 m de la trituradora de cono. En este punto se mide no solo el sonido producido por la Trituradora, sino por una zaranda ubicada en edificio contiguo, y otro equipamiento, que no es posible medir de manera independiente porque operan de manera simultánea. Adicionalmente al sitio llegaría sonido proveniente de las Fuentes F3 y F4 ubicadas a 373 y 535 m respectivamente, por lo cual, para obtener el espectro de solo F2 es necesario restar la contribución de las fuentes F3 y F4.

Los resultados de la medición en este punto, cerca de la trituradora 2 se presentan en la Tabla 19 y son representativos del sonido que llega a esta área.

Tabla 19- Mediciones de F2 a 35 m

Ref.	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
F2-01	79,3	80,4	78,1	78,1	79,0	80,0	83,5	82,0	70,3	57,7	88,1
F2-02	78,0	78,6	77,1	79,7	81,2	82,9	87,3	84,5	73,4	54,9	91,3
F2-03	75,8	77,7	75,9	77,8	78,5	78,6	81,5	79,2	70,2	56,9	86,2
F2-04*	78,6	77,9	75,5	76,7	76,6	78,0	80,9	77,9	67,3	52,7	85,3

Nota. (\*) El día de esta medición solo funcionaban las Fuentes F1 y F2. No se tiene aporte de F3, ni F4.

### 6.4.3 Fuente sonora F3

Las mediciones se realizaron a 10 m del edificio donde se encuentra instalada la zaranda vibratoria. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20- Mediciones de F3 a 10 m

Ref.	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
F3-01	78,1	75,9	71,2	73,8	74,7	76,6	78,5	75,7	67,2	54,5	83,2
F3-02	72,9	70,0	69,4	73,6	75,8	76,9	79,3	77,2	69,3	54,5	84,1
F3-03	72,7	70,8	68,0	70,6	74,8	75,4	77,6	76,4	69,4	57,6	82,8

#### 6.4.4 Fuente sonora F4

Las mediciones se realizaron a 12 m del edificio donde se encuentra instalado el molino. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21- Mediciones de F4 a 12 m

Ref.	Frecuencia (Hz) y $L_{Z\ eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
F4-01	78,8	81,6	76,1	75,0	76,4	77,3	79,1	77,3	69,2	55,1	84,2
F4-02	76,2	81,5	73,4	74,2	77,4	79,1	79,1	75,5	65,6	49,5	84,3
F4-03	75,7	81,0	74,7	75,1	78,6	80,2	80,7	77,3	66,8	49,8	85,7

Se deber tener en cuenta que la medición realizada a 12 m del molino incluye otro equipamiento ubicado en la misma área, como el molino del producto terminado, motores de cintas entre otros, pero esta medición se considera representativa de la zona de producción.

Los resultados de las mediciones en los receptores y puntos de control se presentan a continuación.

#### 6.4.5 Receptor R1

Los resultados de las mediciones en R1 se presentan para tres condiciones operativas: con todas las fuentes funcionando (F1+F2+F3+F4), con solo las fuentes más cercanas funcionando (F3+F4) y con solo las fuentes lejanas funcionando (F1+F2).

##### 6.4.5.1 Mediciones en R1 (F1+F2+F3+F4)

Se presentan los resultados de las mediciones de R1 en dos partes: la parte 1 incluye mediciones hasta 2018 donde se tienen resultados en banda ancha y que se muestran en la Tabla 22 y la parte 2, que corresponde a mediciones a partir de 2019 cuyos resultados se tienen en bandas de octava, según se muestra en la Tabla 23.

Tabla 22- Mediciones en R1 parte 1 (F1+F2+F3+F4)

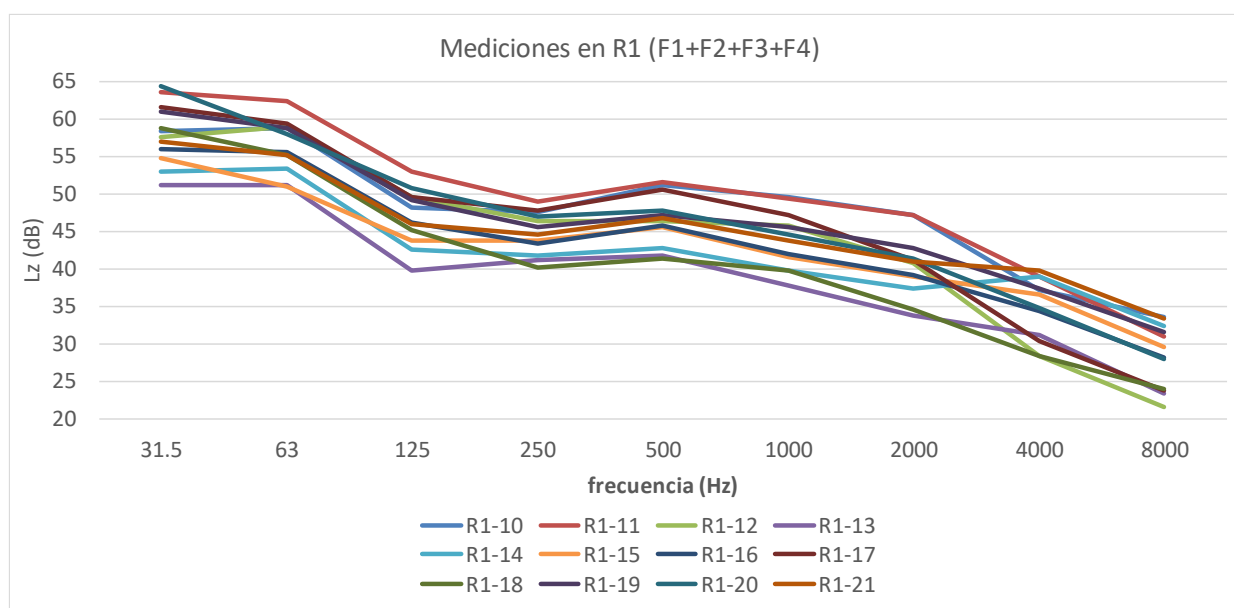
Medición	$L_{Aeq}$ (dB)	Medición	$L_{Aeq}$ (dB)	Medición	$L_{Aeq}$ (dB)
R1-01	48,1	R1-04	53,2	R1-07	50,2
R1-02	52,4	R1-05	55,0	R1-08	50,3
R1-03	54,7	R1-06	52,6	R1-09	51,1

Tabla 23- Mediciones en R1 parte 2 (F1+F2+F3+F4)

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z,eq</sub> (dB)										L <sub>Aeq</sub> (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R1-10	26,3	50,2	58,4	58,7	48,1	47,5	51,1	49,5	47,1	37,2	33,5	30,2	53,8
R1-11	15,9	91,2	63,5	62,3	52,9	48,9	51,5	49,4	47,1	38,9	31,0	23,5	54,0
R1-12	22,7	34,5	57,6	59,0	49,6	46,4	46,3	45,8	40,8	28,4	21,6	17,1	49,3
R1-13	36,8	31,8	51,2	51,2	39,7	41,1	41,8	37,7	33,7	31,1	23,3	30,3	43,1
R1-14	33,6	45,6	53,0	53,3	42,6	41,8	42,7	39,7	37,4	39,0	32,4	38,6	46,2
R1-15	36,9	41,8	54,8	51,0	43,7	43,7	45,5	41,6	39,0	36,5	29,6	21,7	47,2
R1-16	21,2	80,1	55,9	55,5	46,1	43,4	45,8	41,9	39,1	34,3	28,1	20,1	47,3
R1-17	19,6	57,0	61,5	59,3	49,5	47,7	50,5	47,1	41,2	30,4	23,7	17,5	51,4
R1-18	19,6	52,4	58,8	55,1	45,1	40,1	41,3	39,8	34,6	28,4	24,0	17,2	43,8
R1-19	27,0	55,1	60,9	58,7	49,1	45,6	47,1	45,5	42,7	37,4	31,6	23,6	50,1
R1-20	30,7	55,9	64,4	58,0	50,7	46,9	47,7	44,5	41,3	34,7	27,9	20,5	49,5
R1-21	25,5	52,5	57,0	55,1	45,9	44,5	46,8	43,7	41,0	39,7	33,4	40,6	49,1

La Figura 48 permite observar el comportamiento del espectro en R1 a través de las mediciones realizadas en bandas de octava.

Figura 48. Mediciones en R1-todas las fuentes



#### 6.4.5.2 Mediciones en R1 (F3+F4)

Se hicieron mediciones en R1 en períodos de tiempo en los cuales solo estaban operativas las fuentes más cercanas F3 y F4. En la Tabla 24 se presentan los resultados hasta el 2018 y en la Tabla 25 se presentan las mediciones con sus registros en bandas de octava a partir de 2019.

Tabla 24- Mediciones en R1 parte 1 (F3+F4)

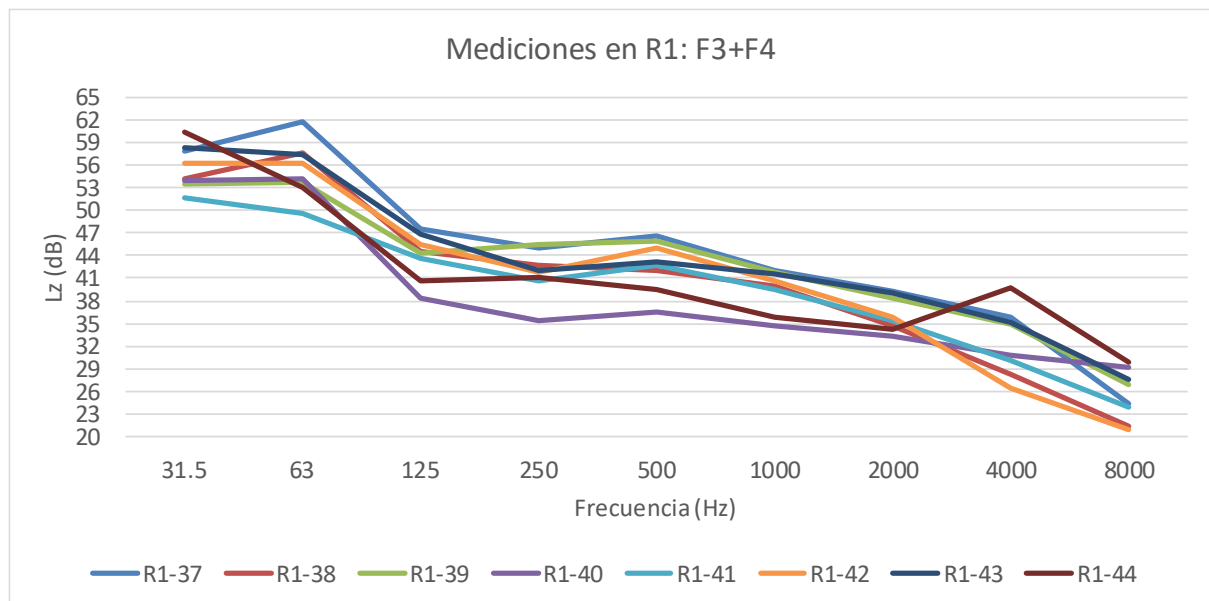
Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)	Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)	Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)
R1-22	48,2	R1-27	52,2	R1-32	47,9
R1-23	47,1	R1-28	48,8	R1-33	52,9
R1-24	49,2	R1-29	49,2	R1-34	49,8
R1-25	50,0	R1-30	52,0	R1-35	54,8
R1-26	47,2	R1-31	46,8	R1-36	47,5

Tabla 25- Mediciones en R1 parte 2 (F3+F4)

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z eq</sub> (dB)										L <sub>Aeq</sub> (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R1-37	15,0	91,3	57,9	61,8	47,6	45,1	46,6	42,0	39,3	35,9	24,4	18,0	48,0
R1-38	32,5	30,0	54,1	57,7	44,5	42,7	41,9	39,9	34,6	28,4	21,3	17,5	44,3
R1-39	36,2	35,8	53,4	53,8	44,3	45,5	46,0	41,8	38,3	34,9	26,8	19,3	47,3
R1-40	32,7	46,0	54,0	54,3	38,4	35,5	36,5	34,7	33,3	30,8	29,2	26,9	40,6
R1-41	12,6	73,4	51,6	49,7	43,6	40,7	42,7	39,5	35,4	30,2	23,8	17,1	44,2
R1-42	21,1	47,0	56,3	56,3	45,5	41,7	45,1	40,6	35,8	26,4	20,9	17,3	45,6
R1-43	24,5	57,2	58,3	57,3	46,8	42,0	43,2	41,6	39,1	35,1	27,6	20,5	46,5
R1-44	21,2	62,2	60,4	53,0	40,6	41,2	39,5	35,9	34,3	39,7	29,8	29,2	44,3

Los resultados de las mediciones en bandas de octava se muestran de manera gráfica en la Figura 49 a fin de observar el comportamiento del espectro en esta condición operativa.

Figura 49. Mediciones en R1 (F3+F4)



### Medición en R1 (F1+F2)

Se cuenta con una medición en la cual solo se encontraban operativas las fuentes lejanas, F1 y F2. En la Tabla 26 se observan los resultados obtenidos de esta medición.

Tabla 26- Medición en R1 (F1+F2)

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R1-45	13,8	56,7	56,8	52	43,2	38,7	42,2	40,9	37,9	35,7	31,6	23,1	45,6

### 6.4.5.3 Mediciones en R1 (F4)

Se cuenta con una medición en la cual solo se encontraba operativa la fuente F4. En la Tabla 27 se observan los resultados de esta medición.

Tabla 27- Medición en R1 (F4)

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R1-46	20,5	74,9	54,6	52,1	43,5	45,2	45,4	40,5	40,8	38,3	30,9	21,4	47,7

### Mediciones en R1 sin fuentes operativas

Se cuenta con una medición en R1 en la cual no se encontraban operando las fuentes sonoras. La planta industrial se encontraba en parada. En la Tabla 28 se observan los resultados de esta medición

Tabla 28- Medición en R1 sin fuentes operando.

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R1-47	13,7	76	50,7	49,4	41,7	35,0	35,4	34,9	30,9	32,0	24,0	18,4	39,8

### 6.4.6 Receptor R2

El punto R2 es el punto más cercano a la zona de producción de la Industria. No tiene cortinas de árboles que lo separen de las fuentes, por lo cual es un punto importante que permite verificar si existe algún cambio en las fuentes sonoras a través del tiempo y que repercutan en los NPS en los puntos receptores.

#### 6.4.6.1 Mediciones en R2 (F1+F2+F3+F4)

Las mediciones hasta 2018 con resultados en escala de ponderación A, se muestran en la Tabla 29 y las mediciones a partir de 2019, con el aporte en bandas de octava, se presentan en la Tabla 30.

Tabla 29- Mediciones en R2 parte 1 (F1+F2+F3+F4)

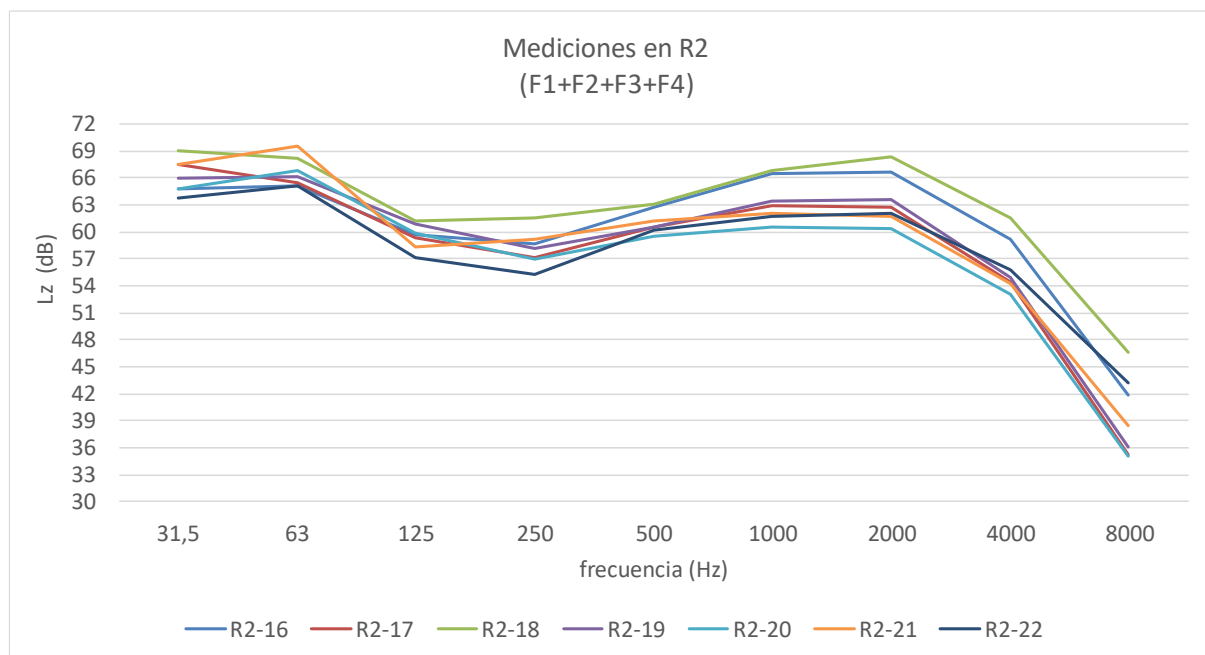
Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)	Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)	Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)
R2-01	64,8	R2-06	68,3	R2-11	65,8
R2-02	65,1	R2-07	64,8	R2-12	68,8
R2-03	67,6	R2-08	68,1	R2-13	76,3
R2-04	68,9	R2-09	74,1	R2-14	72,3
R2-05	67,5	R2-10	66,8	R2-15	63,4

Tabla 30- Mediciones en R2 parte 2 (F1+F2+F3+F4)

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z,eq</sub> (dB)										L <sub>Aeq</sub> (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R2-16	30,6	40,2	64,8	65,1	59,7	58,6	62,8	66,5	66,7	59,1	41,9	27,7	71,1
R2-17	28,2	37,6	67,5	65,4	59,4	57,1	60,6	62,9	62,8	54,5	35,2	26,4	67,4
R2-18	17,7	84,0	69,1	68,1	61,2	61,5	63,0	66,9	68,3	61,6	46,6	24,0	72,2
R2-19	23,8	34,8	65,9	66,2	60,8	58,2	60,6	63,5	63,6	54,9	36,1	19,5	68,0
R2-20	32,7	33,7	64,8	66,8	59,8	57,0	59,6	60,6	60,3	53,0	35,0	19,6	65,3
R2-21	37,0	26,3	67,5	69,5	58,3	59,2	61,2	62,0	61,7	54,3	38,5	23,1	66,7
R2-22	34,9	35,7	63,8	65,2	57,1	55,3	60,2	61,7	62,0	55,8	43,2	42,1	66,7

La Figura 50 permite observar el espectro de R2 a través de las mediciones realizadas en bandas de octava cuando todas las fuentes estaban operando.

Figura 50. Mediciones en R2 (F1+F2+F3+F4)





### 6.4.6.2 Mediciones en R2 (F3+F4)

Se hicieron mediciones en períodos de tiempo en los cuales solo estaban operando las fuentes sonoras F3 y F4.

Las mediciones hasta 2018 se muestran en la Tabla 31 y las mediciones a partir de 2019, con el registro del aporte en bandas de octava, se presentan en la Tabla 32.

Tabla 31- Mediciones en R2 parte 1 (F3+F4)

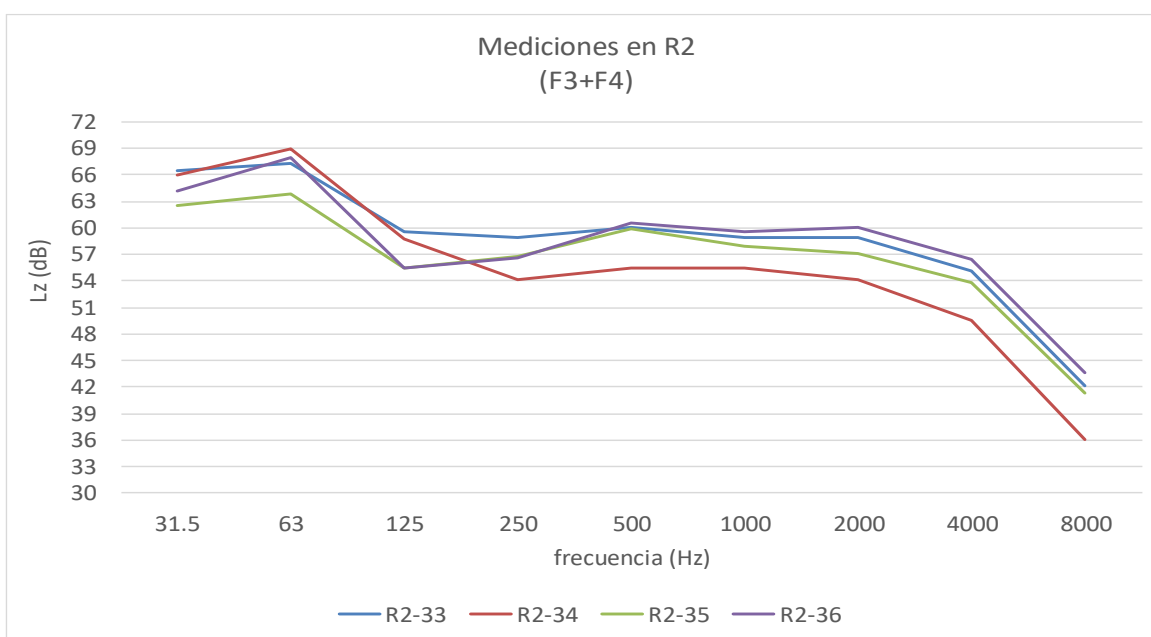
Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)	Medición	L <sub>Aeq</sub> (dB)
R2-23	61,0	R2-28	57,7
R2-24	60,5	R2-29	65,0
R2-25	59,2	R2-30	60,7
R2-26	58,0	R2-31	62,6
R2-27	61,1	R2-32	62,6

Tabla 32- Mediciones en R2 parte 2 (F3+F4)

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z,eq</sub> (dB)										L <sub>Aeq</sub> (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R2-33	16,3	87,5	66,5	67,3	59,6	58,9	60,0	58,9	58,9	55,2	42,2	22,0	64,5
R2-34	25,7	53,0	66,0	68,9	58,7	54,2	55,4	55,4	54,2	49,5	36,1	22,2	60,2
R2-35	28,6	54,5	62,6	63,8	55,5	56,7	59,9	57,9	57,1	53,8	41,3	20,2	63,3
R2-36	37,9	42,2	64,2	68,0	55,4	56,6	60,5	59,5	60,0	56,4	43,6	27,8	65,3

En la Figura 51 se observa el espectro de R2 a través de las mediciones realizadas en bandas de octava cuando solo operan las fuentes F3 y F4 (sin trituración).

Figura 51. Mediciones en R2 (F3+F4)



Se cuenta con una medición en R2 mientras estaban operativas F3+F4 y en un momento de la medición se apaga la fuente F3. Esta medición fue separada en dos partes y los resultados se presentan en la Tabla 33. Estas mediciones se utilizarán para el chequeo de la propagación de la fuente F3 hasta R2 en una distancia de 227 m.

Tabla 33- Mediciones en R2 (F3+F4 y F4)

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
R2-37 (F3+F4)	29,2	48,7	66,2	67,8	58,4	59,6	61,4	60,1	60,2	56,1	43,3	66,2	65,7
R2-38 (F4)	29,2	48,7	65,9	67,1	58,2	59,2	60,7	57,3	55,1	49,6	37,3	65,9	62,5

#### 6.4.7 Puntos de control P1, P2, P3 y P4

Corresponde a mediciones antes y después de la Barrera 2. La descripción de cada punto se muestra en la Tabla 16 y los resultados de las mediciones se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34- Mediciones en P1, P2, P3 y P4

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
P1-20	16,7	51,0	71,4	71,3	61,2	58,4	64,6	65,0	64,0	57,4	43,1	26,0	69,4
P2-20	16,7	51,0	67,8	68,1	58,2	49,1	54,3	58,7	60,8	52,1	33,9	27,9	64,3
P3-21	29,3	46,2	69,3	66,5	58,8	54,8	59,7	60,4	61,2	55,7	42,1	29,3	65,8
P4-21	29,3	46,2	64,3	60,5	52,5	43,8	49,4	50,4	50,1	40,8	36,2	44,5	55,1

#### 6.4.8 Punto de control P5

El Punto P5 se utilizará para verificar el tipo de propagación de la fuente F1. Está ubicado a 131 m de F1 y a 35 m de la fuente F2. Las mediciones realizadas en este punto si bien están muy cerca de F2 fueron realizadas en períodos de tiempo en los cuales la fuente F2 no estaba operando. Los resultados se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35- Mediciones en P5

Medición	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	
P5-01	24,4	58,9	77,8	74,4	72,1	70,4	68,6	65,7	63,9	59,4	49,0	33,6	71,4
P5-02	22,3	54,1	76,1	73,6	72,2	67,4	66,1	65,2	63,7	58,4	47,8	33,9	70,2

## 7 PROCESAMIENTO DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Partiendo de los resultados de las mediciones realizadas, se analizan los datos con dos objetivos principales:

- Verificar cómo es la evolución de los niveles de presión sonora de la industria a través del tiempo, mediante mediciones en los receptores R2 y R1. El primero es un punto sin barreras y el segundo, es un punto separado de las fuentes sonoras por cortinas de árboles.
- Verificar si existe o no atenuación del sonido por efecto de obstáculos presentes en el camino de la propagación directa, en este caso de cortinas de árboles.

### 7.1 EVOLUCION DE LOS NIVELES DE PRESION SONORA - PUNTO SIN BARRERAS

El punto R2 está ubicado muy cerca de la zona de producción y no cuenta con barreras vegetales que lo separen de la industria.

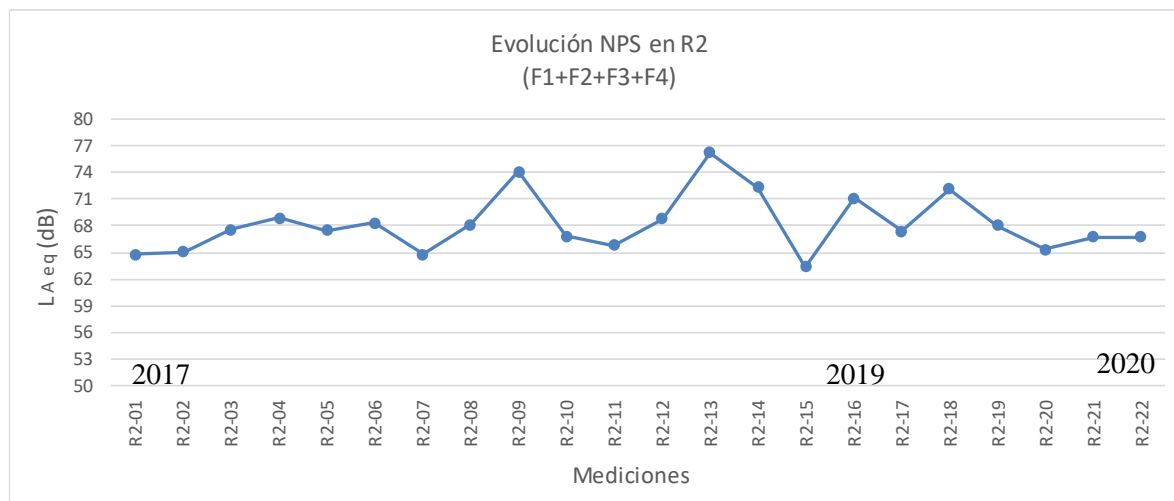
Como fue mencionado en el ítem 6.4.5.3, en este punto se cuenta con dos grupos de mediciones, antes de 2018 con resultados  $L_{Aeq}$  en valores globales y de 2019 con resultados detallados por bandas de octava.

El objetivo de analizar este punto es determinar cómo ha sido la evolución de los niveles de presión sonora en R2 a través del tiempo y en dos condiciones operativas: con todas las fuentes funcionando (F1+F2+F3+F4) y con dos fuentes funcionando (F3+F4), que son las más cercanas al punto R2. Se realiza la curva de permanencia de los dos grupos de mediciones y se verifica con el Test de Wilcoxon si hay diferencias significativas entre este par de grupos de mediciones.

#### 7.1.1 Evolución NPS en R2 con fuentes principales operativas

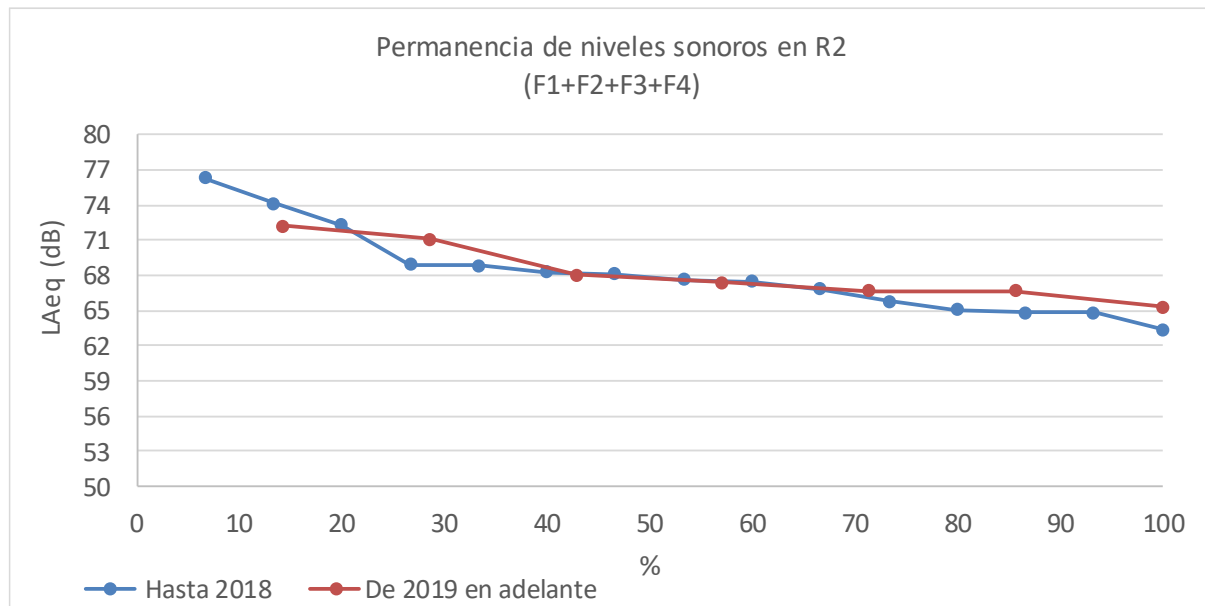
La evolución de los NPS en R2 para las fuentes principales operativas se muestra en la Figura 52.

Figura 52. Evolución NPS en R2- (F1+F2+F3+F4)



Se realizó la curva de permanencia de los niveles sonoros, separándolos en dos tramos: mediciones hasta 2018 y mediciones de 2019 en adelante. Esta división en dos grupos obedece a que solo a partir del 2019 se cuenta con los resultados en bandas de octava. En la Figura 53 se observa la curva de permanencia de los niveles sonoros en R2.

Figura 53. Curva de permanencia R2 con fuentes principales operativas



Para determinar si en los dos grupos de datos, hasta 2018 (Evento 1) y de 2019 en adelante (Evento 2) hay una diferencia en la magnitud de la variable de estudio ( $L_{Aeq}$ ), se realiza la prueba U de Wilcoxon, Mann y Whitney.

En la Tabla 36 se presentan los resultados de la aplicación del test.

Tabla 36- Resultados Test de Wilcoxon, Mann y Whitney- R2

Ordinal	Evento	L <sub>Aeq</sub> (dB)	Rango	suma de rangos (R).
1	1	63,4	1	
2	1	64,8	2,5	
3	1	64,8	2,5	
4	1	65,1	4	
5	1	65,8	6	
6	1	66,8	9	
7	1	67,5	11	
8	1	67,6	12	
9	1	68,1	14	
10	1	68,3	15	
11	1	68,8	16	
12	1	68,9	17	
13	1	72,3	20	
14	1	74,1	21	
15	1	76,3	22	173
16	2	65,3	5	
17	2	66,7	7,5	
18	2	66,7	7,5	
19	2	67,4	10	
20	2	68	13	
21	2	71,1	18	
22	2	72,2	19	80

Ho: Hipótesis nula:  
No existen diferencias significativas en los niveles de presión sonora L<sub>Aeq</sub> entre los dos grupos estudiados

Ha. Hipótesis alternativa.  
Existen diferencias significativas en los niveles de presión sonora L<sub>Aeq</sub> entre los dos grupos estudiados.

evento	Descripción	Cantidad de datos	R
1	<b>m</b>	15	173
2	<b>n</b>	7	80

U1	<b>52</b>
U2	53

El menor valor es 52

El valor crítico de U es **24**. Tomado de la Tabla de valores críticos de U para el test de Wilcoxon, Mann y Whitney para la condición bilateral, con  $\alpha= 0,05$ .

#### Conclusión

Como el valor del estadístico U calculado (52) es mayor que el valor de U de la tabla (24) no se puede rechazar la hipótesis nula.

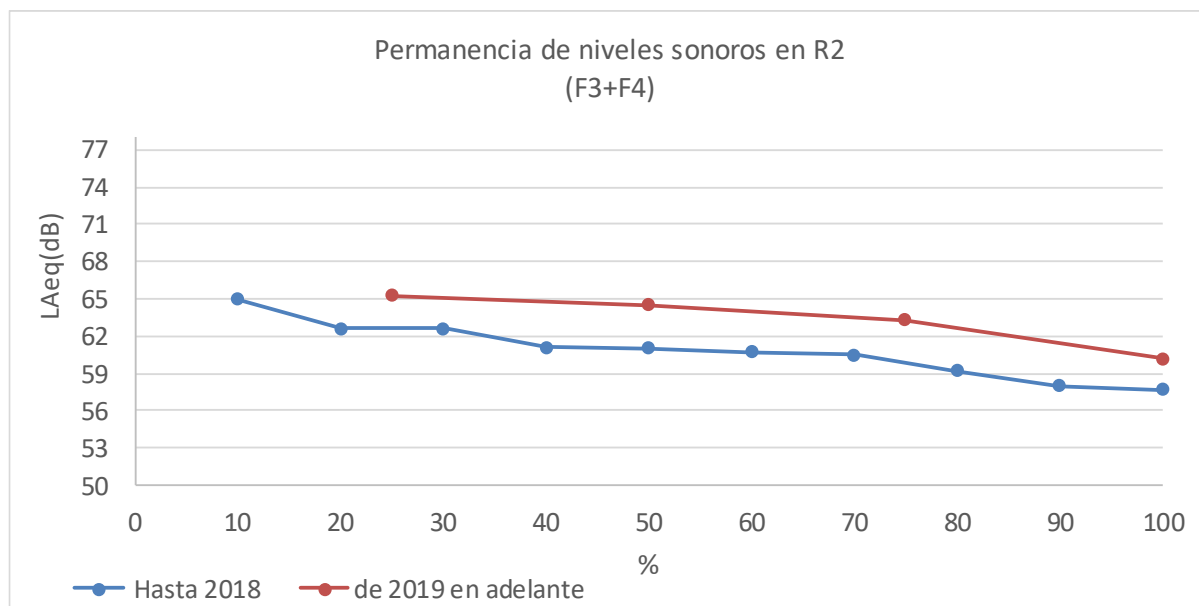
No existen diferencias significativas en los valores medidos de L<sub>Aeq</sub> entre los dos grupos de mediciones, antes de 2019 (evento 1) y después de 2019 (evento 2) en el Punto R2. Lo anterior se corresponde con la realidad. No debería haber diferencias ya que la producción no ha variado y no existen elementos interpuestos entre la Planta y el punto de control R2 que pudieran hacer variar significativamente estas mediciones.

#### Evolución NPS en R2 solo con fuentes cercanas

En la segunda condición operativa solo hay dos fuentes en funcionamiento: F3 y F4, que son las fuentes más próximas a R2. Las fuentes F1 y F2 (tritadoras) se encuentran apagadas.

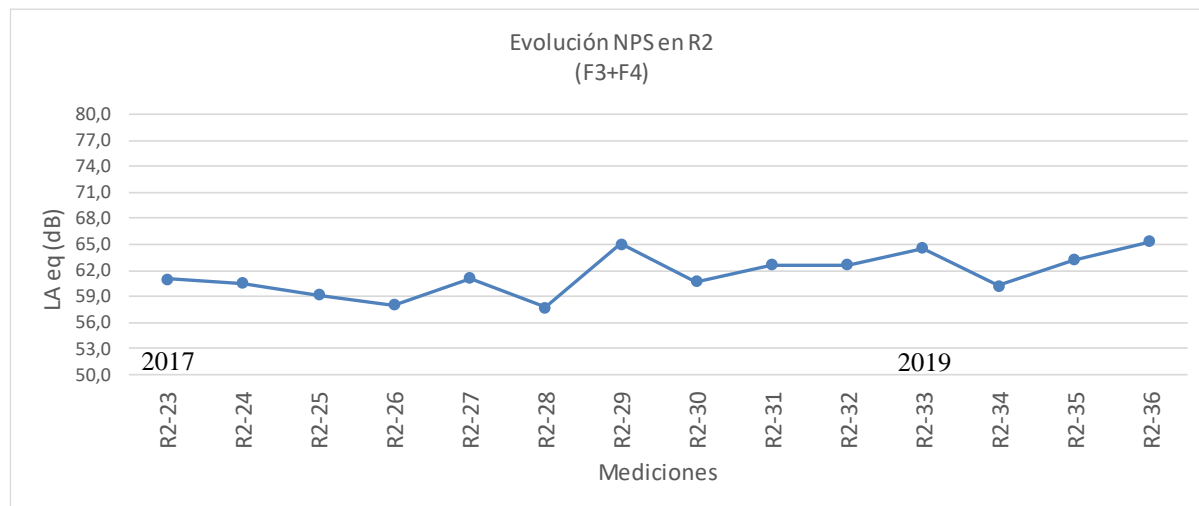
En la Figura 54 se presenta la curva de permanencia en esta condición operativa.

Figura 54. Curva de permanencia en R2: F3+F4



En la Figura 55 se presenta la evolución de los NPS en R2 en esta condición operativa.

Figura 55. Evolución NPS en R2 (F3+F4)



### 7.1.2 Análisis de resultados

Las curvas de permanencia permiten verificar que los datos obtenidos en los dos períodos (hasta 2018 y de 2019 en adelante) son representativos y atienden a un mismo patrón de comportamiento del nivel sonoro en R2 en las dos condiciones operativas estudiadas.

Los niveles de ruido en la industria, no han tenido un cambio significativo a través del tiempo entre 2017 y 2020. Esta situación se evidencia, tanto en las mediciones con todas las fuentes principales operativas, como con las mediciones con solo dos fuentes.

Las mediciones en R2 con todas las fuentes principales operativas, presentan una mediana de 67,6 dB hasta 2018 y de 67,4 dB. de 2019 en adelante de 67,4 dB.

Las mediciones en R2 con solo dos fuentes operativas (F3 y F4) muestran algo similar al caso anterior. En esta condición operativa se obtiene un ligero incremento de los niveles sonoros provenientes de las fuentes F3 y F4 a través del tiempo. Las mediciones presentan una mediana de 60,9 dB hasta 2018 y de 63,9 dB a partir de 2019.

Con base en lo anterior, se concluye que el ruido generado por la operación industrial no ha disminuido en el período de estudio, sino que se ha mantenido relativamente estable, incluso con una tendencia al incremento como se observa en R2 con dos fuentes operativas F3 y F4.

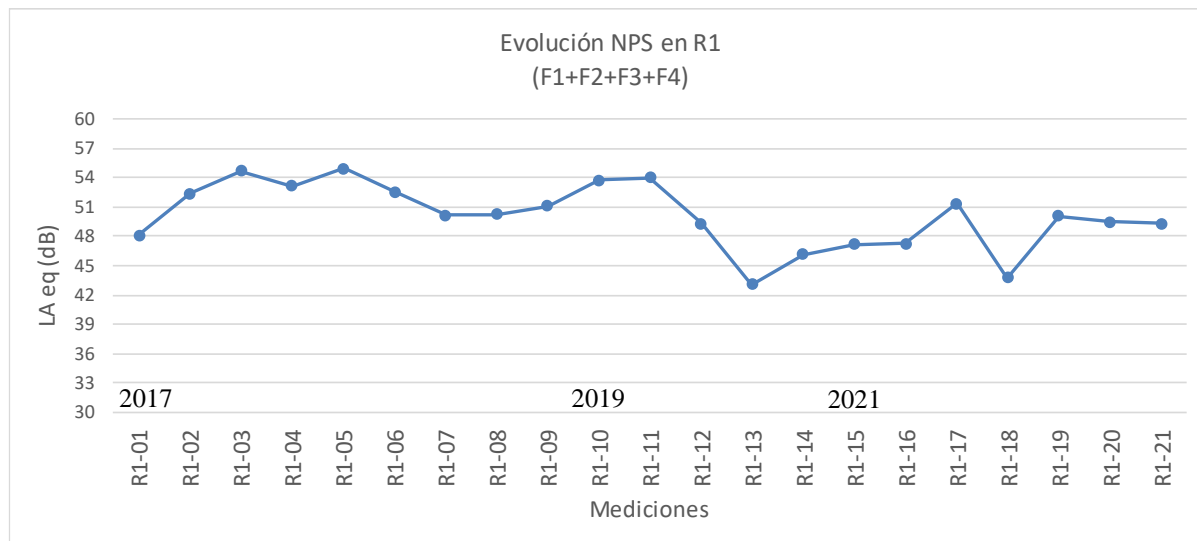
## 7.2 EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES DE PRESION SONORA - PUNTO CON BARRERAS

R1 es el punto de referencia que cuenta con una serie de cortinas de árboles interpuestas entre las fuentes sonoras y el punto. Los resultados de las mediciones para las dos condiciones operativas de interés se presentan a continuación.

### 7.2.1 Evolución NPS en R1 con fuentes principales operativas

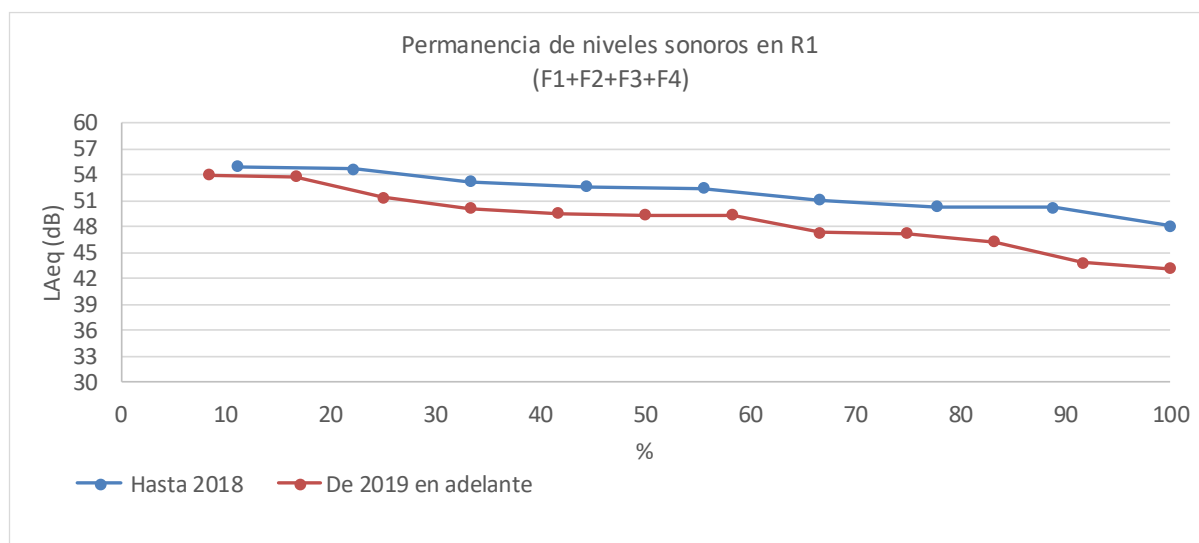
La evolución de los NPS en R1 a través del tiempo y con fuentes sonoras principales operativas se observan en la Figura 56.

Figura 56. Evolución NPS en R1 (F1+F2+F3+F4)



Con base en los resultados obtenidos se realizó la curva de permanencia de los niveles sonoros para los tramos: mediciones hasta 2018 y mediciones de 2019 en adelante. En la Figura 57 se observa la permanencia de los niveles sonoros en R1.

Figura 57. Curva de permanencia R1: F1+F2+F3+F4



Para determinar si en los dos grupos de datos, hasta 2018 (Evento 1) y de 2019 en adelante (Evento 2) hay una diferencia en la magnitud de la variable de estudio ( $L_{Aeq}$ ), se realiza la prueba U de Mann-Whitney.

En la Tabla 37 se presentan los resultados de la aplicación del test.

Tabla 37- Resultados Test de Wilcoxon, Mann y Whitney- R1

Ordinal	Evento	$L_{Aeq}$ (dB)	Rango	suma de rangos (R)
1	1	48,1	6	
2	1	50,2	11	
3	1	50,3	12	
4	1	51,1	13	
5	1	52,4	15	
6	1	52,6	16	
7	1	53,2	17	
8	1	54,7	20	
9	1	55,0	21	131
10	2	43,1	1	
11	2	43,8	2	
12	2	46,2	3	
13	2	47,2	4	
14	2	47,3	5	
15	2	49,3	7,5	
16	2	49,3	7,5	
17	2	49,5	9	
18	2	50,1	10	
19	2	51,4	14	
20	2	53,8	18	
21	2	54	19	100

Ho: Hipótesis nula:

No existen diferencias significativas en los niveles de presión sonora  $L_{Aeq}$  entre los dos grupos estudiados

Ha. Hipótesis alternativa.

Existen diferencias significativas en los niveles de presión sonora  $L_{Aeq}$  entre los dos grupos estudiados.

evento	Descripción	Cantidad de datos	R
1	<b>m</b>	9	131
2	<b>n</b>	12	100

U1	<b>22</b>
U2	86

El menor valor es 22

El valor crítico de U es **26**. Tomado de la Tabla de valores críticos de U para el test de Wilcoxon, Mann y Whitney para la condición bilateral, con  $\alpha = 0,05$ .



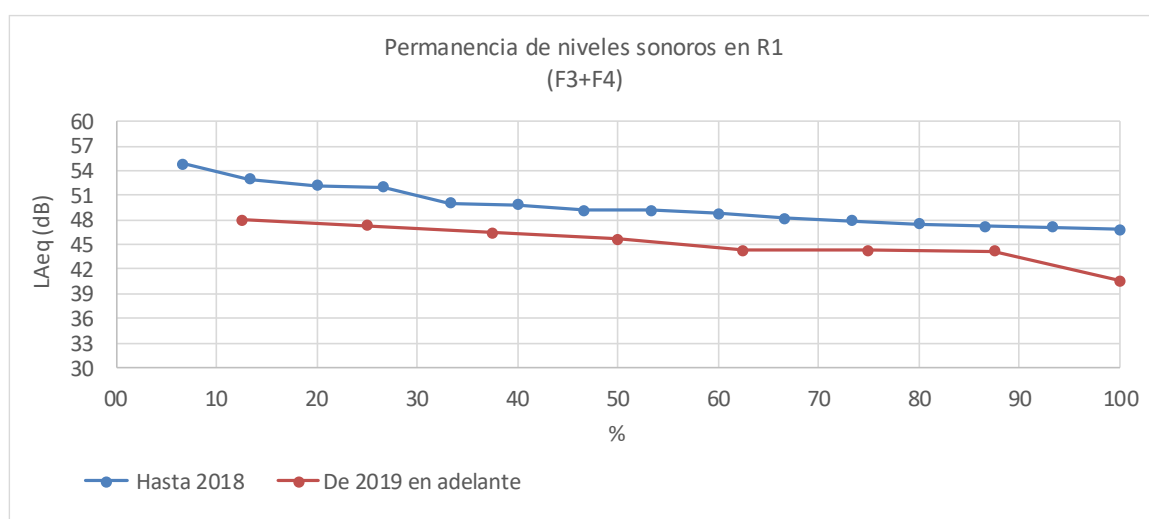
En conclusión, como el valor del estadístico U calculado (22) es menor que el valor de U de la tabla (26) se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Existen diferencias en los valores de los dos grupos de mediciones

Los valores de  $L_{Aeq}$  obtenidos en el evento 2 (después de 2019) son menores que los del evento 1 (antes de 2019). En este caso de estudio, la causa probable es la aparición de la barrera de árboles.

### 7.2.2 Evolución NPS en R1 solo con fuentes cercanas

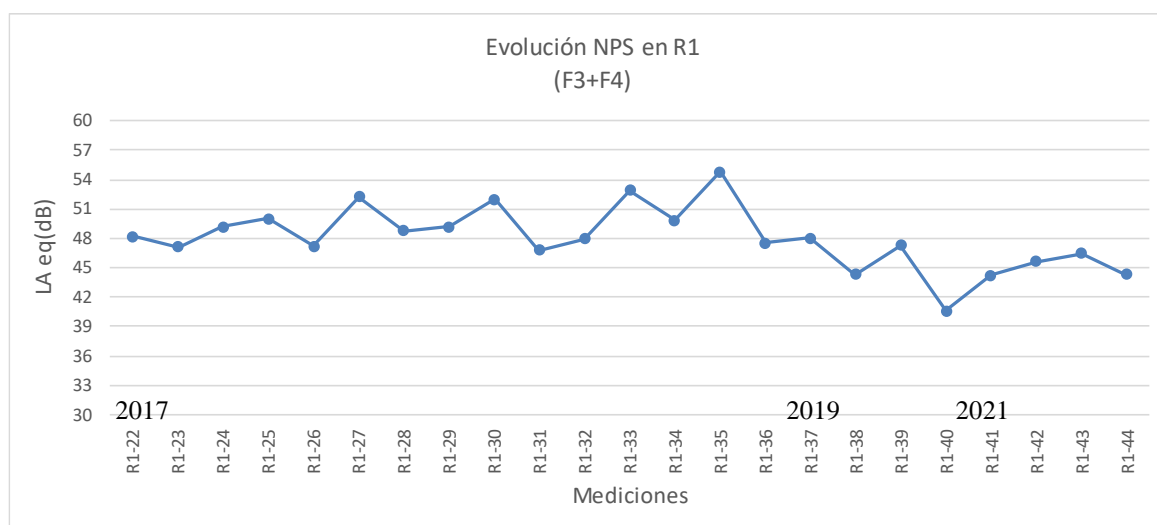
Para la segunda condición en la cual solo están operativas las Fuentes F3 y F4, la curva de permanencia de los niveles sonoros en R1 se presenta en la Figura 58.

Figura 58. Curva de permanencia en R1: F3+F4



La evolución de los NPS en R1 con solo dos fuentes funcionando (F3 y F4) se presenta en la Figura 59.

Figura 59. Evolución NPS en R1 (F3+F4)



### 7.2.3 Comparación de mediciones puntuales

Se realiza una comparación entre el primer valor medido en R1 (marzo 2019) y el último valor medido (diciembre 2021). En este período de tiempo las condiciones de funcionamiento de las fuentes sonoras no han cambiado, pero han pasado 2 años y 9 meses y los árboles han logrado una altura de 11,3 m. En la Tabla 38 se muestran los resultados y se observa una diferencia total de 4,7 dB, con diferencias en todas las frecuencias, pero sobre todo en 500, 1.000 y 2.000 Hz.

Tabla 38- NPS en R1- comparación 2019-2021

Descripción	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1 medido marzo 2019	58,4	58,7	48,1	47,5	51,1	49,5	47,1	37,2	33,5	53,8
R1 medido diciembre 2021	57,0	55,1	45,9	44,5	46,8	43,7	41,0	39,7	33,4	49,1
Diferencia	1	4	2	3	4	6	6	-2	0	5

*Nota.* Se muestran los resultados en bandas de octava de dos mediciones puntuales, una en 2019 y otra en 2021 además de la diferencia entre ellas, tanto para el valor total expresado en escala A como para cada banda de octava.

### 7.2.4 Análisis de resultados

Las curvas de permanencia permiten verificar que los datos obtenidos en los dos períodos (hasta 2018 y de 2019 en adelante) son representativos y atienden a un mismo patrón de comportamiento del nivel sonoro en R1 en las dos condiciones operativas estudiadas.

Los niveles de presión sonora en R1 han disminuido con el paso del tiempo, lo cual se evidencia tanto en las mediciones con todas las fuentes operativas, como en las mediciones cuando operan solo las fuentes cercanas F3 y F4.

Las mediciones en R1 con todas las fuentes principales operativas, presentan una mediana de 52,4 dB hasta 2018 y de 2019 en adelante de 49,3 dB.

Las mediciones en R1 con solo dos fuentes operativas (F3 y F4) muestran algo similar al caso anterior. Las mediciones hasta 2018 presentan una mediana de 49,2 dB y a partir de 2019 de 45,0 dB.

Con base en lo anterior, se concluye que, si bien el ruido generado por la operación industrial no ha disminuido, si no que se ha mantenido relativamente estable, incluso con una tendencia al incremento como se observa en las mediciones en R2, los niveles sonoros medidos en el Punto R1 han disminuido. Esta situación es el punto de partida de la hipótesis de que existe una atenuación generada por la presencia de las cortinas de árboles, las cuales estarían actuando como obstáculos en la propagación del sonido.

## 7.3 CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE LAS FUENTES SONORAS

En la

Tabla 39 se presentan los espectros representativos de cada una de las fuentes, calculados con base en las mediciones.

Tabla 39- Espectros de las fuentes sonoras

Fuente	r <sub>0</sub> (m)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Zeq</sub> (dB)									L <sub>Aeq</sub> (dB)
		31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1	25	85,0	86,1	85,2	84,4	83,0	81,0	80,6	73,3	64,2	86,5
F2	35	73,1	77,8	76,1	78,5	80,0	81,6	85,8	83,4	72,1	89,9
F3	10	73,3	71,0	68,2	71,6	74,0	75,2	77,4	75,4	67,8	82,2
F4	12	74,5	79,6	72,6	73,1	76,3	78,0	78,3	74,9	64,8	83,4

*Nota.* Espectro calculado con base en las mediciones realizadas a las distancias indicadas r<sub>0</sub>. El valor de F2 fue calculado corrigiendo los aportes de las fuentes F3 y F4 al punto de medición.

#### 7.4 TIPO DE PROPAGACIÓN DE LAS FUENTES SONORAS

Para verificar el tipo de propagación de cada una de las fuentes sonoras, se comparan los niveles de presión sonora medidos a una distancia determinada de cada fuente y los esperables calculados tanto con propagación esférica como con propagación cilíndrica. Se verifica cuál es el valor calculado que se aproxima más al medido en sitio.

El receptor seleccionado en cada caso no tiene obstáculos en el camino, es decir se procura que sea propagación directa de la fuente al receptor y que la distancia no sea muy grande (no superior a 300 m) para minimizar el error por presencia de obstáculos menores que puedan generar alguna interferencia o por la operación de alguna fuente sonora menor que no se haya identificada y que se sume al error.

Para el cálculo de la propagación de tipo esférica se utiliza la Ecuación 9 que refiere a un decaimiento cuadrático y para los cálculos de propagación de tipo cilíndrica, se utiliza la Ecuación 10 que refiere a un decaimiento de tipo lineal.

Los resultados obtenidos para cada una de las fuentes se presentan a continuación.

##### 7.4.1 Fuente F1

Se parte del espectro de la Fuente F1 y se toma como receptor el Punto P5, ubicado a 131 m de F1. En la Figura 60 se muestra la ubicación de P5 respecto a F1.

Se debe tener en cuenta que durante las mediciones en P5, no estaba operativa la Fuente F2 ubicada a solo 35 m de este punto. Esto indica que las mediciones son representativas de lo que llega a P5 propagado desde F1. Se calculó el NPS en P5, mediante propagación esférica y cilíndrica a partir de F1, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 40.

Este resultado se compara con los valores medidos en P5 (P5-01 y P5-02) y se concluye que el valor calculado que más se aproxima a los valores medidos se obtiene a partir de una propagación esférica de F1.

Figura 60. Tramo F1-P5



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021

Tabla 40- Tipo de propagación fuente F1

Receptor	Medición	Distancia a F1 (m)	T (°C)	HR (%)	NPS medido L <sub>A eq</sub> (dB)	NPS calculado con propagación esférica L <sub>A eq</sub> (dB)	NPS calculado con propagación cilíndrica L <sub>A eq</sub> (dB)
P5	P5-01	131	24,4	58,9	71,4	73,2	80,4
	P5-02	131	22,3	54,1	70,2		

Los resultados tanto con propagación esférica como con cilíndrica incluyen las atenuaciones por distancia, absorción atmosférica y el suelo. No se tiene interferencia de infraestructura de tipo industrial significativa (según notación de la ISO 9613-2) en el tramo estudiado.

#### 7.4.2 Fuente F2

A partir de este espectro de F2, se realiza la propagación hacia el punto P1 ubicado a 161 m, el cual se muestra en la Figura 61.

Se calculó el NPS en P1, mediante propagación esférica y cilíndrica a partir de F2, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 41. Este resultado calculado esperable se compara con el valor medido en P1 (P1-20) y se concluye que el valor calculado que más se aproxima al valor medido se obtiene a partir de una propagación esférica desde F2.

Figura 61. Tramo F2-P1



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth

Tabla 41- Tipo de propagación F2

Receptor	Medición	Distancia a F1 (m)	T (°C)	HR (%)	NPS medido L <sub>A eq</sub> (dB)	NPS calculado con propagación esférica L <sub>A eq</sub> (dB)	NPS calculado con propagación cilíndrica L <sub>A eq</sub> (dB)
P1	P1-20	161	16,7	50,9	69,4	74,0	80,6

Los resultados, tanto con propagación esférica como con cilíndrica, incluyen las atenuaciones por distancia, absorción atmosférica y efecto del suelo. No se tiene interferencia de tipo industrial en el tramo estudiado.

Se debe tener en cuenta que el valor medido en P1 incluye también el sonido que llega desde F1, es decir que el valor calculado en P1 debe ser mayor que 74,0 y 80,6 dB, generando una

diferencia mayor con lo medido. Esto refuerza la definición de que el decaimiento de F2 a P1 debe ser de tipo cuadrático o propagación esférica.

Dado que solo se contó con una medición para analizar el tipo de propagación desde F2, se realizan dos verificaciones adicionales que se muestran en el ítem 7.4.3.

### 7.4.3 Chequeo de propagación de F1 y F2

Para verificar si el tipo de propagación definido para las Fuentes F1 y F2 está correcto, se realizaron tres chequeos que se muestran a continuación.

#### 7.4.3.1 Chequeo N° 1

En la primera verificación se parte del espectro de F1 y se realiza propagación esférica y cilíndrica hasta un punto ubicado a 131 m de F1.

Al valor de NPS resultante en este punto, se le suma el aporte de la fuente F2. El NPS resultante calculado, debería ser similar a las mediciones realizadas in situ e identificadas como F2-01, F2-02, F2-03, que incluyen el aporte de las dos fuentes.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 42. Se ratifica que los espectros de F1 y F2 son representativos y que la propagación que mejor describe el comportamiento de la fuente F1 es la esférica, es decir un decaimiento de tipo cuadrático.

Figura 62. Chequeo 1-F1 y F2



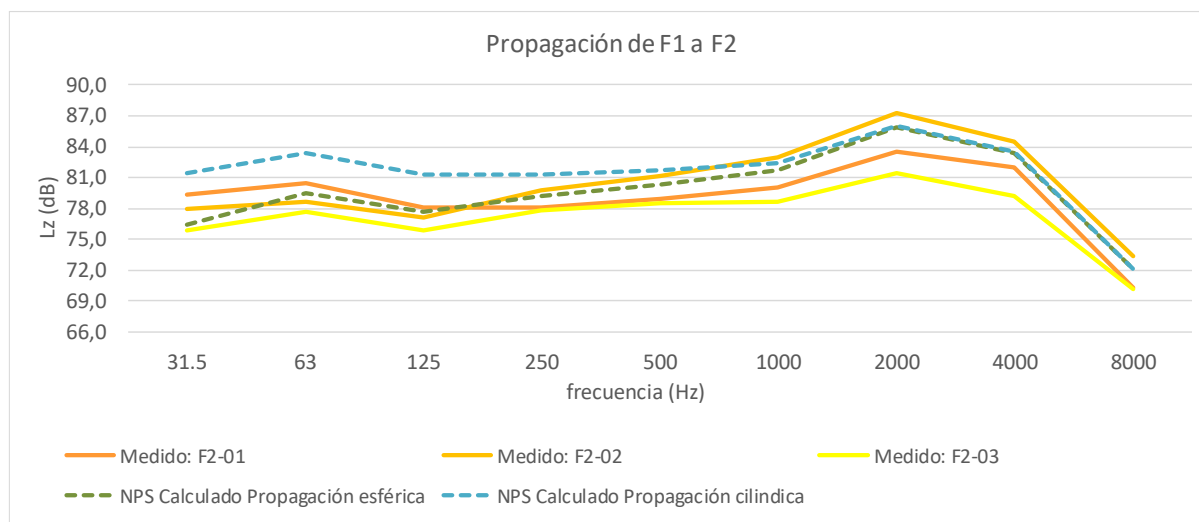
Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021

Tabla 42- Chequeo espectros F1 y F2 y propagación F1

Medición	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
(a) De F1 a F2 - Propagación esférica	73,6	74,7	72,4	70,9	69,6	68,1	67,2	58,3	42,6	73,2
(b) F2	73,1	77,8	76,1	78,5	80,0	81,6	85,8	83,4	72,1	89,9
Valor calculado (a+b)	76,6	79,8	77,9	79,2	80,4	81,8	85,9	83,4	72,1	90,1
(c) De F1 a F2 - Propagación cilíndrica	80,8	81,9	79,6	78,1	76,8	75,3	74,4	65,5	49,8	80,4
(b) F2	73,1	77,8	76,1	78,5	80,0	81,6	85,8	83,4	72,1	89,9
Valor calculado (c+b)	81,5	83,4	81,2	81,3	81,7	82,5	86,1	83,5	72,1	90,4
Valor medido F2-01	78,6	77,9	75,5	76,7	76,6	78,0	80,9	77,9	67,3	85,3
Valor medido F2-02	78,0	78,6	77,1	79,7	81,2	82,9	87,3	84,5	73,4	91,3
Valor medido F2-03	75,8	77,7	75,9	77,8	78,5	78,6	81,5	79,2	70,2	86,2

Los resultados son representados en la Figura 63

Figura 63. Chequeo espectros F1 y F2 y propagación F1



Se observa que si bien el resultado en banda ancha (expresado en escala A) calculado con propagación esférica a partir de F1 (90,1 dB), es similar al obtenido con propagación cilíndrica (90,4 dB), el tipo de propagación que genera los resultados más próximos a los medidos en todas las frecuencias (bajas y altas) es la propagación esférica a partir de F1.

### 7.4.3.2 Chequeo N° 2

La segunda verificación consiste en propagar las fuentes F1 y F2 hacia el punto de control P1 y comparar con lo medido en sitio.

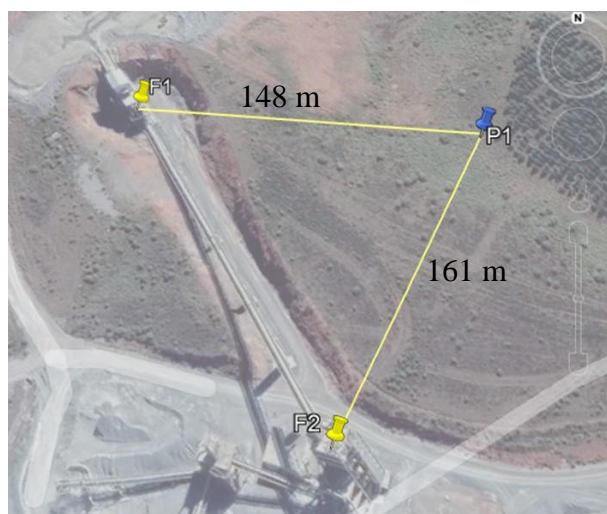
En la Figura 64 se aprecia la posición del punto P1 respecto a las fuentes.

Se asume que las fuentes F1 y F2 tienen un decaimiento de tipo cuadrático o esférico y se calcula el NPS en P1.

El valor calculado (F1+F2) en P1 se compara con la medición P1-20.

En la Tabla 43 se aprecian los resultados obtenidos y en la Figura 65 se muestran los resultados gráficamente. Con base en los resultados se concluye que el tipo de propagación que mejor define a las fuentes F1 y F2 es la propagación esférica, ya que los resultados esperables en P1 son muy similares a la medición realizada P1-20.

Figura 64. Chequeo 2- F1 y F2



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth. 2021

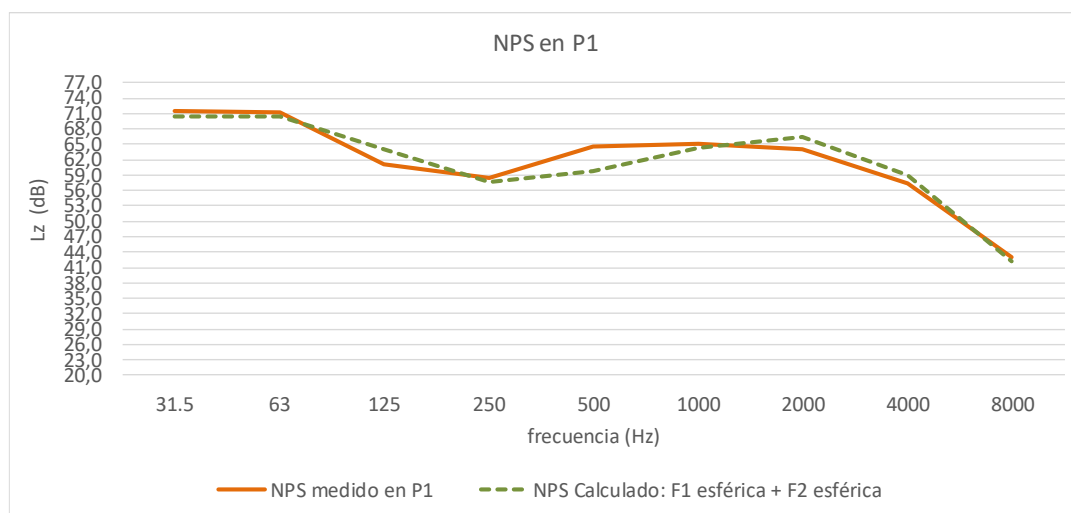


Las curvas de lo medido y lo esperable en el punto P1 son muy similares, con diferencias que no exceden los 3 dB.

Tabla 43- NPS en P1: F1 (esférica) y F2 (esférica)

Identificación	r <sub>1</sub> (m)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z,eq</sub> (dB)										L <sub>Aeq</sub> (dB)
		31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000		
F1-P1	148	65,8	67,0	60,8	50,1	53,7	57,2	56,5	45,6	25,5	61,3	
F2-P1	161	68,4	67,6	61,3	56,7	58,4	63,5	65,9	58,8	42,0	69,5	
F1+F2	--	70,3	64,1	57,6	59,7	64,4	66,4	59,0	42,1	70,3	70,1	
Valor medido P1-20	--	71,4	71,3	61,2	58,4	64,6	65,0	64,0	57,4	43,1	69,4	

Figura 65. Propagación F1 + F2 hacia P1



### 7.4.3.3 Chequeo N° 3

Una tercera verificación se realiza a partir de una medición que se realizó en el punto P3 en un período en el cual se encontraban operando las dos fuentes, F1 y F2.

En la Figura 66 se aprecia la posición del punto P3 respecto a las fuentes.

Partiendo de que la fuente F1 tiene un decaimiento de tipo cuadrático o esférico, se calcula el NPS en P3 para dos condiciones; F2 con decaimiento cuadrático y con decaimiento lineal.

El valor calculado (F1+F2) en P3 cuando F1 y F2 se propagan de forma esférica se presenta en la Tabla 44 y el resultado cuando F1 se propaga de forma esférica y F2 de forma cilíndrica se presenta en la Tabla 45.

Figura 66. Chequeo 3- F1 y F2



*Nota.* Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021

Tabla 44- NPS en P3: F1(esférica) y F2 (esférica)

Identificación	r <sub>1</sub> (m)	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z,eq</sub> (dB)									L <sub>Aeq</sub> (dB)
				31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-P3	171	27,2	47	64,5	65,7	58,9	47,9	51,6	55,1	54,7	44,8	25,5	59,3
F2-P3	155	27,2	47	63,2	67,9	62,2	58,7	61,8	67,1	71,3	66,5	47,2	74,7
F1+F2	--	--	--	66,9	69,9	63,9	59,0	62,2	67,4	71,4	66,5	47,2	76,4

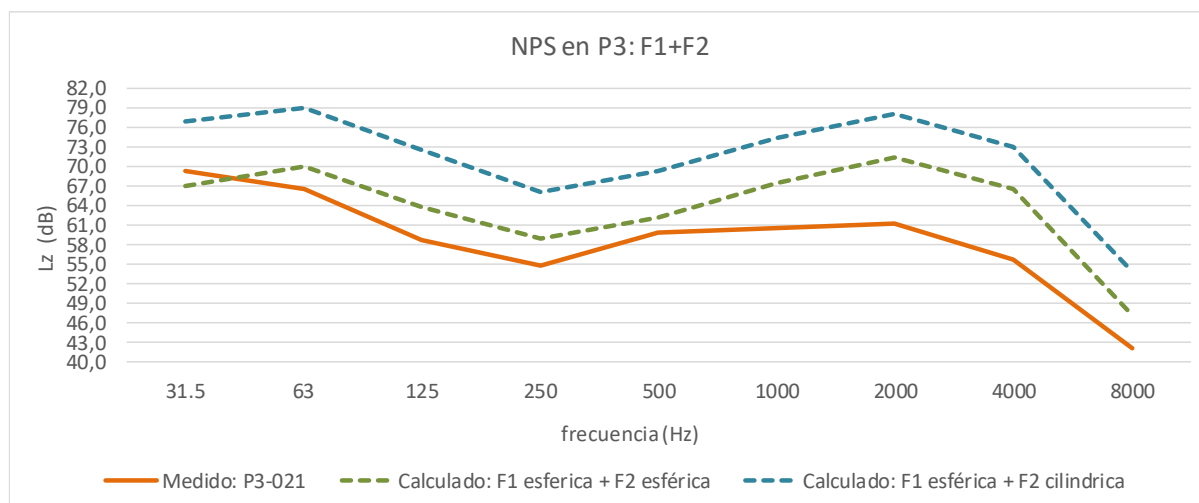
Tabla 45- NPS en P3: F1(esférica) y F2 (cilíndrica)

Identificación	r <sub>1</sub> (m)	T (°C)	HR (%)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z,eq</sub> (dB)									L <sub>Aeq</sub> (dB)
				31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-P3	171	27,2	47	64,5	65,7	58,9	47,9	51,6	55,1	54,7	44,8	25,5	59,3
F2-P3	155	27,2	47	69,7	74,3	68,8	65,3	68,4	73,6	77,7	72,9	53,6	81,1
F1+F2				70,8	74,9	69,1	65,2	68,4	73,6	77,8	72,9	53,6	82,1

En la Figura 67 se muestran los valores obtenidos, y se observa que la curva del NPS en P3 calculada mediante la suma de las dos fuentes F1 y F2 con propagación esférica (de color verde) es la más próxima al valor de NPS medido (de color naranja).

Figura 67. Propagación F1 + F2 hacia P3





Con base en los resultados se verifica que el valor calculado que más se aproxima a lo medido en P3 se obtiene a partir de propagación esférica de las fuentes F1 y F2.

Se observa además que, si bien la curva de lo esperable en P3 con propagación esférica desde F1 y F2 es la que más se aproxima a lo medido en este punto, estas curvas presentan diferencias significativas en algunas frecuencias. Por lo anterior y con base en esta medición, el resultado es indicativo, pero no tan contundente como las otras dos verificaciones anteriores.

#### 7.4.4 Fuente F3

Se parte del espectro de la fuente F3 y se toma como punto receptor el punto R2, ubicado a 227 m de F3. La medición en el punto R2 con la fuente F3 operativa (únicamente) fue calculada por diferencia entre dos mediciones R2-37 y R2-38 presentadas en la Tabla 33 y el resultado se muestra en la Tabla 46, identificándolo como R2-39.

Tabla 46- Medición en R2 (F3)

Medición	r <sub>1</sub> (m)	Frecuencia (Hz) y L <sub>Z,seq</sub> (dB)										L <sub>Aeq</sub> (dB)
		31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000		
R2-39	227	54,5	59,8	46,1	49,7	52,9	56,8	58,6	55,0	42,1	62,9	

En la Figura 68 se muestra el punto R2 en relación a la fuente F3.

Figura 68. Tramo F3-R2

Se calculó el NPS en R2, mediante propagación esférica y cilíndrica a partir de F3, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 47.

El resultado obtenido se compara con la medición R2-39 y se concluye que el valor calculado que más se aproxima al valor medido en el punto R2 se obtiene a partir de una propagación cilíndrica de F3. Pese a este resultado y teniendo en cuenta que

el valor de comparación no es un valor medido directamente, sino que proviene de un cálculo, se estima conveniente realizar una verificación adicional.



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021

Tabla 47- Tipo de propagación F3

Receptor	Distancia a F3 (m)	T (°C)	HR (%)	NPS medido $L_{A eq}$ (dB)	NPS calculado con propagación esférica $L_{A eq}$ (dB)	NPS calculado con propagación cilíndrica $L_{A eq}$ (dB)
R2	227	29,2	48,7	62,9	51,9	65,5

Los valores del NPS en R2 fueron calculados considerando la atenuación por distancia, por la absorción atmosférica, y por efecto del suelo. No existe interferencia de tipo industrial entre la fuente y el receptor R2.

Dado que la medición en R2 fue calculada por diferencia y que solo se contó con esta una medición, se estima pertinente hacer otro chequeo, el cual se presenta en el ítem 7.4.6 y que calcula los valores en R2 cuando operan de manera conjunta las fuentes F3 y F4 y en cuya condición se tienen varias mediciones para poder comparar.

#### 7.4.5 Fuente F4

En la Figura 69 se muestra el punto R2 en relación a la fuente F4.

Se parte del espectro de la Fuente F4 y se toma como receptor el punto R2 ubicado a 239 m de F4.

Se calculó el NPS esperable en R2, mediante propagación esférica y cilíndrica a partir de F4, calculando la atenuación por distancia, por la absorción atmosférica, el efecto del suelo y la atenuación por presencia de infraestructura de tipo industrial (de acuerdo con ISO 9613-2) en un tramo de 127 m. Los resultados se muestran en la Tabla 48.

Figura 69. Tramo F4-R2



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021

El resultado se compara con el valor medido R2-38 (cuando solo opera F4) y se concluye que el valor calculado que más se aproximan al medido en el punto R2 se obtiene a partir de una propagación cilíndrica

Tabla 48- Tipo de propagación F4

Receptor	Distancia a F4 (m)	T (°C)	HR (%)	NPS medido $L_{A eq}$ (dB)	NPS calculado con propagación esférica $L_{A eq}$ (dB)	NPS calculado con propagación cilíndrica $L_{A eq}$ (dB)
R2	239	29,2	48,7	62,5	52,5	65,5

Los valores del NPS en R2 fueron calculados incluyendo la atenuación por la distancia, por la absorción atmosférica, por efecto del suelo y presencia de infraestructura de tipo industrial en una longitud de 127 m.

#### 7.4.6 Chequeo de propagación de F3 y F4

Se realiza una verificación a partir de mediciones que se tienen en el Punto R2 en períodos de tiempo en los que operaban solamente las dos fuentes, F3 y F4.

En la Figura 70 se aprecia la posición del Punto R2 respecto a las fuentes.

Se realiza propagación de estas dos fuentes hacia el punto R2 en dos condiciones: a) F3 y F4 se propagan con un decaimiento lineal (cilíndrico) y b) F3 se propaga con un decaimiento de tipo cuadrático (esférico) y F4 con un decaimiento de tipo cilíndrico.

El valor calculado en R2: F3+F4 se compara con los valores medidos en R2; mediciones identificadas como R2-33, R2-34, R2-35 y R2-36 y cuyos resultados fueron presentados en la Tabla 32.

Figura 70. Chequeo F3 y F4



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth.

##### 7.4.6.1 F3 y F4 con decaimiento de tipo lineal o cilíndrico

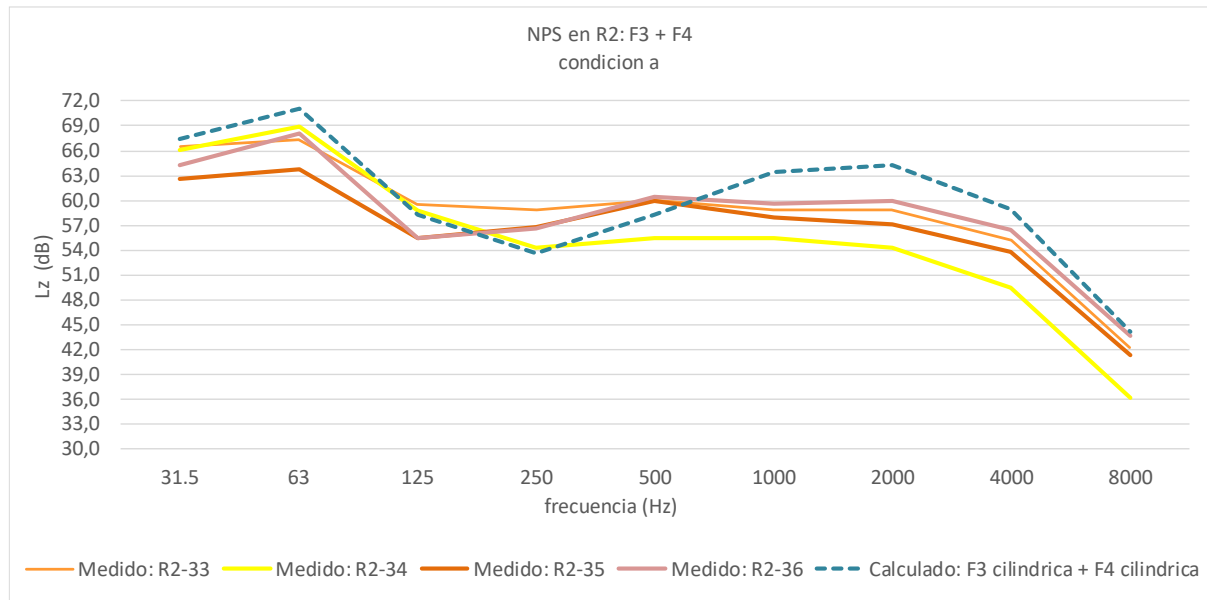
Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 49.

Tabla 49- NPS en R2: F3(cilíndrica)+F4(cilíndrica)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F3-R2	62,7	60,4	53,0	51,1	55,0	59,6	61,5	56,6	42,5	65,5
F4-R2	65,5	70,7	56,7	50,1	55,4	61,1	61,0	55,1	38,9	65,5
F3+F4	67,4	71,1	58,2	53,6	58,2	63,4	64,2	58,9	44,1	68,5

En la Figura 71 se muestran los valores medidos y el valor calculado en R2, partiendo de que las fuentes F3 y F4 se propagan de manera cilíndrica.

Figura 71. NPS en R2: F3 (cilíndrica) + F4 (cilíndrica)



Los resultados indican, que si bien el valor del NPS calculado en R2 (68,5 dB) es similar al menos a uno de los efectivamente medidos en sitio (65,3 dB) y que fueron presentados en la Tabla 32, existe una diferencia en las bandas de octava de 1.000, 2.000 y 4.000 Hz que son bandas de interés para el estudio. Por ello, se hace otra verificación en la condición b, es decir partiendo de que F3 tiene un decaimiento de tipo cuadrático. Esta segunda verificación se describe a continuación.

#### 7.4.6.2 F3 con decaimiento cuadrático y F4 con decaimiento lineal

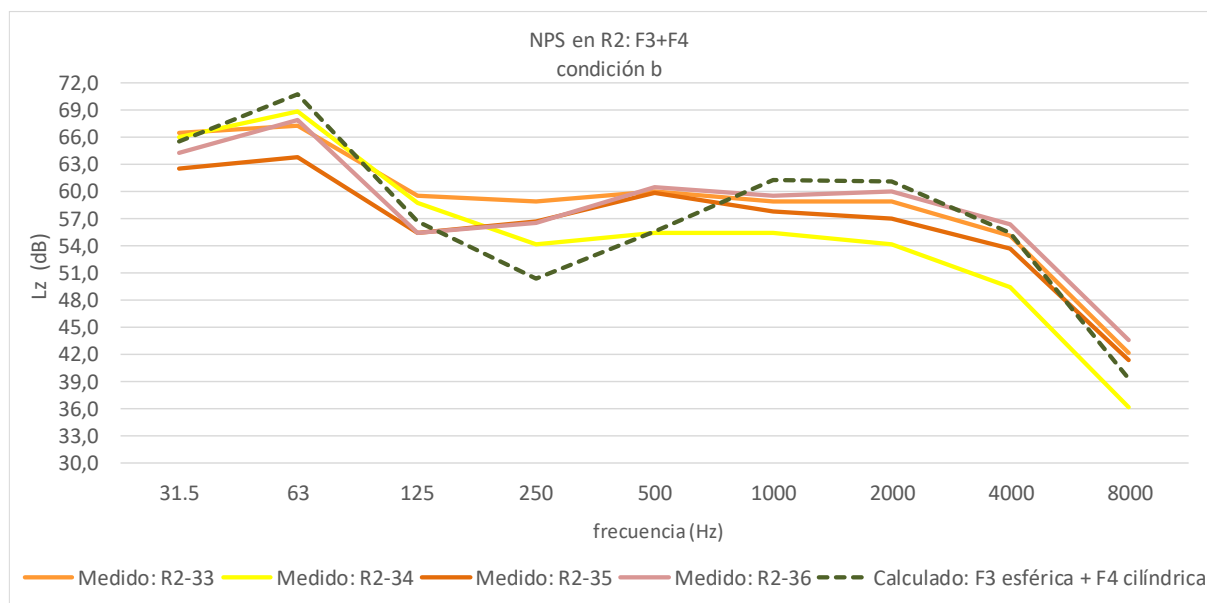
Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50- NPS en R2: F3(esférica) + F4(cilíndrica)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_z$ eq (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F3-R2	49,1	46,8	39,4	37,5	41,5	46,1	47,9	43,0	28,9	51,9
F4-R2	65,5	70,7	56,7	50,1	55,4	61,1	61,0	55,1	38,9	65,5
F3+F4	65,6	70,7	56,8	50,3	55,5	61,2	61,2	55,4	39,3	65,7

La Figura 72 muestra el comportamiento del valor calculado en esta condición frente a los valores medidos.

Figura 72. NPS en R2: F3 (esférica) + F4 (cilíndrica)



De acuerdo con los resultados, el valor del NPS calculado en R2 (65,7 dB) es similar a dos de los valores medidos en sitio (65,3 y 64,5 dB) y en esta condición existe una menor diferencia en las bandas de octava, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz que cuando F3 se trata con propagación cilíndrica.

Por lo anterior la Fuente F3 se asumirá con propagación esférica y la Fuente F4, con propagación cilíndrica.

#### 7.4.7 Análisis de resultados

Con base en los resultados se considera que el tipo de decaimiento que mejor representa a cada fuente en el punto R2 es el siguiente:

- Fuente F1: Decaimiento de tipo cuadrático (propagación esférica)
- Fuente F2. Decaimiento de tipo cuadrático (propagación esférica)
- Fuente F3: Decaimiento de tipo cuadrático (propagación esférica)
- Fuente F4: Decaimiento de tipo lineal (propagación cilíndrica)

## 7.5 ESTUDIO DE LA BARRERA 1

Como fuera mencionado, la barrera 1 es una serie de cortinas de árboles interpuestas entre las fuentes sonoras principales y el receptor R1.

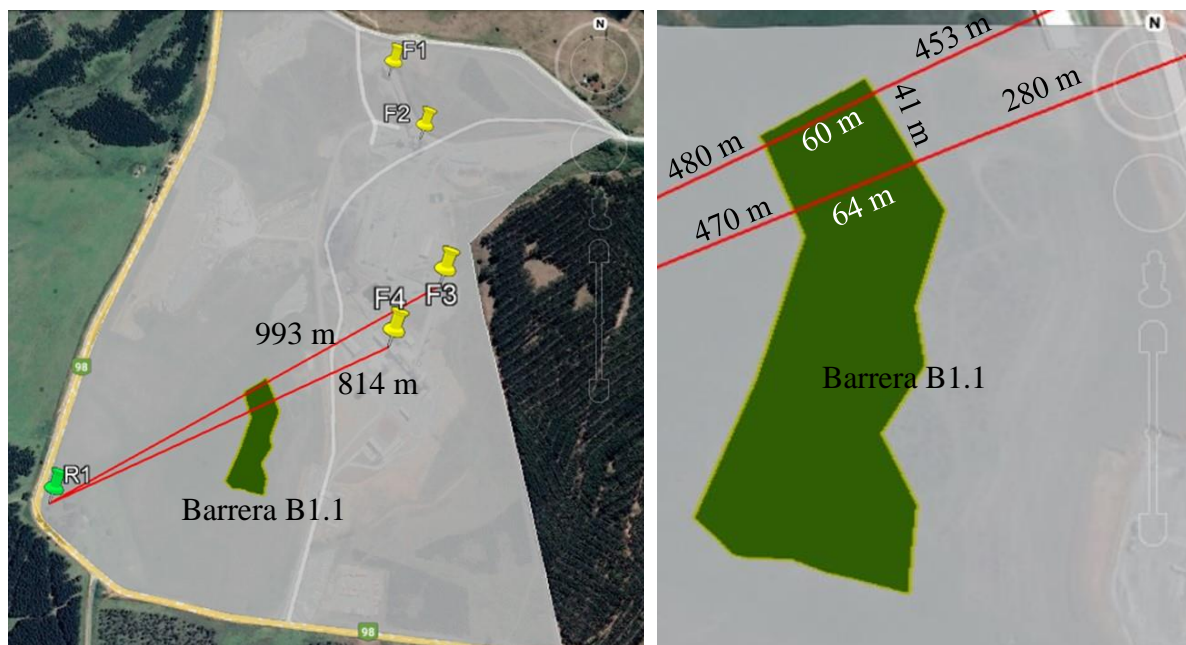
Para determinar si las cortinas de árboles tienen efecto en la mitigación del ruido se calcula el NPS que llegaría a R1 aplicando las ecuaciones de propagación y se compara con los valores medidos en R1 para 3 (tres) condiciones operativas. La primera condición se toma cuando solamente operan las fuentes sonoras F3 y F4, siendo estas las más cercanas a R1; la segunda condición cuando solo operan las fuentes más lejanas F1 y F2; y la tercera condición cuando operan las cuatro fuentes identificadas como principales, F1, F2, F3 y F4.

### 7.5.1 Condición 1: Operando solo las fuentes sonoras cercanas: F3 y F4

En la Figura 73 se muestra una ilustración de esta condición donde la cortina de árboles es identificada como B1.1. El objetivo de este análisis es verificar si esta cortina está generando atenuación del sonido proveniente de las fuentes F3 y F4 únicamente.

El análisis se realiza para dos escenarios, calculando el valor esperable en R1 sin tener en cuenta la posible atenuación por el follaje de los árboles y un segundo escenario, considerando que hay atenuación por el follaje. En este último escenario la atenuación por el follaje se calculará según la metodología de la norma ISO 9613-2 presentado en el ítem 4.2.3 y por la ecuación de Hoover, presentada en el ítem 3.7

Figura 73. Barrera B1.1



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021



### 7.5.1.1 Sin atenuación por el follaje

Los resultados de las mediciones en el receptor R1 con las fuentes F3 y F4 operativas se presentaron en la Tabla 25. Estos resultados se comparan con los obtenidos a partir de la propagación de las fuentes cuyos resultados se presentan en la Tabla 51. El valor calculado o esperable del NPS en R1 debido al funcionamiento de (F3+F4) incluye en su cálculo, la atenuación por distancia, por absorción atmosférica, por efecto del suelo y por presencia de infraestructura industrial en el camino de la propagación directa. En el camino entre F3 y R1 se considera una distancia con presencia de infraestructura industrial de 358 m, y en el camino de F4 a R1 se tiene una distancia de 158 m.

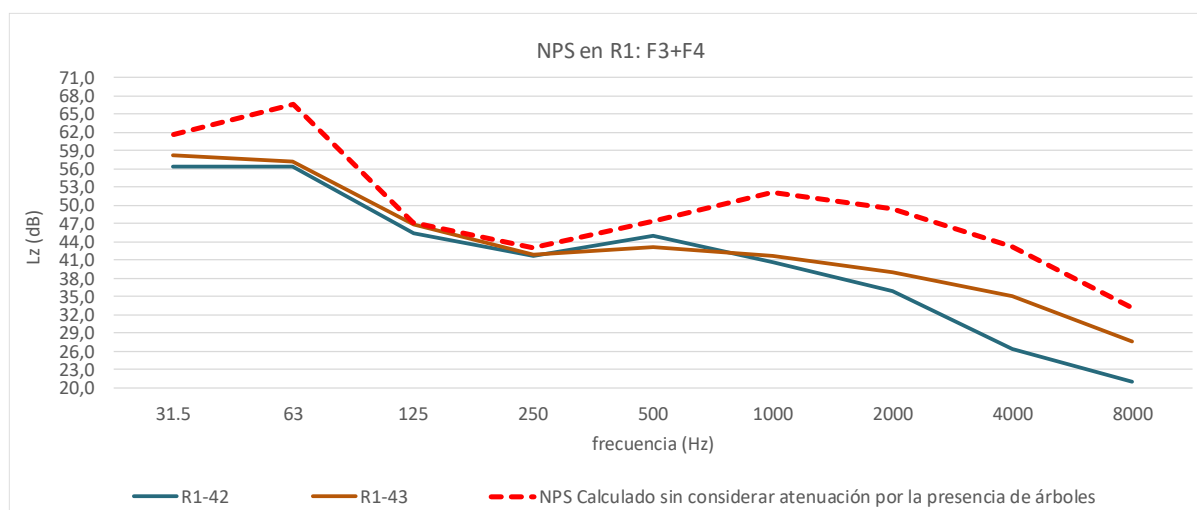
Los valores medidos que se usarán para comparar con el valor calculado, son aquellos cuyas condiciones atmosféricas sean similares, en este caso se toma R1-42 y R1-43, con una temperatura de 25°C y Humedad relativa de 50 %.

Tabla 51- NPS en R1 sin atenuación por el follaje (F3+F4)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F3-R1	38,2	36,2	17,9	13,8	18,7	23,0	21,3	20,0	13,0	27,6
F4-R1	61,6	66,7	47,1	43,1	47,4	52,2	49,5	43,2	33,0	55,5
F3+F4	61,6	66,7	47,1	43,1	47,4	52,2	49,5	43,2	33,1	55,5

Los valores medidos en R1 y el calculado como la suma de F3 + F4 se grafican en la Figura 74.

Figura 74. NPS medidos y calculado en R1 sin atenuación por follaje (F3+F4)



Con base en los resultados obtenidos se observa que hay diferencia entre lo medido en sitio y lo calculado que se hace más notoria en las bandas de 1.000, 2.000 y 4.000 Hz, y que puede ser atribuible a la presencia de la cortina de árboles B1.1 dado que es el único obstáculo presente entre las fuentes F3, F4 y el receptor R1.

Se parte de las mediciones realizadas en R1 y se calcula el  $L_{Aeq}$  de estas mediciones, obteniendo el resultado que se muestra en la Tabla 52, junto con el valor esperable a fin de identificar las diferencias.

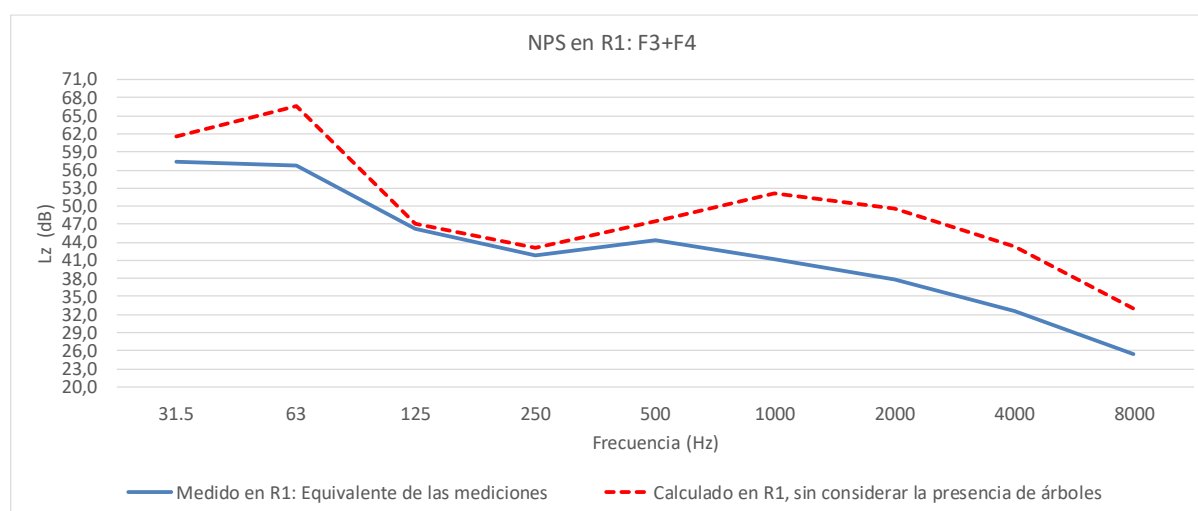
Tabla 52-  $L_{Aeq}$  de las mediciones en R1 (F3+F4)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1-Medido equivalente	57,4	56,8	46,2	41,9	44,3	41,1	37,8	32,6	25,4	46,1

El valor equivalente en R1 (46,1 dB) difiere del esperable calculado (55,5 dB) en 9,4 dB, por lo cual se analiza en qué frecuencias se encuentran las mayores diferencias y si estas pueden ser debidas al efecto atenuador de la cortina de árboles.

Los resultados se presentan de forma gráfica en la Figura 75, observando diferencias en 63 Hz de 10 dB, en 500 Hz de 3 dB y en las frecuencias altas de 11, 12, 11 y 8 dB de diferencia para 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 Hz respectivamente.

Figura 75. NPS eq y calculado en R1 sin atenuación por follaje (F3+F4)



### 7.5.1.2 Considerando atenuación por el follaje

Dado que hay una diferencia entre el NPS medido y el NPS esperable (calculado) en R1 sobre todo en las frecuencias altas, se procede a calcular la atenuación generada por el follaje de los árboles con el objetivo de determinar si las diferencias que se presentan en estas frecuencias pueden ser explicadas a través de la presencia de la vegetación.

En la Tabla 53 se presentan los resultados esperables en R1, considerando la atenuación por follaje de los árboles calculada por dos métodos: el que propone la Norma ISO 9613-2 y la expresión de Hoover.

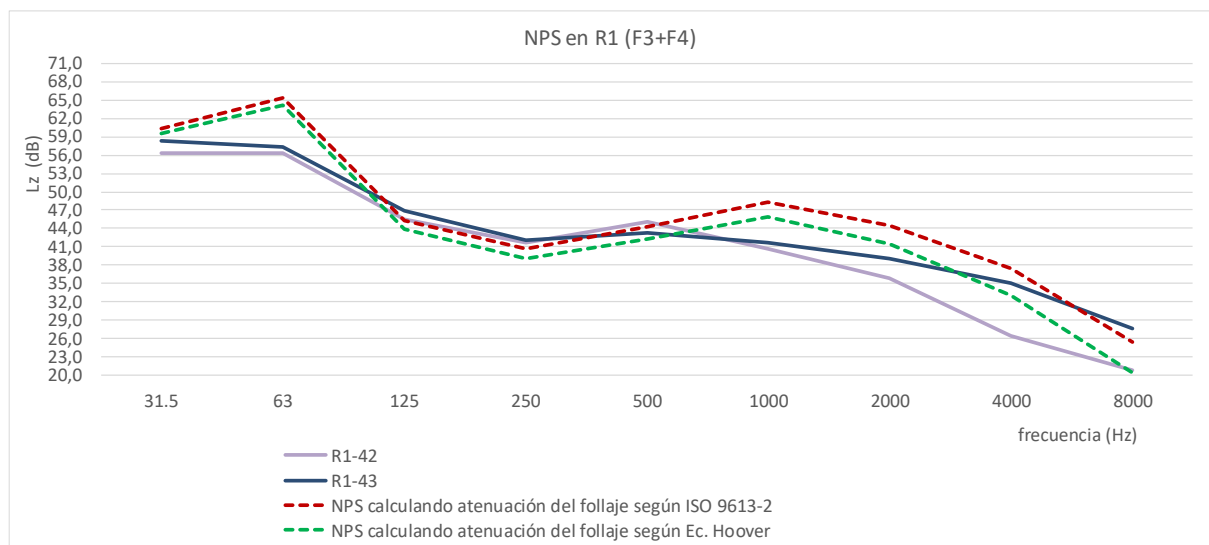


Tabla 53- NPS en R1 con atenuación del follaje (F3+F4)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000		
R1 calculado con atenuación follaje ISO 9613-2	60,3	65,4	45,2	40,6	44,2	48,4	44,4	37,4	25,4	51,3	
R1 calculado con atenuación follaje Hoover	59,6	64,1	43,9	39,1	42,4	45,8	41,5	33,0	20,4	48,8	

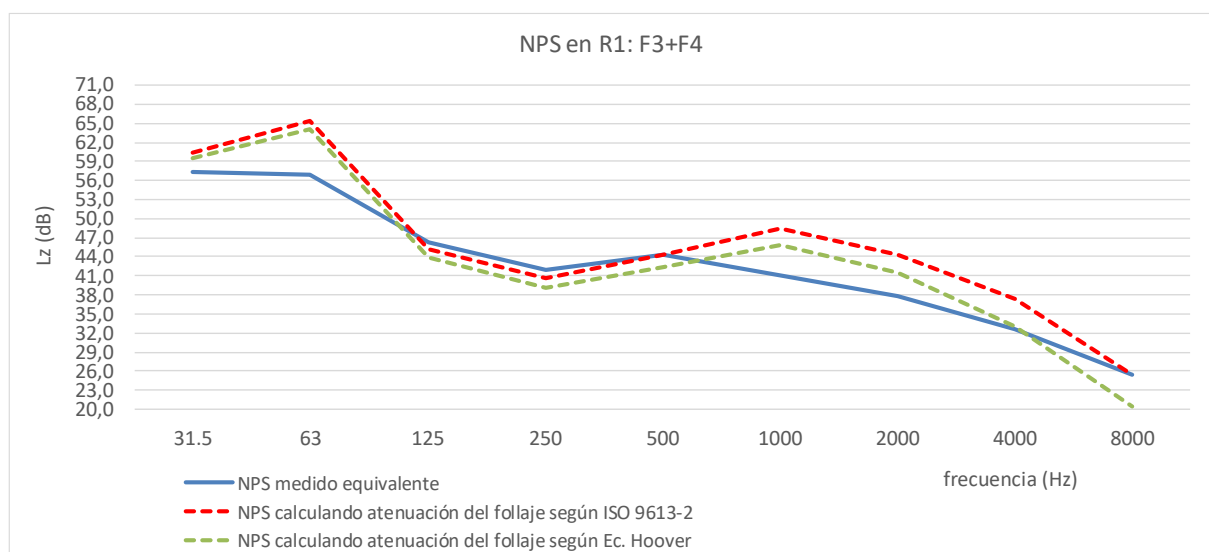
Si se comparan estos valores esperables con los efectivamente medidos en R1 se obtienen las curvas que se presentan en la Figura 76.

Figura 76. NPS en R1 con atenuación por follaje (F3+F4)



Si se comparan los valores teóricos que llegarían a R1 incluyendo la atenuación por el follaje con el equivalente de las mediciones en R1, se obtiene la gráfica que se presenta en la Figura 77

Figura 77. NPS eq y calculados en R1 con atenuación por follaje (F3+F4)



Se observa que, aun considerando atenuación por el follaje de los árboles, persiste una diferencia de 4,7 y 3,7 dB en las frecuencias de 1.000 y 2.000 Hz respectivamente.

De manera general se tiene que, a pesar de que la cortina de árboles B1.1 tiene apenas una profundidad entre 60 y 64 m, genera atenuación en la propagación directa de las Fuente F3 y F4 hacia R1, especialmente en las frecuencias de 1.000 Hz y 2.000 Hz.

### 7.5.2 Condición 2: Operando solo las fuentes sonoras lejanas: F1 y F2

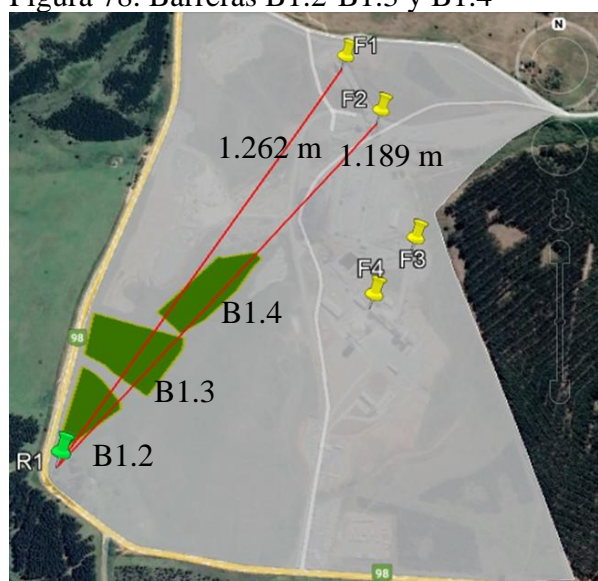
En la Figura 78 se muestra una ilustración de esta condición donde las cortinas de árboles interpuestas entre las fuentes y el receptor se identifican como B1.2, B1.3 y B1.4

El objetivo de este análisis es verificar si estas cortinas de árboles están generando atenuación del sonido cuando solo operan las fuentes F1 y F2.

El análisis se realiza para dos escenarios, sin atenuación por el follaje y con atenuación por el follaje. Se cuenta con una medición realizada en esta condición operativa, identificada como R1-45, cuyos resultados fueron presentados en la Tabla 26 .

Para el cálculo de la absorción atmosférica se tomó una temperatura de 15 °C y una Humedad relativa de 60 %, de acuerdo con los datos de esta medición. En cuanto a la atenuación por presencia de infraestructura industrial, se tomó una longitud de 61 m desde F1, y de 106 m desde F2.

Figura 78. Barreras B1.2-B1.3 y B1.4



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021

#### 7.5.2.1 Sin atenuación por el follaje

Se realiza propagación esférica desde las fuentes F1 y F2 hasta el receptor R1 sin tener en cuenta la presencia de vegetación y se compara con el valor medido en esta condición operativa. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 54.

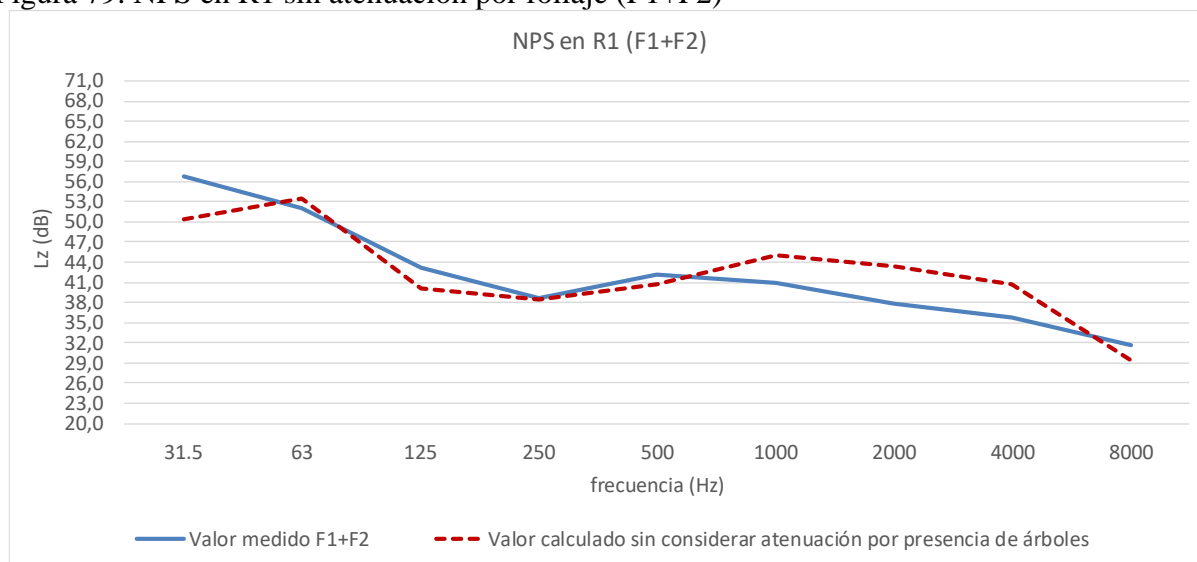
Tabla 54- NPS en R1 sin atenuación por el follaje (F1+F2)

Descripción	Frecuencia (Hz) y $L_z$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-R1	47,7	48,7	29,8	24,7	27,6	30,1	23,7	15,7	4,0	32,8
F2-R1	47,1	51,6	39,7	38,3	40,5	44,8	43,2	40,7	29,4	49,1
F1+F2	50,4	53,4	40,1	38,5	40,7	45,0	43,3	40,7	29,4	49,2
Medido: R1-45	56,8	52,0	43,2	38,7	42,2	40,9	37,9	35,7	31,6	45,6
Diferencia	-6	1	-3	0	-1	4	5	5	-2	4

Se observa que el valor esperable en R1 sin considerar atenuación por la presencia de árboles es similar al valor medido en sitio para las frecuencias hasta 500 Hz y en 8.000 Hz. Se presentan diferencias en las frecuencias de 1.000, 2.000 y 4.000 Hz con 4, 5 y 5 dB respectivamente.

En la Figura 79 se aprecian las dos curvas, de valor medido y valor esperable sin considerar una posible atenuación del follaje.

Figura 79. NPS en R1 sin atenuación por follaje (F1+F2)



### 7.5.2.2 Incluyendo atenuación por el follaje

De acuerdo con los resultados obtenidos en el ítem 7.5.2.1 la diferencia entre lo medido y lo calculado se debe a diferencias en las frecuencias de 1.000, 2.000 y 4.000 Hz. Si bien las diferencias no son muy grandes, se calcula el valor esperable en R1 teniendo en cuenta la presencia de la vegetación.

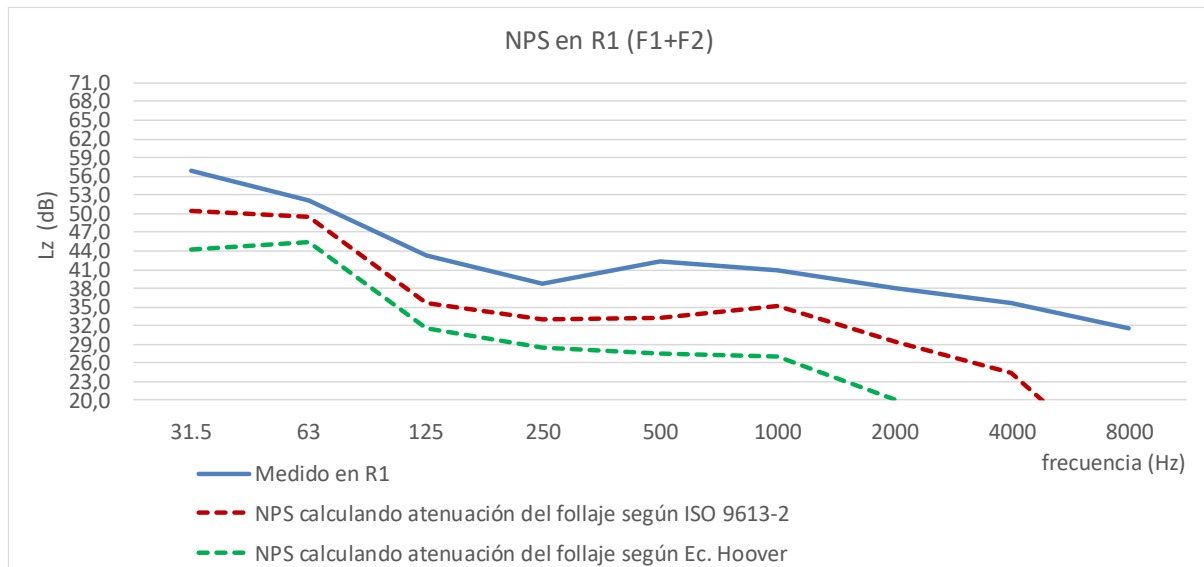
En la Tabla 55 se presentan los resultados esperables en R1, una vez calculada la atenuación por el follaje.

Tabla 55- NPS en R1 con atenuación del follaje (F1+F2)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000		
R1 calculado con atenuación follaje ISO 9613-2	50,4	49,4	35,5	33,0	33,3	35,0	29,4	24,3	7,8	38,0	
R1 calculado con atenuación follaje Hoover	44,1	45,5	31,5	28,4	27,4	27,0	20,2	10,9	3,0	30,6	

Si se comparan estos valores esperables con el valor medido en R1 (R1-45) se obtienen las curvas que se presentan en la Figura 80.

Figura 80. NPS en R1 con atenuación por follaje (F1+F2)



De acuerdo con los resultados obtenidos, las cortinas de árboles podrían estar generando una atenuación del sonido, pero los dos métodos utilizados para determinarla sobreestiman el resultado. Esto se observa cuando los valores calculados son menores que los valores efectivamente medidos.

Se debe tener en cuenta que la distancia con vegetación es superior a los 200 m, pero se tomó este valor como referencia en los cálculos de acuerdo con la metodología. Adicional a lo anterior se contó con una sola medición para comparar (R1-45), lo cual le adiciona incertidumbre al análisis.

Por último, se hace la verificación con todas las fuentes principales operando, la cual se presenta a continuación.

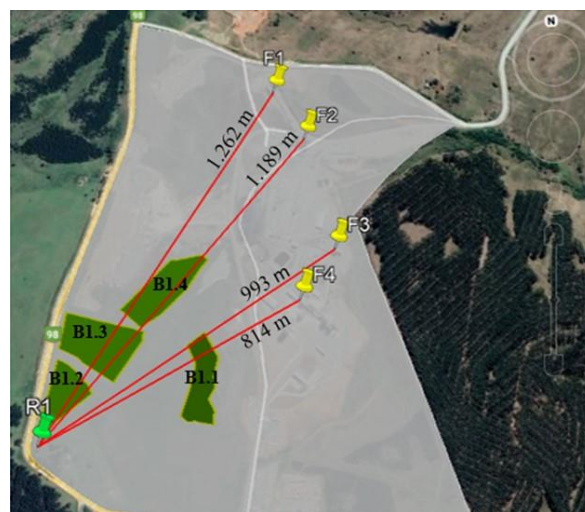
### 7.5.3 Condición 3: Operando todas las fuentes sonoras: F1, F2, F3 y F4

En la Figura 81 se muestra una ilustración de esta condición donde se observan varias cortinas de árboles interpuestas entre las fuentes sonoras y R1.

En esta condición se analiza el efecto conjunto de todas las cortinas de árboles y se determinará si su presencia está generando atenuación del sonido que llega al punto de interés R1, cuando están operativas las fuentes principales F1, F2, F3 y F4. La metodología consiste básicamente en propagar cada una de las fuentes sonoras hacia R1 y calcular el NPS esperable en R1, sin considerar atenuación del follaje y posteriormente con atenuación por el follaje.

Se menciona que se trata de un caso de estudio donde la ubicación del receptor R1 estaba definida con otros fines distintos a este estudio y similar situación para las cortinas de árboles que no fueron plantadas con fines acústicos.

Figura 81. Cortinas de árboles-Barrera 1



Nota. Fuente: Ilustración sobre imagen de Google Earth 2021

### 7.5.3.1 Sin atenuación por el follaje

En la Tabla 56 se muestran los valores de NPS que llegan a R1 de cada fuente sonora y el NPS Total en R1 (F1+F2+F3+F4), sin considerar que haya atenuación del follaje. Los cálculos incluyen la divergencia geométrica, la atenuación generada por la absorción atmosférica, la atenuación por efecto del suelo y por interferencia de infraestructura industrial en el camino de propagación directa de cada fuente a R1.

Tabla 56- NPS total en R1 sin atenuación del follaje (F1+F2+F3+F4)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z,eq}$ (dB)									$L_{A,eq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-R1	47,7	48,8	29,8	24,5	26,5	28,1	23,3	15,9	4,8	31,6
F2-R1	47,1	51,7	39,7	38,1	39,4	42,9	42,5	40,7	29,4	48,1
F3-R1	38,2	36,2	17,9	13,8	18,7	23,0	21,3	20,0	13,0	27,6
F4-R1	61,6	66,7	47,1	43,1	47,4	52,2	49,5	43,2	33,0	55,5
F1+F2+F3+F4	61,9	66,9	47,9	44,4	48,1	52,7	50,3	45,1	34,6	56,2

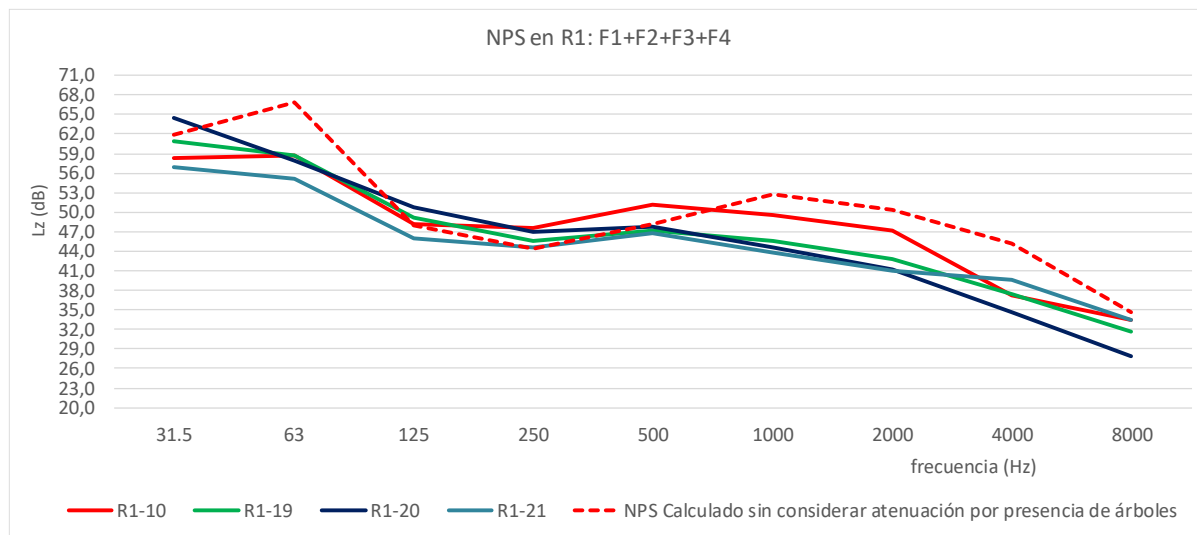
Una vez aplicadas las ecuaciones de propagación, el NPS resultante en R1, expresado como  $L_{A,eq}$ , es de 56,2 dB, valor que no incluye atenuación por la presencia de árboles. Este valor se compara con las mediciones obtenidas en R1 con todas las fuentes operando y cuyas condiciones atmosféricas sean similares.

Las mediciones de referencia son R1-10, R1-19, R1-20 y R1-21 cuyas condiciones atmosféricas de Temperatura y humedad relativa eran similares, realizando los cálculos de absorción atmosférica a una temperatura de 25 °C y Humedad relativa de 50 %.

Las mediciones realizadas en R1 fueron presentadas en la Tabla 23 y en la Figura 82 se presentan de manera gráfica y comparativa con el valor calculado. Igual que para el caso con

solo dos fuentes funcionando (F3+F4), se observa que hay diferencia entre lo medido y lo calculado en 63 Hz y en las frecuencias altas de 1.000, 2.000 y 4.000 y 8.000 Hz.

Figura 82. NPS en R1 sin atenuación del follaje (F1+F2+F3+F4)



*Nota.* La medición R1-10 fue realizada en marzo 2019 y las mediciones R1-19, R1-20 y R1-21 corresponden al año 2021.

Se calcula el  $L_{Aeq}$  de las mediciones en R1 (R1-19, R1-20 y R1-21), cuyo resultado se muestra en la Tabla 57.

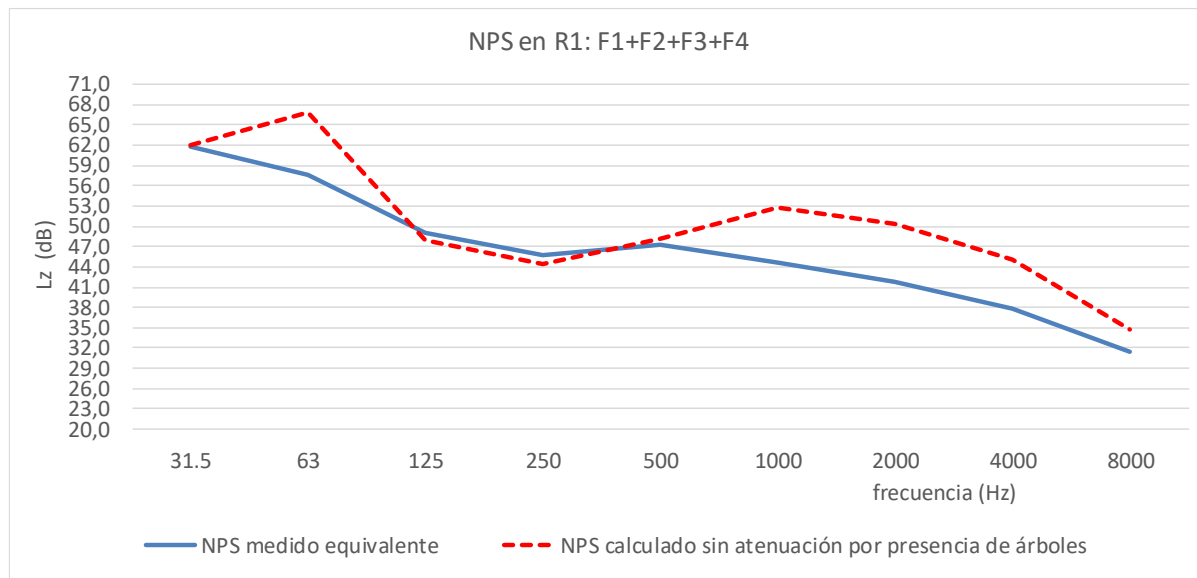
Tabla 57-  $L_{Aeq}$  medido en R1 (F1+F2+F3+F4)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1-Medido equivalente	61,7	57,5	49,0	45,8	47,2	44,6	41,7	37,7	31,5	49,6

El valor equivalente en R1 (49,6 dB) difiere del calculado (56,2 dB) en 6,6 dB, por lo cual se analiza en qué frecuencias se encuentran las mayores diferencias y si estas pueden ser debidas a la actuación de las barreras de árboles.

Los resultados se presentan de forma gráfica en la Figura 83 y se observa una diferencia de 9 dB en 63 Hz, y de 8 dB, 9 dB, 7 dB y 3 dB de diferencia para 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 Hz respectivamente.

Figura 83. NPS eq y calculado-R1 sin atenuación por follaje (F1+F2+F3+F4)



### 7.5.3.2 Incluyendo atenuación del follaje

Al ratificar que existen diferencias en las frecuencias altas, se calcula el valor de NPS en R1, pero esta vez calculando la atenuación por el follaje de los árboles. El valor resultante de NPS en R1 incluye la atenuación por la divergencia geométrica, por absorción atmosférica, efecto del suelo, interferencia con infraestructura de tipo industrial y la atenuación del follaje de los árboles. La atenuación del follaje de los árboles se calcula por los dos métodos mencionados y los resultados se muestran en la Tabla 58.

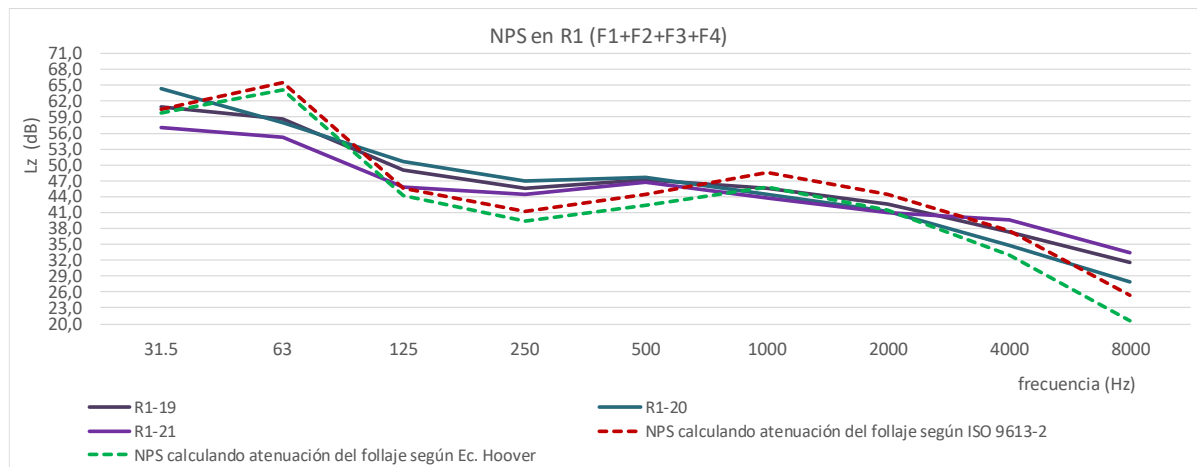
Tabla 58- NPS en R1 con atenuación por el follaje (F1+F2+F3+F4)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000		
R1 calculado con atenuación follaje ISO 9613-2	60,5	65,5	45,7	41,3	44,5	48,5	44,5	37,6	25,5	51,5	
R1 calculado con atenuación follaje Hoover	59,7	64,2	44,2	39,4	42,5	45,8	41,5	33,1	20,5	48,8	

La Figura 84 muestra de manera comparativa, los valores medidos en R1 y el valor calculado considerando la atenuación por el follaje según los dos métodos. Se observa que, considerando la atenuación por la presencia de árboles, los resultados se aproximan más a lo efectivamente medido.

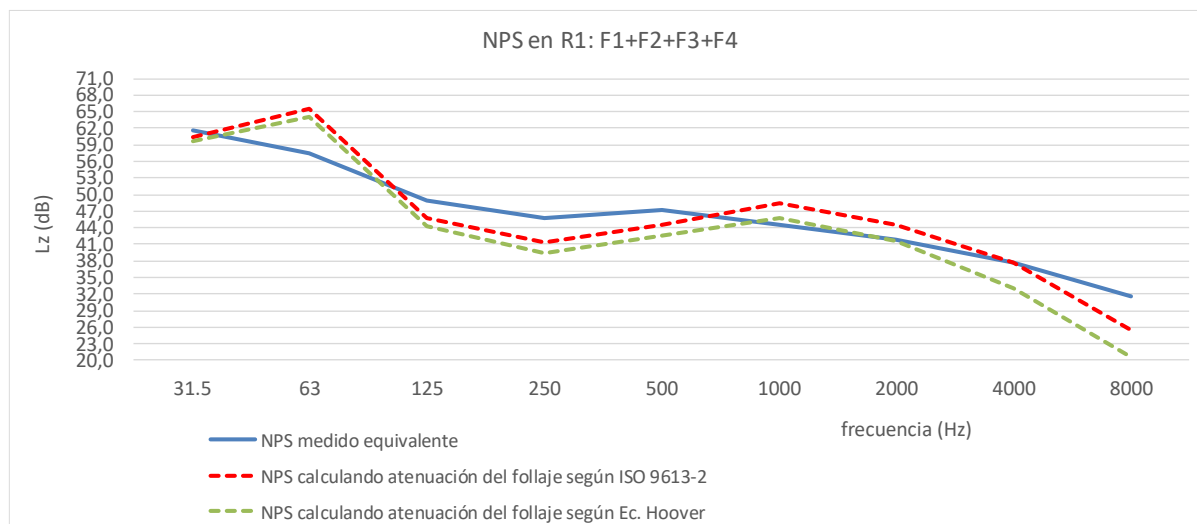


Figura 84. NPS en R1 con atenuación del follaje (F1+F2+F3+F4)



Para visualizar con una única curva de valores medidos, se calculó el nivel sonoro continuo equivalente en cada banda. La Figura 85 muestra la comparación de los valores teóricos que llegarían a R1 incluyendo la atenuación por el follaje calculado por los dos métodos y el NPS equivalente de las mediciones en R1.

Figura 85. NPS eq y calculado-R1 con atenuación por follaje (F1+F2+F3+F4)



De acuerdo con estos resultados se observa que, considerando atenuación por el follaje de los árboles, se obtienen valores muy próximos a los valores medidos en 2021 (NPS equivalente de las mediciones R19, R20 y R21, realizadas en 2021).

#### 7.5.4 Condición 4: Operando solo una fuente: F4

Se hace un análisis para la condición en la que solo opera la fuente F4 (molino de carbón) considerada una fuente cercana, para verificar el funcionamiento de la Barrera B1.1 interpuesta entre esta fuente y el Punto R1.



Se realizó un chequeo inicial de algunas condiciones generales para saber si la plantación de árboles tendría un comportamiento acústico notorio, lo cual se resumen en la Tabla 59.

Tabla 59- Chequeo condiciones barrera B1.1

Recomendación general	Situación de la barrera de árboles B1.1
Las barreras verdes no son adecuadas para controlar el ruido de baja frecuencia.	De las mediciones en la Fuente se obtienen los valores de $L_C$ y $L_A$ que permitieron calcular el parámetro C-A con un resultado de 2 dB <sup>13</sup> aproximadamente. Por lo tanto, las emisiones de sonido del F4 (molino) no tienen componentes significativos de baja frecuencia.
Si se utilizan árboles/arbustos de hoja caduca, el rendimiento cambia mucho según la época del año (Cook, 1972)	La Especie de la barrera es eucaliptus, que tiene hoja perenne. Para el uso que fue sembrada no se poda.
Cada 10 m de profundidad (vegetación densa), se logra una reducción de aproximadamente 1 dB.	La barrera vegetal tiene un espesor de 61 m en la línea que une la fuente y el receptor. Por esta profundidad es posible que se obtenga una atenuación de 6 dB aproximadamente
La ubicación relativa de las pantallas de ruido entre la fuente de sonido y el área protegida es de gran importancia; una pantalla colocada relativamente cerca de una fuente de ruido es más efectiva que una colocada cerca de un área a proteger. (Cook, 1972)	La barrera de árboles está a 278 m de la fuente F4 y a 474 m del punto de medición R1.

Las características de esta barrera de árboles hacen posible esperar una reducción de los niveles de presión sonora en R1. Para verificarlo, se utiliza el siguiente enfoque:

1. Cálculo de los niveles de presión sonora esperados en R1 por el sonido proveniente de F4, considerando únicamente la divergencia geométrica, la absorción atmosférica y la atenuación del suelo.
2. Cálculo del nivel de presión sonora esperado en R1 por el sonido proveniente de F4 teniendo en cuenta la atenuación de la barrera vegetal B1.1. Se considera la difracción por encima de la barrera y por los laterales de la misma.

*Los enfoques a considerar son: Kurze-Anderson y el enfoque de barrera gruesa, que son expresiones generales para barreras “convencionales” o sólidas; la corrección ISO 9613-2 y la expresión de Hoover, que son enfoques específicos para barreras verdes (González, 2022).*

3. Comparación de los resultados anteriores con los niveles de presión sonora medidos en R1
4. Conclusión sobre el desempeño acústico de la barrera de árboles B1.1 cuando solo opera una fuente. F4.

<sup>13</sup> El ruido de baja frecuencia tiene una energía acústica significativa en el rango de frecuencia de 20 Hz a 100 Hz. La comparación del nivel sonoro en la escala C con el nivel sonoro A, permite determinar si existen o no componentes significativos de baja frecuencia. En efecto, dado que la curva A atenúa las bajas frecuencias y la curva C no, si la diferencia entre los valores de dBA y dBC no es grande ( $C-A \leq 10$ ), se considerará que los componentes de baja frecuencia no son importantes [Decreto Gobierno de España]

### 7.5.4.1 Sin atenuación de la barrera B1.1

El ruido de fondo en R1 se obtuvo a través de mediciones durante un período de parada de la Industria, cuyos resultados se presentan en la Tabla 28. El ruido de fondo es de 40 dB.

Los niveles de presión sonora esperados en R1, sin considerar el desempeño acústico de la barrera B1.1 se calcularán utilizando la Ecuación 10 para divergencia de tipo cilíndrica a partir de la fuente F4.

Los niveles de presión sonora en P1 se midieron cuando el molino de carbón era la única fuente de ruido en funcionamiento y los resultados se muestran en la Tabla 27. Se consideraron las condiciones meteorológicas para el cálculo de la absorción atmosférica de  $T = 20\text{ °C}$  y  $HR = 80\%$ .

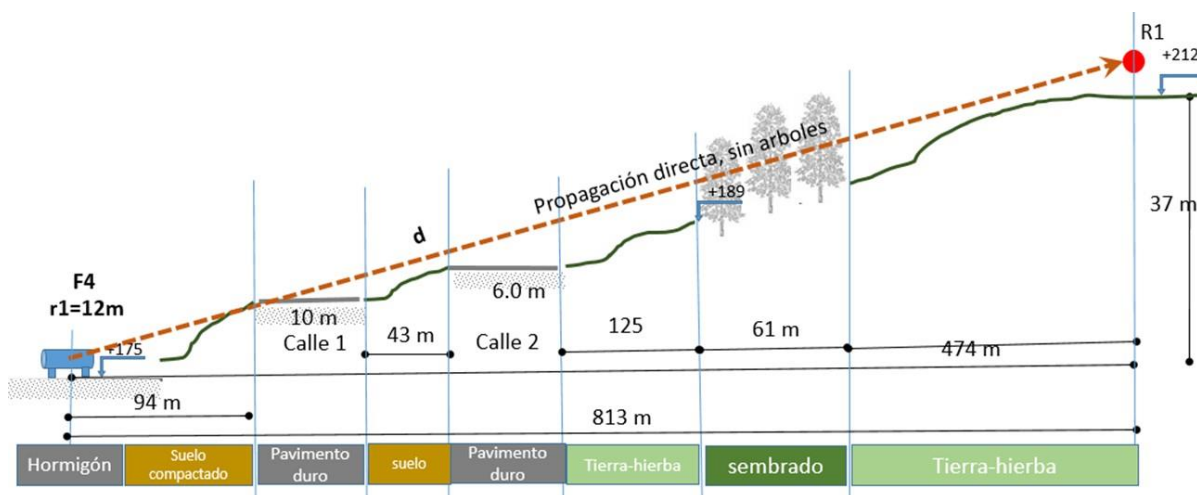
Se tomaron los coeficientes de absorción atmosférica por bandas de octava para  $T = 20\text{ °C}$  y  $HR = 80\%$  (Miyara, 1999). Ver Tabla 60.

Tabla 60- Coeficientes de absorción atmosférica

	T (°C)	HR (%)	Coeficientes de absorción atmosférica por bandas de octava									
			31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000
$\alpha$ (dB/100 m)	20	80	--	--	0,03	0,10	0,28	0,52	0,90	2,13	6,86	--

En este caso,  $r_0$  es 12 m y  $r_1$  es 813 m. El camino entre F4 y R1 está compuesto por varios tipos de suelo, como se muestra en la Figura 86. En la Tabla 61 se resumen los principales datos para calcular los valores de G que permiten calcular la atenuación generada por el suelo.

Figura 86. Esquema tramo F4-R1



*Nota.* Esquema sin escala que ilustra el tramo entre F4 y R1 y los distintos tipos de suelo encontrados en el trayecto

Tabla 61- Características del suelo F4 a R1

De	a	Distancia (m)	Tipo de suelo
Fuente F4	Fin de base de F4	5	Hormigón
Fin de la base de F4	Inicio de la Calle 1	89	Suelo compactado
Borde inferior de la Calle 1	Borde superior de la Calle 1	10	Pavimento duro
Borde superior de la Calle 1	Borde inferior de la Calle 2	43	suelo
Borde inferior de la Calle 2	Borde superior de la Calle 2	6	Pavimento duro
Borde superior de la Calle 2	Borde inferior de la barrera de árboles	125	Tierra/hierba
Borde inferior de la barrera de árboles	Borde superior de la barrera de árboles	61	Eucalyptus dunii
Borde superior de la barrera de árboles	Punto R1	474	Tierra/hierba

Con base en los distintos tipos de suelo existentes en el tramo en estudio, en la Tabla 62, se muestra el resultado de los valores del coeficiente G que se utilizará para el cálculo de la atenuación del suelo.

Tabla 62- valores de G entre F4 y R1

Descripción	Región de la fuente	Región intermedia	Región del Receptor
<b>Longitud</b>	108 m	660 m	45 m
<b>Cobertura del suelo</b>	Concreto, suelo compacto/pavimento duro/suelo	Suelo/hierbas/árboles/pavimento duro	Suelo/hierbas
<b>Factor G</b>	Gs = 0,2	Gm = 0,9	Gr = 1

La propagación desde F4, considerando únicamente la atenuación por distancia, por absorción atmosférica y por absorción desde el suelo, conduce a los resultados de la Tabla 71 (el cálculo se realizó según ISO 9613- Part 2). No se considera la banda de 31,5 Hz, porque el coeficiente de absorción atmosférica no se calcula de la misma forma que para frecuencias más altas.

Tabla 63- NPS en R1 sin atenuación por B1.1 (F4)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z, eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000		
R1 medido	--	52,1	43,5	45,2	45,4	40,5	40,8	38,3	30,9	47,7	
R1 atenuado por distancia	--	61,3	54,3	54,8	58,0	59,7	60,0	56,6	46,5		
A atmosférica	--	0,0	0,2	0,9	2,3	4,2	7,3	15,0	15,0		
A suelo	--	-5,4	3,9	6,1	3,5	-0,8	-1,4	-1,4	-1,4		
R1 calculado propagación directa ( $L_{dir}$ )	--	66,7	50,1	47,8	52,2	56,3	54,1	43,0	32,9	59,5	

Al comparar los resultados en la primera y última fila de la Tabla 63, se observa que el valor medido es más bajo que el calculado cuando se expresan en la escala de ponderación A. La

diferencia es mayor en la banda de frecuencia más baja y en las bandas de 1.000 Hz y 2.000 Hz. Estas diferencias refuerzan la hipótesis de una atenuación sonora extra, posiblemente proporcionada por la barrera de árboles B1.1

#### 7.5.4.2 Considerando atenuación por la barrera B1.1

Una vez calculado el nivel de presión sonora directa ( $L_{dir}$ ), se puede obtener por diferencia el nivel de presión sonora debido a la difracción del sonido por encima de la barrera. Se parte del hecho que los niveles de presión sonora en el receptor solo son causados por la onda de sonido difractada por la barrera. Hay que tener en cuenta que también existe una difracción por los bordes laterales, que hay que tener en cuenta para el cálculo de los niveles de presión sonora en el receptor.

En este caso de estudio, se calculan las pérdidas de inserción de la barrera- IL según diferentes métodos, para comparar sus resultados: Kurze-Anderson, enfoque de barrera gruesa, la Norma ISO 9613-2 y la expresión de Hoover.

##### 7.5.4.2.1 Cálculo del IL por método Kurze Anderson

Esta forma de obtener IL es general; no ha sido desarrollado para barreras verdes. Se espera sobreestimar el valor de IL. Las expresiones a utilizar son las de la Ecuación 43, donde N es el Número de Fresnel y se calcula de acuerdo con la Ecuación 41.

El IL calculado usando la Ecuación 43 y el NPS esperado en el receptor R1 se presentan en la Tabla 64. Se tuvo en cuenta el IL para la banda de 63 Hz porque la longitud de onda en esta frecuencia (5,5 m) es significativamente más pequeña que el ancho de la barrera  $t$  (61 m).

Los NPS calculados a 4.000 Hz y 8.000 Hz fueron más bajos que el ruido de fondo en R1; por lo tanto, han sido sustituidos por los valores del ruido de fondo.

Tabla 64- IL según Kurze-Anderson y NPS esperados en R1

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)								$L_{Aeq}$ (dB)
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1 medido	52,1	43,5	45,2	45,4	40,5	40,8	38,3	30,9	47,7
NPS directo (sin la barrera)	66,7	50,1	47,8	52,2	56,3	54,1	43,0	32,9	59,5
IL usando Ec, K-A	6,0	6,9	8,3	10,3	12,9	15,8	18,8	21,8	
NPS esperado en R1	60,7	43,2	39,6	41,9	43,4	38,3	32	24	46,5

##### 7.5.4.2.2 Enfoque de barrera gruesa

Se dice que una barrera acústica es "gruesa" cuando tiene más de un punto donde puede ocurrir la difracción, lo cual sucede si:

- El ancho de su cresta supera los 3 m. En este caso, se considera gruesa para todas las frecuencias. Aunque no es exactamente una cresta, el ancho de la recta que une la fuente y el receptor es de 61 m.

- La longitud de onda  $\lambda$  a considerar es menor que 1/5 del ancho de cresta  $t$  ( $\lambda < t/5$ ). Si hubiera frecuencias donde no se cumpliera esta relación, la barrera funcionaría como una barrera delgada, y así debería calcularse.

En la Tabla 65 se presenta la verificación para este caso de estudio ( $t = 61$  m).

Tabla 65- Verificación del criterio de barrera gruesa/fina

f (Hz)	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
$\lambda$ (m)	10,92	5,46	2,75	1,38	0,69	0,34	0,17	0,09	0,04
1/5 t (m)	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2

Con base en los resultados de la Tabla 65, se considera que la barrera de árboles B1.1 es una barrera gruesa para todas las frecuencias.

La Ecuación 42 se puede utilizar para barreras sólidas, ya sean delgadas o gruesas. Dado que no está desarrollado para árboles o barreras verdes, se espera una sobreestimación de IL.

En el caso de barreras gruesas, se suma el espesor  $t$  a la menor de las distancias  $a$  o  $b$  y con este nuevo valor  $a'$  o  $b'$  se debe calcular el número de Fresnel  $N$ .

El IL calculado usando la Ecuación 42 sin restar  $A_{gr}$  y el NPS esperado en R1 se presentan en la Tabla 66. En este caso,  $A_{suelo}$  fue considerado en los términos generales de atenuación; y se tiene la precaución de no restarlo dos veces. Se ha considerado el IL para la banda de 63 Hz porque la longitud de onda en esta frecuencia (5,5 m) es significativamente más corta que el ancho de la barrera  $t$  (61 m)

Los NPS calculados a 4.000 Hz y 8.000 Hz fueron más bajos que el ruido de fondo en R1; por lo tanto, han sido sustituidos por los valores de fondo.

Tabla 66- IL según aproximación de barrera gruesa y NPS esperados en R1

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z_{eq}}$ (dB)								$L_{Aeq}$ (dB)
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1 medido	52,1	43,5	45,2	45,4	40,5	40,8	38,3	30,9	47,7
NPS directo (sin la barrera)	66,7	50,1	47,8	52,2	56,3	54,1	43,0	32,9	59,5
IL usando Ec. Barrera gruesa	5,6	6,2	7,3	8,9	11,0	13,4	16,1	19,0	
NPS esperado en R1	61,2	43,9	40,5	43,3	45,3	40,7	32	24	48,3

#### 7.5.4.2.3 *Enfoque ISO 9613-2*

Según ISO 9613-2, la atenuación del sonido cuando se propaga a través de una barrera verde o follaje denso de longitud  $d_r$ , se calcula según la Tabla 13.

Los resultados del valor medido en R1 y el valor esperado calculando la atenuación por el follaje según la Norma ISO 9613-2 se muestran en la Tabla 67.

Tabla 67- IL según aproximación de ISO 9613-2 y NPS esperados en R1

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{z, eq}$ (dB)								$L_{Aeq}$ (dB)
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1 medido	52,1	43,5	45,2	45,4	40,5	40,8	38,3	30,9	47,7
NPS directo (sin la barrera)	66,7	50,1	47,8	52,2	56,3	54,1	43,0	32,9	59,5
IL usando ISO 9613-2	1,2	1,8	2,4	3,1	3,7	4,9	5,5	7,3	
NPS esperado en R1	65,5	48,3	45,4	49,1	52,6	49,2	37,5	25,6	55,5

#### 7.5.4.2.4 *Enfoque según expresión de Hoover*

La expresión de Hoover presentada en la Ecuación 37, depende del grosor de la barrera verde (d) y de la frecuencia del sonido (f).

El IL calculado usando la Ecuación 37 y el NPS esperado en el receptor se presentan en la Tabla 68. En este caso, dado que el principal fenómeno considerado es la atenuación por las hojas y el dosel, la atenuación a 63 Hz no se consideraría. La única corrección necesaria fue la del ruido de fondo a 8.000 Hz, para evitar un valor calculado inferior al medido.

Tabla 68- IL según aproximación de Hoover y NPS esperados en R1

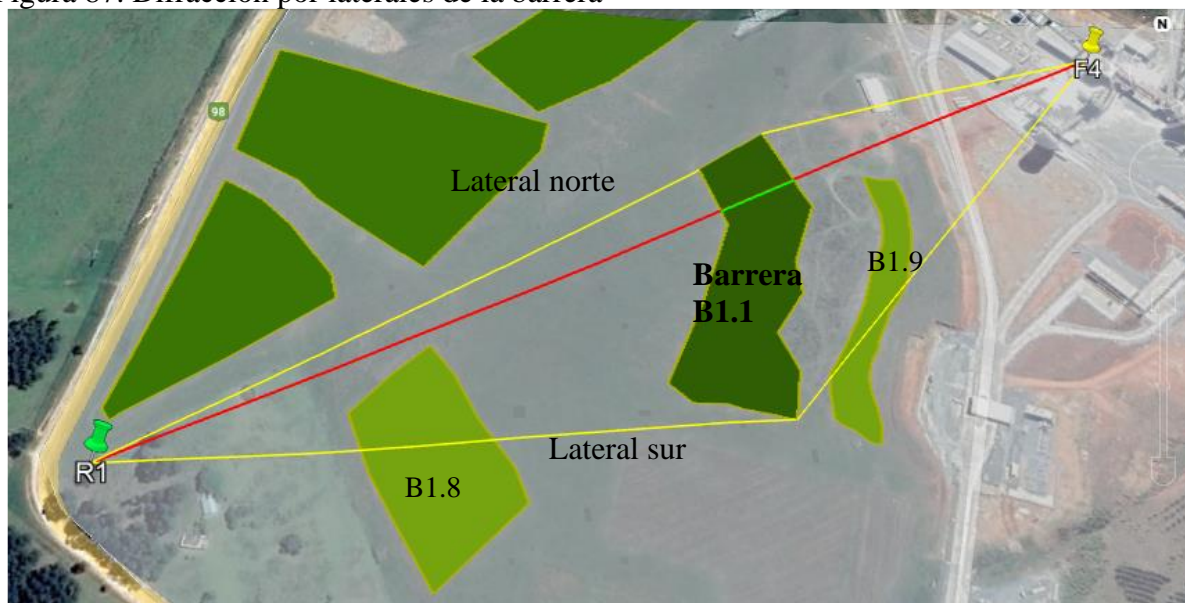
Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{z, eq}$ (dB)								$L_{Aeq}$ (dB)
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1 medido	52,1	43,5	45,2	45,4	40,5	40,8	38,3	30,9	47,7
NPS directo (sin la barrera)	66,7	50,1	47,8	52,2	56,3	54,1	43,0	32,9	59,5
IL usando exp. Hoover	2,4	3,1	3,8	4,8	6,1	7,7	9,7	12,2	
NPS esperado en R1	66,3	47,0	44,0	47,4	50,2	46,4	34,3	24	53,1

#### 7.5.4.2.5 *Difracción por los bordes de la barrera vegetal*

Cuando se calcula una barrera acústica, no solo se debe considerar la difracción del borde superior (cresta), sino también la difracción por los laterales de la barrera, dado que esta no es infinita. La difracción generada en los laterales de la barrera, deben considerarse en la atenuación de sonido e incluirse en el cálculo de los niveles de presión de sonido esperados en el receptor R1.

En la Figura 87 se muestra un esquema ilustrativo de la barrera y sus laterales. Dado que los caminos laterales no son simétricos, cada uno de ellos se analizará por separado, lateral norte y lateral sur.

Figura 87. Difracción por laterales de la barrera



Nota. Fuente: Ilustraciones sobre imágenes del Google Earth 2021

#### Lateral Norte

Cuando se utiliza el enfoque de Kurze-Anderson o de barrera gruesa, los niveles de presión de sonora calculados en el receptor R1 fueron más bajos que el ruido de fondo medido, por lo cual se considera que la difracción por este lateral va a ser despreciable.

#### Lateral Sur

En lo que respecta al lateral sur, en la Figura 87 se observa que en el recorrido del sonido, antes de llegar al borde la barrera B1.1 por el lateral sur, tuvo que atravesar otra plantación identificada como B1.9, en una longitud de 110 m. Es una plantación de *Eucalyptus cinerea*, otra especie de *Eucalyptus* menos densa y de menor altura existente en el lugar. Después, en el mismo camino de la propagación y antes de llegar al receptor R1, debe atravesar otra área más densamente plantada de *Eucalyptus dunnii* en una longitud de 85 m y que se identifica en la Figura 87 como B1.8.

Este camino complejo puede imponer una atenuación mayor que la barrera de un solo grupo de árboles como es la barrera de interés B1.1. Incluso si no existen métodos simplificados para calcular los niveles de presión sonora en el receptor en este caso, los bajos niveles de presión sonora obtenidos en el lado norte permiten esperar resultados insignificantes en el receptor.

Respecto a los cálculos realizados cuando solo opera la fuente F4, y calculando la atenuación por la barrera vegetal B1.1, en la Tabla 69 se resumen los resultados obtenidos.



Tabla 69- Resumen IL barrera B1.1

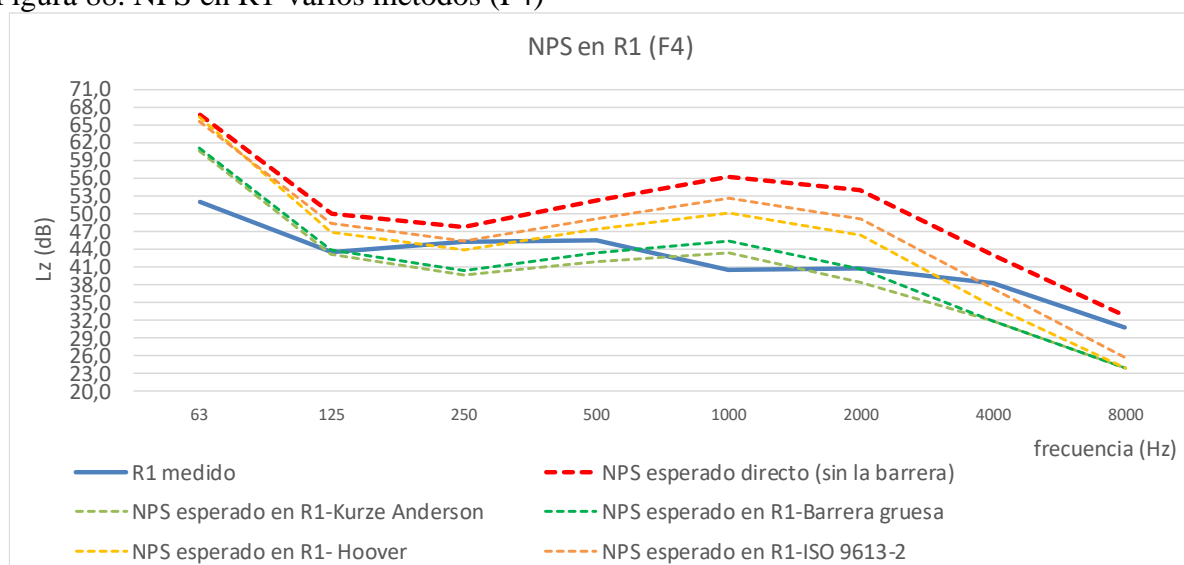
Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_z$ eq (dB)								$L_{Aeq}$ (dB)
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
R1 medido	52,1	43,5	45,2	45,4	40,5	40,8	38,3	30,9	47,7
NPS directo (sin la barrera)	66,7	50,1	47,8	52,2	56,3	54,1	43,0	32,9	59,5
NPS esperado en R1-Kurze Anderson	60,7	43,2	39,6	41,9	43,4	38,3	32	24	46,5
NPS esperado en R1-Barrera gruesa	61,2	43,9	40,5	43,3	45,3	40,7	32	24	48,3
NPS esperado en R1- Hoover	66,3	47,0	44,0	47,4	50,2	46,4	34,3	24	53,1
NPS esperado en R1-ISO 9613-2	65,5	48,3	45,4	49,1	52,6	49,2	37,5	25,6	55,5

*Nota.* Resultados del NPS esperado en R1, calculando las pérdidas de inserción de la barrera de árboles por distintos métodos y organizados de menor a mayor en  $L_{Aeq}$  (dB)

Al comparar los datos medidos en R1 y los valores calculados con propagación directa, pero sin considerar la presencia de árboles, aparece una atenuación extra de aproximadamente 12 dB, lo que fue el punto de partida para analizar el comportamiento acústico de la Barrera B1.1 que se interpone entre la fuente F4 y el Receptor R1.

En la Figura 88 se muestran estos resultados gráficamente.

Figura 88. NPS en R1-varios métodos (F4)



### 7.5.5 Análisis de resultados

*Caso 1.* Cuando operan solo las fuentes cercanas F3 y F4.

Si solo están operando las fuentes cercanas F3 y F4, el valor medido en R1 de  $L_{Aeq}$  es de 46,1 dB y el valor esperable (calculado) en R1 sin tener en cuenta la atenuación por presencia de árboles es de 55,5 dB. Esto indica que los valores difieren en 9 dB y las mayores diferencias se presentan en las frecuencias de 63 Hz con 10 dB y en 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 Hz, con 11; 12; 11 y 8 dB respectivamente en  $L_z$ .



El valor esperable en R1 en LAeq considerando atenuación del follaje de los árboles calculada según ecuación de Hoover es de 48,8 dB, por lo que difiere del valor medido en 3 dB. Las mayores diferencias se presentan en las frecuencias de 63 Hz con 7 dB y en 1.000, 2.000, Hz, con 5 y 4 dB respectivamente en Lz

Con base en los resultados se tiene que hay una diferencia de 7 dB entre lo calculado sin cortina de árboles y con presencia de la cortina de árboles B1.1, confirmando que existe una atenuación atribuible a la presencia de la vegetación entre las Fuentes F3 y F4 y el receptor R1.

*Caso 2. Cuando operan solo las fuentes lejanas F1 y F2, el valor medido en R1 = 45,6 dB.*

Si solo están operando las fuentes sonoras lejanas F1 y F2, el valor medido en R1 LAeq es de 45,6 dB y el valor esperable (calculado) en R1 sin tener en cuenta la atenuación por presencia de árboles es de 49,2 dB, es decir que difiere del valor medido en 4 dB. Las mayores diferencias se presentan en las frecuencias de 1.000, 2.000, y 4.000 Hz, con 4, 5 y 5 dB respectivamente en Lz.

El valor esperable en R1 considerando la atenuación del follaje de los árboles calculada según ecuación de Hoover es de 30,6 dB, valor que difiere del medido en 15 dB siendo el medido, mayor que el calculado.

Con base en estos resultados se observa que cuando solo operan las Fuentes F1 y F2, existe una atenuación del sonido por presencia de las cortinas de árboles, pero que los métodos utilizados para determinarla sobreestiman esta atenuación hasta el punto que los valores resultantes son menores que el valor medido. Esta situación puede tener su origen en que estas fuentes están demasiado lejos del Receptor (más de 1.000 m), y que hay en el camino de la propagación varias cortinas de árboles interpuestas lo que le agrega otros factores al análisis. En la Figura 79, se observa que los valores medidos y los valores calculados sin considerar la atenuación por la presencia de la cortina de árboles ya eran muy próximos, por lo cual era de esperarse que considerando la atenuación, los resultados serían inferiores.

*Caso 3. Cuando operan las fuentes principales: F1, F2, F3, F4, el valor en R1= 49,6 dB*

Cuando operan todas las fuentes sonoras, el valor medido en LAeq en R1 es de 49,6 dB y el valor esperable (calculado) en R1 sin considerar una atenuación por presencia de árboles es de 56,2 dB, es decir que difiere del valor medido en 7 dB. Las mayores diferencias se presentan en las frecuencias de 63 Hz con 9,4 dB y en 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 Hz, con 8, 1, 9, 7 y 3 dB respectivamente en Lz.

El valor esperable en R1 teniendo en cuenta la atenuación del follaje calculada según ecuación de Hoover es de 48,8 dB, es decir que difiere del valor medido en -0,8 dB, indicando que se llega prácticamente al valor medido.

Con base en estos resultados se tiene que hay una diferencia de 7 dB entre lo calculado sin cortina de árboles y con presencia de las cortinas de árboles (B1.1, B1.2, B1.3 y B1.4) confirmando que existe una atenuación atribuible a la presencia de la vegetación donde la cortina de árboles que tiene mayor incidencia es la B1.1 que interfiere con el sonido proveniente de la fuente F4 (molino).

Adicionalmente se concluye que aún persiste una diferencia de 6,7 en 63 Hz que no ha podido ser explicada o atribuida a los factores analizados.

*Caso 4. Cuando solo opera la Fuente F4, el valor en R1=47,7 dB*

Cuando solo opera la fuente F4, el valor medido en R1 en  $L_{Aeq}$  es de 47,7 dB y el valor esperable (calculado) en R1 sin considerar atenuación por la presencia de árboles es de 59,5 dB, es decir que existe una atenuación extra de aproximadamente 12 dB en ponderación A. La diferencia de frecuencias de 1.000 Hz y 2.000 Hz fue aún mayor: 15 dB y 13 dB, respectivamente en  $L_z$ . Para frecuencias de 500 Hz e inferiores, también existen diferencias, pero no tan grandes como las mencionadas anteriormente. Esta atenuación del sonido podría deberse a la presencia de la barrera de árboles B1.1.

Se probaron cuatro opciones para calcular la atenuación sonora proporcionada por la barrera verde: Aproximación de Kurze-Anderson, enfoque de barrera gruesa, Expresión de Hoover y la incluida en la Norma ISO 9613-2 para barreras vegetales

Kurze-Anderson y el enfoque de barrera gruesa dieron una buena predicción del NPS en el receptor R1, tanto en bandas de octava como para valores ponderados A, especialmente para frecuencias entre 1.000 Hz y 4.000 Hz, donde los resultados sin considerar la atenuación de la barrera del árbol fueron los menos precisos. Agregar la difracción lateral no mejoró los resultados calculados en este caso.

El mejor método para calcular las pérdidas de inserción (IL) de la barrera verde fue el enfoque de barrera gruesa y el segundo en precisión fue Kurze-Anderson. El enfoque de ISO 9613:2 fue el menos preciso, peor que el enfoque de Hoover.

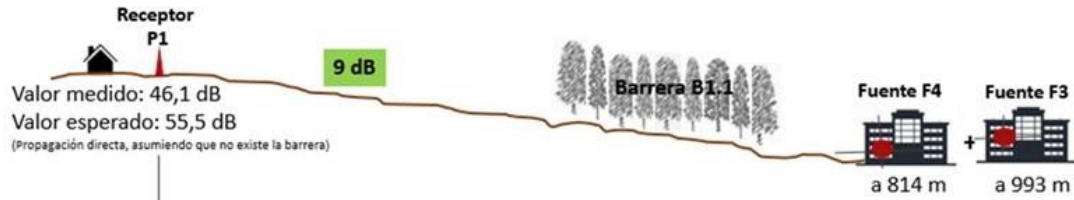
Es posible que la gran distancia entre la fuente y el receptor -y también la gran distancia entre la fuente y la barrera verde, haga que la barrera se comporte como si fuera un obstáculo sólido, mientras que los efectos de hojas y dosel se vuelven inapreciables.

De manera general y una vez analizado los cuatro casos en función de distintas condiciones operativas es posible afirmar que la barrera vegetal B1.1 interpuesta entre las distintas fuentes y el Receptor R1 está actuando como una barrera acústica, con una atenuación entre 9 y 12 dB. Lo anterior si se descarta la condición de las fuentes lejanas, que como ya fuera mencionado al tratarse de distancias tan largas es posible la aparición de otros factores que no hayan sido considerados.

En la Figura 89 se muestran esquemas con los principales resultados obtenidos en cada condición, sin considerar que hubiera un efecto de la barrera de árboles y en la Figura 90, se observan estos mismos esquemas, pero una vez se ha calculado el efecto de la barrera de árboles, donde los valores de los NPS obtenidos, son similares a los valores esperados.

Figura 89. Resultados obtenidos sin considerar efecto de la barrera de árboles

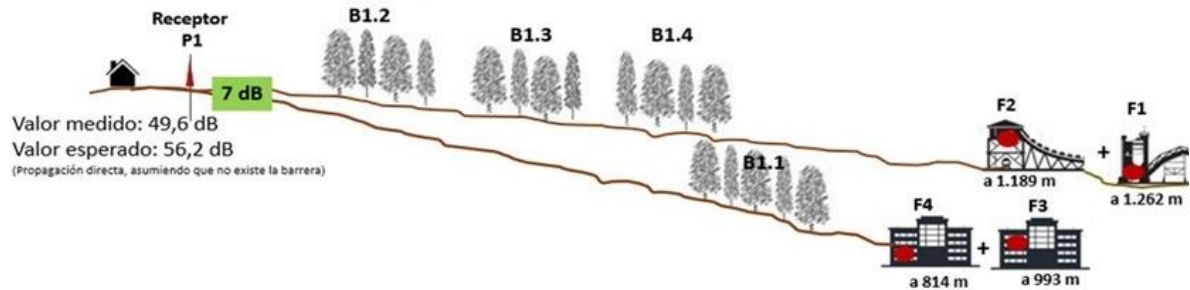
**Condición 1: fuentes sonoras cercanas**



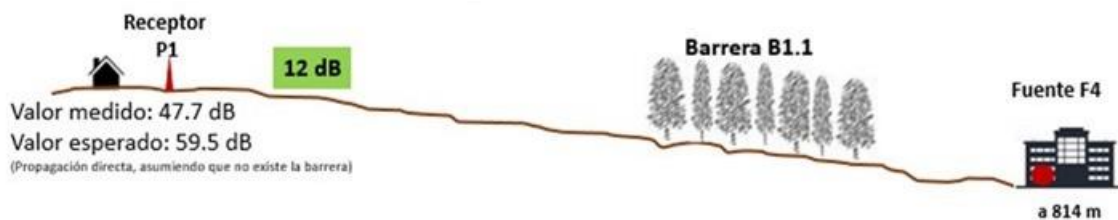
**Condición 2: fuentes sonoras lejanas**



**Condición 3: todas las fuentes operando**



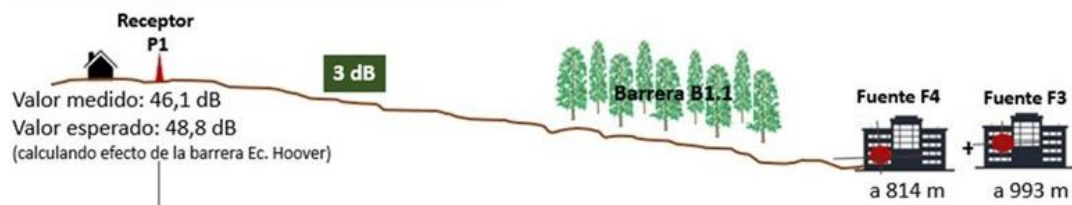
**Condición 4: Solo una fuente: F4 (más cercana)**



Nota. Sin escala.

Figura 90. Resultados obtenidos considerando efecto de la barrera de árboles

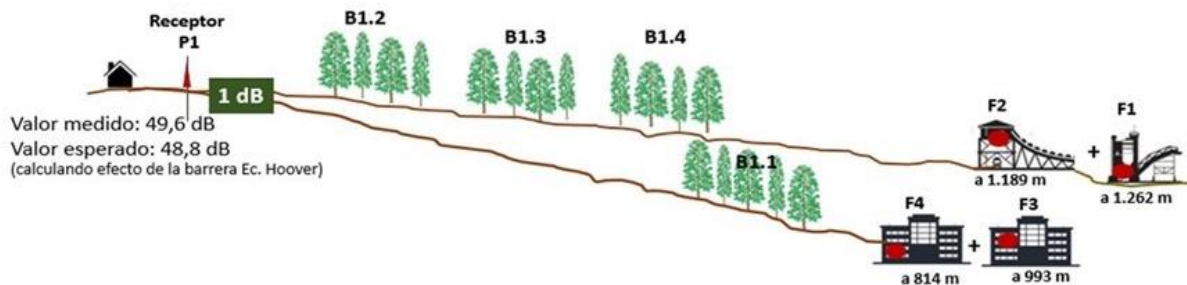
**Condición 1: fuentes sonoras cercanas**



**Condición 2: fuentes sonoras lejanas**



**Condición 3: todas las fuentes operando**



**Condición 4: Solo una fuente: F4 (más cercana)**



Nota. Sin escala.

## 7.6 ESTUDIO DE LA BARRERA 2

Como fuera mencionado, la barrera 2 es una cortina pequeña de 0,77 ha, con una profundidad variable entre 14 y 74 m en su parte más profunda y con un ancho entre 100 y 140 m. Se encuentra ubicada cerca de las fuentes sonoras F1 y F2.

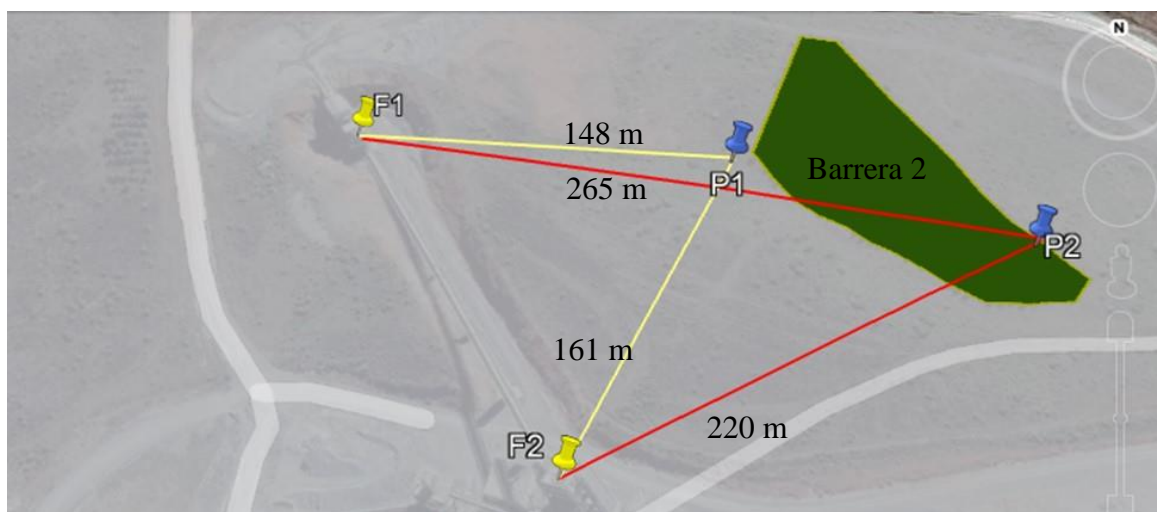
El objetivo de este análisis es verificar si esta cortina está generando atenuación del sonido, para lo cual se analizan dos casos. El caso 1 incluye los puntos de control P1 y P2, antes y después de la cortina de árboles, mediciones realizadas en 2020, y el caso 2 con dos puntos de control P3 y P4 antes y después de la cortina de árboles respectivamente cuyas mediciones fueron realizadas en 2021.

Se calculó el NPS esperable en P2 y P4 sin tener en cuenta la presencia de los árboles y calculando la atenuación generada por el follaje según la metodología presentada en la Norma ISO 9613-2 y según la ecuación de Hoover.

### 7.6.1 Caso 1: Analizando los puntos de control P1-P2

En la Figura 91 se muestra una ilustración de los puntos de control P1 y P2 en relación con la barrera de árboles B2 y a las fuentes sonoras.

Figura 91. Barrera 2-Puntos P1 y P2



*Nota.* Ilustraciones realizadas sobre imágenes de Google Earth 2021

#### 7.6.1.1 NPS en P1 (antes de la barrera)

Se calcula el NPS esperable en el Punto P1 ubicado antes de la barrera a fin de verificar la coherencia de las mediciones.

En este escenario solo estaban operativas las fuentes sonoras F1 y F2. Se cuenta con una medición directa de F2 (F2-04) realizada el mismo día de las mediciones en P1 y P2. y cuyo resultado fue presentado en la Tabla 19.

En cuanto a F1 se toma el espectro calculado con base en varias mediciones, que como fuera presentado en el ítem 7.4.3 es representativo de las condiciones operativas de F1.

Las condiciones atmosféricas registradas son 16,7 °C de temperatura y 50,9 % de humedad relativa.

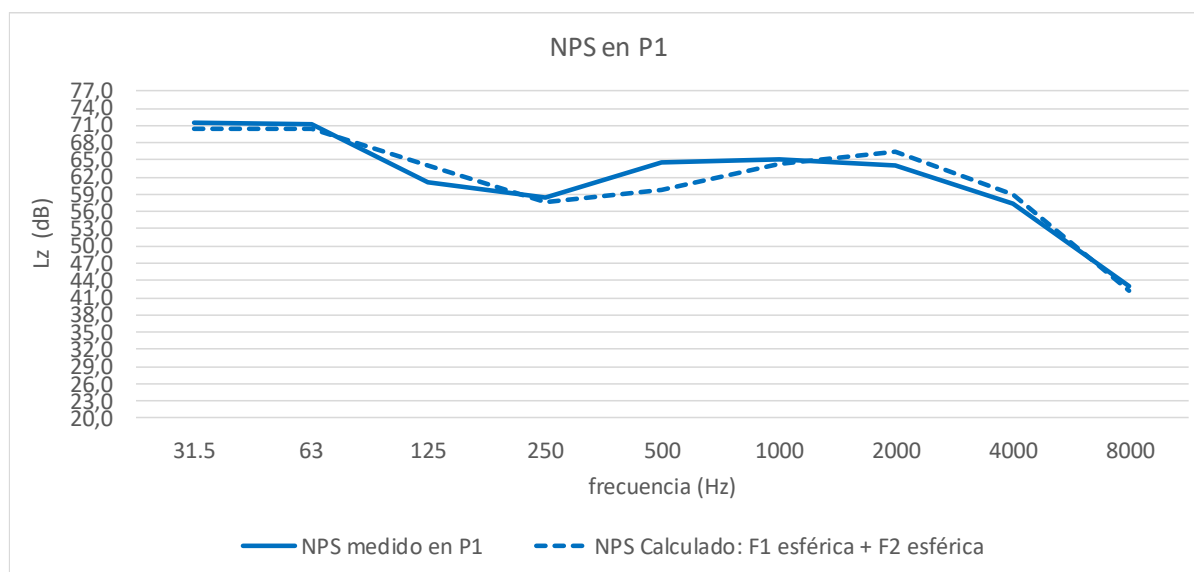
En la Tabla 70 se muestran los resultados obtenidos. El NPS en P1 calculado con las ecuaciones de propagación es 70,1 dB y el valor medido en sitio es 69,4 dB en ponderación A, es decir que es prácticamente el mismo valor. En cuanto a las diferencias en las bandas de octava, la mayor diferencia se presenta en 500 Hz donde el valor medido (64,6 dB) resultó mayor al calculado (59,7 dB) en 5 dB en Lz.

Tabla 70- NPS total en P1 (antes de la barrera 2)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{z,eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-P1	65,8	67,0	60,8	50,1	53,7	57,2	56,5	45,6	25,5	61,3
F2-P1	68,4	67,6	61,3	56,7	58,4	63,5	65,9	58,8	42,0	69,5
F1+F2	70,3	70,3	64,1	57,6	59,7	64,4	66,4	59,0	42,1	70,1

En la Figura 92 se muestra gráficamente el valor medido y el calculado o esperable en P1.

Figura 92. NPS medido y calculado en P1



Con base en el resultado obtenido en el punto P1, ubicado antes de la cortina de árboles, donde el valor medido es similar al valor esperable o calculado, se concluye que hay coherencia en los resultados obtenidos y se procede a verificar cuál es la situación en el punto P2 ubicado después de la cortina de árboles. El objetivo es determinar si hay o no una posible atenuación por la presencia de esta cortina de árboles que se ha denominado Barrera 2.

### 7.6.1.2 NPS en P2 (después de la barrera), sin atenuación del follaje

En la Tabla 71 se muestran los valores de NPS que llegan a P2, tanto los valores calculados como el valor medido en sitio. Los cálculos incluyen la divergencia geométrica, la atenuación generada por la absorción atmosférica, y la atenuación por efecto del suelo en el camino de propagación directa de cada fuente hasta P2.

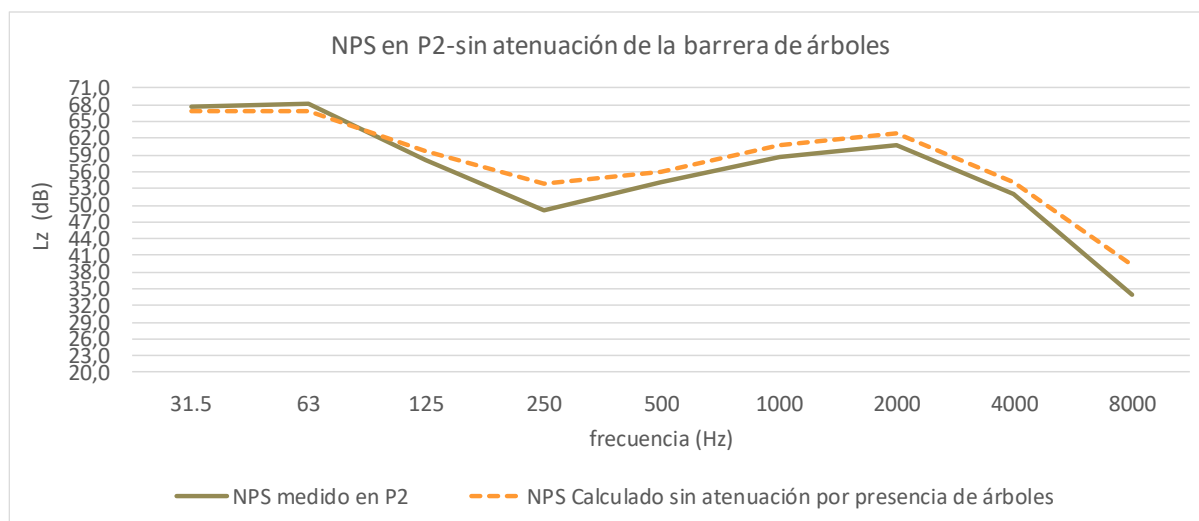
Tabla 71- NPS total en P2 (después de la barrera) sin atenuación del follaje

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{z\ eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-P2	61,1	62,2	53,6	42,7	46,7	50,5	49,2	35,2	19,4	54,2
F2-P2	65,7	64,9	58,3	53,6	55,3	60,5	62,6	54,0	39,3	66,1
Valor calculado: F1+F2	67,0	66,8	59,6	53,9	55,9	60,9	62,8	54,1	39,4	66,3
Valor medido (P2-20)	67,8	68,1	58,2	49,1	54,3	58,7	60,8	52,1	33,9	64,3
Diferencia	0	-1	1	5	2	2	2	2	5	2,0

Una vez aplicadas las ecuaciones de propagación a partir de las fuentes F1 y F2 que estaban operativas en el momento de las mediciones, el NPS resultante  $L_{Aeq}$  en P2 es de 66,3 dB, valor que no incluye atenuación por la cortina de árboles. El valor medido en sitio  $L_{Aeq}$  es 64,3 dB por lo cual se tiene una diferencia de 2 dB entre lo medido y lo calculado. Las mayores diferencias se presentan en las bandas de 250 y 8.000 Hz con 5 dB de diferencia en cada una de las bandas en  $L_z$ .

En la Figura 93 se muestran los resultados gráficamente.

Figura 93. NPS en P2-sin atenuación por el follaje



Este resultado indica que, sin tener en cuenta la presencia de la Barrera 2, el valor calculado en P2 es muy similar el medido en sitio, y no aparece una atenuación extra significativa que pueda adjudicarse a la cortina de árboles.

Pese a lo anterior se calcula cuál sería el valor esperable determinando una posible atenuación por el follaje de los árboles a partir de las ecuaciones planteadas en la ISO 9613-2 y según la ecuación de Hoover, como se ha venido trabajando a través de la investigación.



### 7.6.1.3 NPS en P2 (después de la barrera), con atenuación del follaje

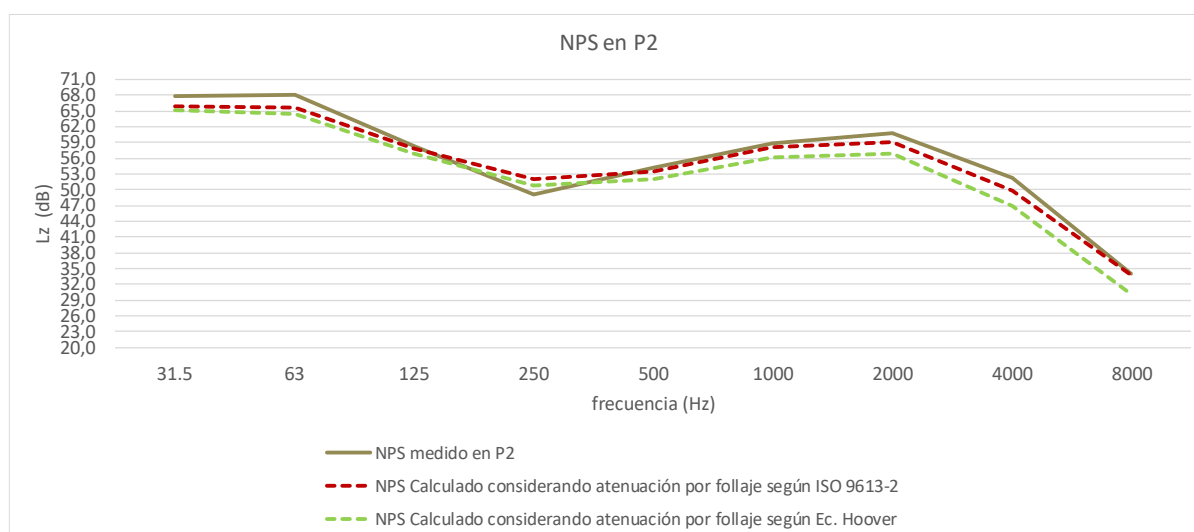
En la Tabla 72 se presentan los resultados del valor esperable en P2 teniendo en cuenta una posible atenuación por el follaje.

Tabla 72- NPS en P2 con atenuación por el follaje

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{z,eq}$ (dB)										$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000		
P2 calculado con atenuación follaje ISO 9613-2	65,8	65,5	57,9	52,0	53,4	58,0	59,0	49,9	33,9	62,9	
P2 calculado con atenuación follaje Hoover	65,2	64,4	56,8	50,9	51,9	56,1	56,9	46,8	30,2	60,9	

Los dos resultados obtenidos son menores a lo medido en sitio (64,3 dB). En la Figura 94 se muestran gráficamente los resultados obtenidos.

Figura 94. NPS medido y calculados en P2 con atenuación del follaje



Con base en estos resultados se ratifica lo expuesto en el ítem 7.6.1.2, respecto a que no se está generando una atenuación significativa por la presencia de la cortina de árboles en el punto P2. En 250 Hz se obtuvo una reducción entre 0,8 dB, calculado con la Ec. de Hoover y 2,0 dB calculado con la Ec. de la ISO 9613-2.

Se debe tener en cuenta que, por la ubicación, P2 está más protegido de la fuente F1, pero más expuesto a la Fuente F2. La fuente F2 está ubicada en altura, a 17 m del suelo, mientras que la Fuente F1 está ubicada a 2,0 m; la distancia total F2-P2 (220 m) es menor que F1-P2 (265 m) y la profundidad de la vegetación en el camino directo de la propagación F2-P2 (45,6 m) también es menor que F1-P2 (97,2 m). Todos estos factores contribuyen a que la eficiencia de la barrera 2 con respecto al punto de control P2 sea mínima.

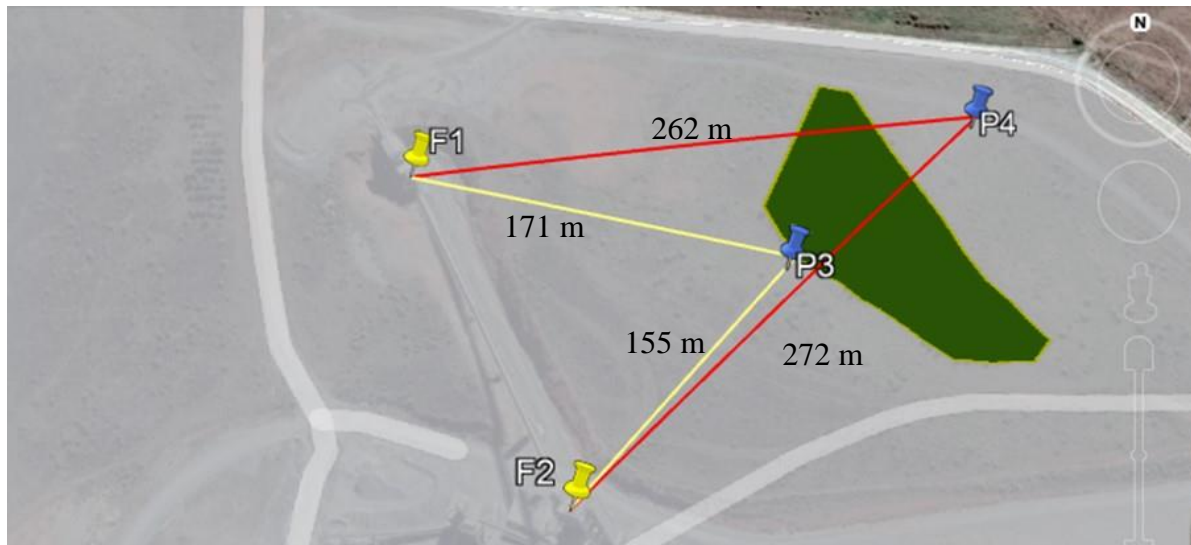


### 7.6.2 Caso 2: Analizando los puntos de control P3-P4

Las mediciones en P3 y P4 fueron presentadas en la Tabla 34. Las condiciones atmosféricas registradas son 16,7 °C de temperatura y 50,9 % de humedad relativa.

En la Figura 95 se muestra una ilustración de los puntos de control P3 y P4 en relación con la barrera de árboles B2 y a las fuentes sonoras. La distancia entre los Puntos P3 y P4 es de 119 m.

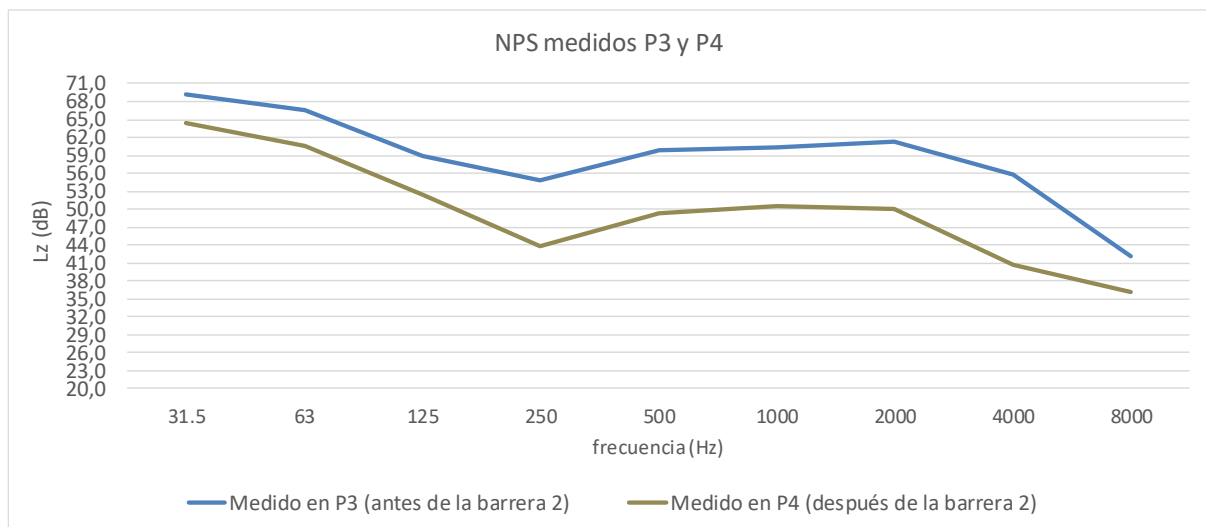
Figura 95. Barrera 2- Puntos P3 y P4



Nota. Ilustraciones realizadas sobre imágenes del Google Earth 2021

En la Figura 96 se muestran gráficamente las mediciones realizadas en los puntos P3 y P4, donde se observa que, a partir de la banda de 250 Hz, las diferencias respecto a lo medido en P3 se incrementan. Por lo anterior se procede a analizar si estas mayores diferencias son generadas por la atenuación de la cortina de árboles.

Figura 96. NPS medidos en P3 y P4



### 7.6.2.1 NPS en P3 (antes de la barrera)

Se calcula el NPS esperable en el Punto P3, ubicado antes de la barrera, a fin de verificar la coherencia de las mediciones. En el período de las mediciones solo se encontraban operativas las fuentes F1 y F2, pero no se tiene medición directa de las fuentes en este día, por lo que se trabaja a partir del espectro de F1 y de la medición F2-04 utilizada para chequear los Puntos P1 y P2, cuyos resultados se presentaron en la Tabla 19 y que fue realizada en un momento donde no operaban las fuentes F3 y F4 por lo cual es representativa de la condición que se necesita para esta evaluación.

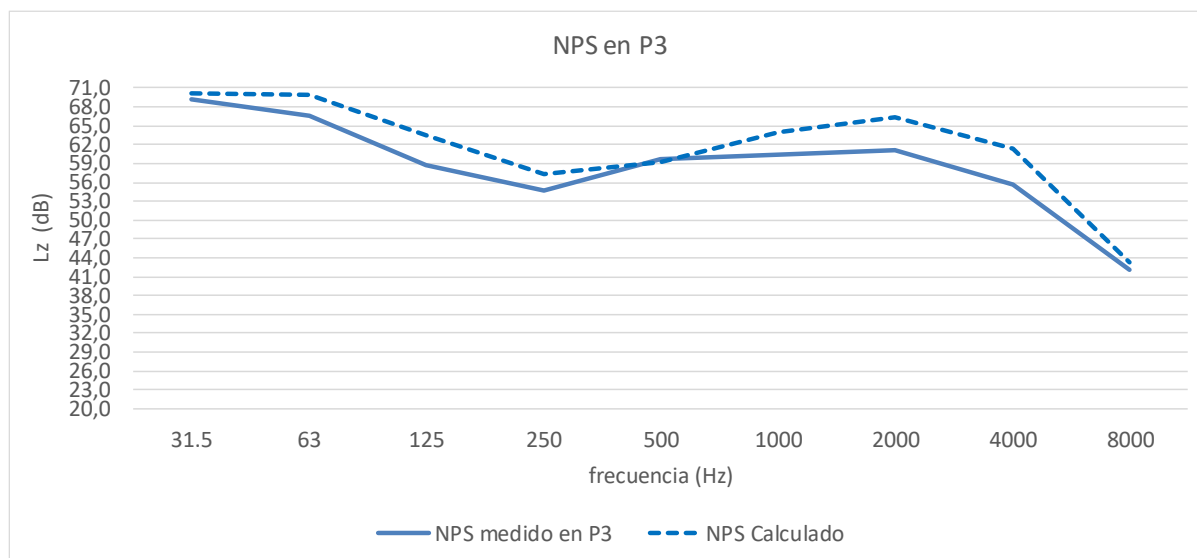
En la Tabla 73 se muestran los resultados obtenidos. El NPS en P3 calculado con las ecuaciones de propagación en  $L_{Aeq}$  es 70,2 dB y el valor medido en sitio es 65,8 dB, es decir que en este punto ya se tiene una diferencia de 4,4 dB antes de la barrera de árboles. En cuanto a las diferencias en bandas de octava, las mayores diferencias se presentan en 1.000 y 2.000 Hz con 5,3 y 5,6 dB respectivamente.

Tabla 73- NPS total en P3 (antes de la barrera 2)

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-P3	64,5	65,6	58,9	47,9	51,5	54,8	54,4	45,0	27,5	59,1
F2-P3	68,7	68,0	61,6	56,9	58,4	63,4	66,2	61,2	43,0	69,9
F1+F2	70,1	70,0	63,4	57,4	59,2	63,9	66,4	61,3	43,2	70,2

En la Figura 97 se muestra gráficamente el valor medido y el calculado o esperable en P3.

Figura 97. NPS medido y calculado en P3



Pese a que en el punto P3 ubicado antes de la cortina de árboles, existe diferencia entre lo medido y lo calculado para algunas frecuencias, se observa que el espectro es similar. Se procede a verificar cómo es el comportamiento del sonido del otro lado de la cortina de árboles para verificar si estas diferencias se mantienen después de la barrera o existe algún cambio

significativo en alguna frecuencia. Finalmente, se verifica cual sería el valor esperable si existe una atenuación por el follaje.

### 7.6.2.2 NPS en P4 (después de la barrera), sin atenuación del follaje

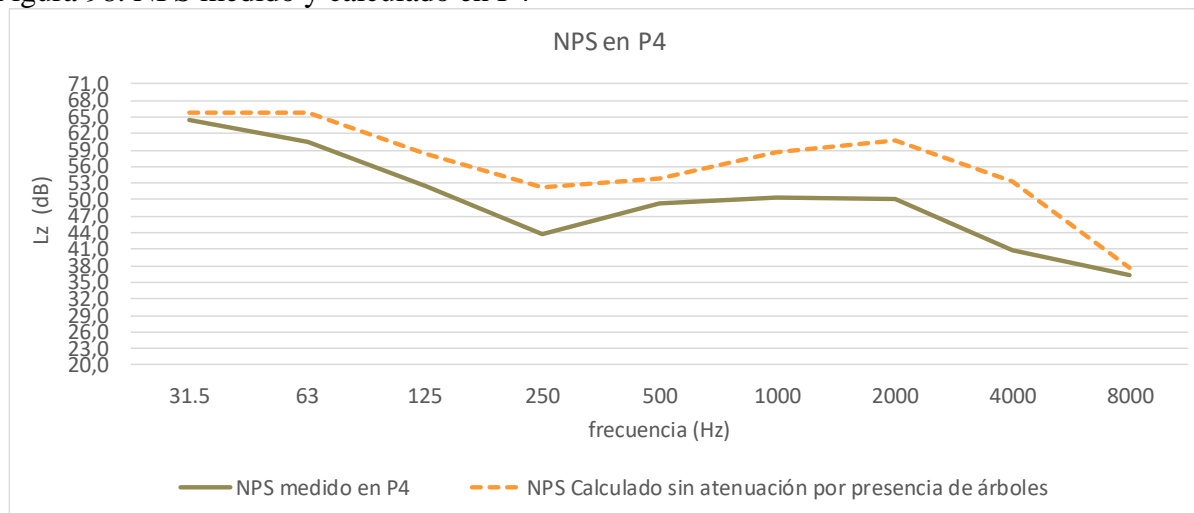
En la Tabla 74 se muestran los valores de NPS que llegan a P4, tanto los valores calculados como el valor medido en sitio. Los cálculos incluyen la divergencia geométrica, la atenuación generada por la absorción atmosférica, y la atenuación por efecto del suelo en el camino de propagación directa de cada fuente hasta P4.

Tabla 74- NPS total en P4 (después de la barrera) sin atenuación del follaje

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{z\ eq}$ (dB)									$L_{Aeq}$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
F1-P4	61,4	62,5	54,0	43,0	46,7	50,1	49,3	38,7	21,7	54,1
F2-P4	63,8	63,1	56,2	51,6	53,0	58,0	60,3	53,1	37,5	63,9
Valor calculado: F1+F2	65,8	65,8	58,2	52,1	53,9	58,6	60,6	53,3	37,6	64,3
Valor medido (P4-21)	64,3	60,5	52,5	43,8	49,4	50,4	50,1	40,8	36,2	55,0
Diferencia	1	5	6	8	4	8	11	12	1	9,3

Una vez aplicadas las ecuaciones de propagación a partir de las fuentes F1 y F2 que estaban operativas en el momento de las mediciones, el NPS resultante en P4 en  $L_{Aeq}$  de 64,3 dB, valor que no considera atenuación por la cortina de árboles. El valor medido en sitio en  $L_{Aeq}$  es 55,0 dB por lo cual se tiene una diferencia de 9,3 dB entre lo medido y lo calculado. Las mayores diferencias se presentan en las bandas entre 63 y 4.000 Hz con valores que van desde 5 hasta 12 dB como se observa en la Tabla 74. En la Figura 98 se muestran los resultados gráficamente.

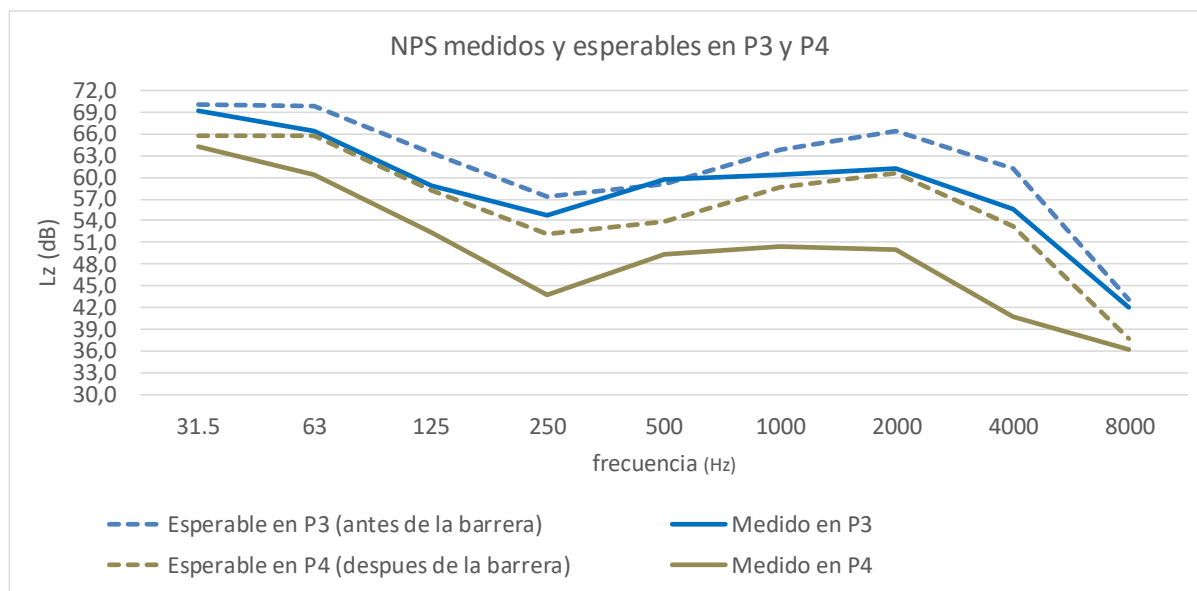
Figura 98. NPS medido y calculado en P4



Se observan diferencias entre lo medido y lo esperable en P4. Si se comparan las curvas de lo esperable en P3 (antes de la barrera) y lo esperable en P4 (sin tener en cuenta atenuación por el follaje) se observa que estas diferencias no se mantienen, si no que en P4 se incrementan para las bandas entre 250 y 4.000 Hz. Sin ser concluyente existe un indicio de la acción de la cortina de árboles para el punto de medición P4.

En la Figura 99 se presentan los valores medidos y esperables en los Puntos P3 y P4 sin tener en cuenta una posible atenuación de los árboles con el objetivo de verificar el comportamiento.

Figura 99. Valores medidos y esperables en P3 y P4



Se observa que existen diferencias entre lo esperable y lo medido tanto en el Punto P3 como en P4, pero en P4 estas diferencias se incrementan para las frecuencias de 250, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz

### 7.6.2.3 NPS en P4 (después de la barrera), con atenuación del follaje

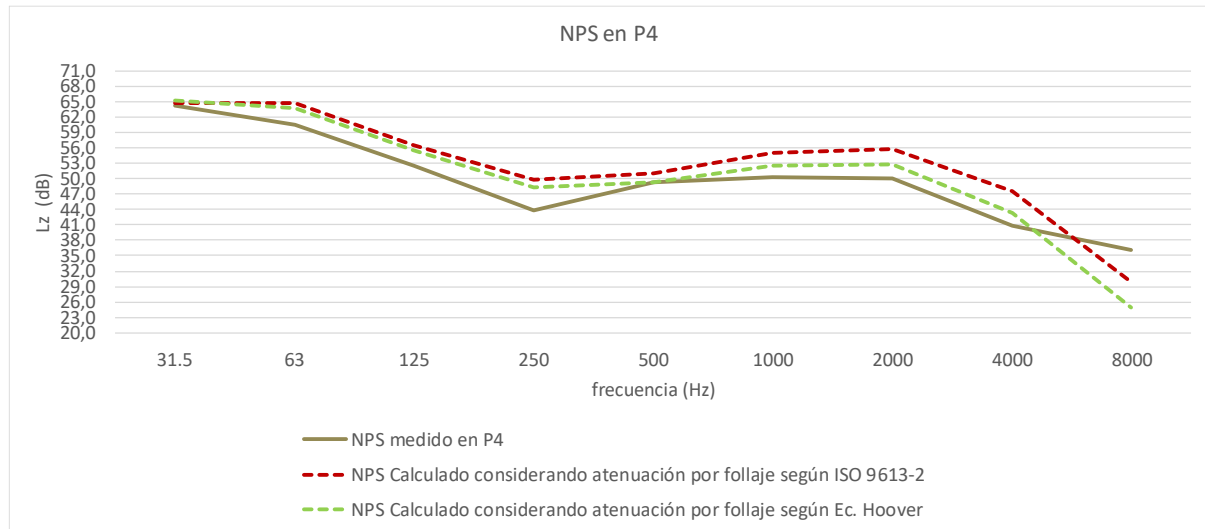
Se calcula el valor esperable en P4 considerando que existe atenuación por efecto del follaje y se compara con el valor medido. Los resultados se muestran en la Tabla 75.

Tabla 75- NPS en P4 con atenuación por el follaje

Identificación	Frecuencia (Hz) y $L_{Z\ eq}$ (dB)									
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	$L_{Aeq}$ (dB)
P4 calculado con atenuación follaje ISO 9613-2	64,7	64,8	56,6	49,7	50,9	55,0	55,7	47,5	30,0	59,8
P4 calculado con atenuación follaje Hoover	65,3	63,7	55,5	48,3	49,2	52,6	52,8	43,2	24,9	57,2
Diferencia de lo medido (P4-21) y lo calculado según Ec, Hoover	1	3	3	4	0	2	2	2	-11	2

En la Figura 100 se muestran gráficamente los resultados obtenidos.

Figura 100. NPS medido y calculados en P4 con atenuación por el follaje



Se observa que, si se calcula una posible atenuación por el follaje de los árboles, las curvas de lo esperable y lo medido en P4 se aproximan más que si no se considerara un efecto de la cortina de árboles. Adicionalmente se observa que la curva de lo esperable en P4 que más se aproxima a lo medido se obtiene al calcular la atenuación por el follaje según la ecuación de Hoover.

### 7.6.3 Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en el Punto P4, se estaría generando una atenuación por la presencia de la Barrera 2. A diferencia del caso con el Punto de control P2, este Punto P4 presenta una ubicación que lo protege más de la influencia de la Fuente F2 y lo deja más expuesto a la Fuente F1. Esto resulta favorable en el sentido de la atenuación del sonido si se tiene en cuenta que la fuente F2 está ubicada a 17 m sobre el terreno (en altura) y que según el espectro tiene un mayor valor en  $L_{Aeq}$  de 89,9 dB en relación con F1 que presenta un  $L_{Aeq}$  de 86,5 dB.

En el caso del punto de control P2, el espesor de la vegetación que protege el Punto es de 97,2 m y 45,6 m para el sonido que proviene de las Fuentes F1 y F2 respectivamente.

En el caso del punto de control P4, el espesor de la vegetación que protege el Punto es de 40,1 m y 64,6 m para el sonido que proviene de las Fuentes F1 y F2 respectivamente.

## 8 CONCLUSIONES

### *Generales*

Las barreras de árboles estudiadas fueron sembradas con el fin de mitigar el impacto sobre el paisaje del predio industrial, sin ningún tipo de diseño enfocado en la mitigación del ruido; sin embargo, se pudo verificar su comportamiento como barreras acústicas para atenuar el ruido ambiental generado por una industria. Esto, partiendo de aspectos fundamentales como son: estar ubicadas entre las fuentes y los receptores de interés, convirtiéndose en un obstáculo en el camino de la propagación directa, su creciente tamaño en altura y frondosidad, y algunas características propias de la plantación.

La Industria objeto del estudio está inmersa en una zona rural, alejada de viviendas o puntos habitacionales, sin actividad agropecuaria u otra importante cerca por lo cual, el sonido medido es el generado por la operación de la industria, sin interferencias de otros elementos externos. Para los casos en que se presentó tránsito de vehículos en las vías cercanas, este sonido pudo ser retirado y por tanto no está incluido en los resultados de las mediciones. El único ruido adicional incluido es el propio de la naturaleza, el cual, por tratarse de una zona rural, está relacionado con canto de aves, sonidos de las ranas, grillos y movimiento de las hojas de los árboles. Esta situación genera que los resultados de las mediciones sean muy representativos de las condiciones operativas y se minimice el error en los cálculos.

Desde el punto de vista metodológico, existe un aporte a destacar que es el obtener datos de las propiedades de la vegetación en un periodo de tiempo de cinco años y las mediciones conjuntas, tanto acústicas como meteorológicas, durante dos años en un trabajo en exteriores.

La toma de datos de la Plantación incluye un amplio rango de tiempo (2016 a 2021). En 2016 se hizo la Plantación y a mediados de este año comenzó a operar la Industria. Las mediciones para evaluar el comportamiento de los árboles como barrera acústica se realizaron a partir del año 2019 con alturas medidas de los árboles entre 8,5 y 11,0 m. Se realizaron mediciones mensuales lo que conllevó a tener un volumen de información importante que fue necesario clasificar y depurar en función de las condiciones de operación en cada caso. De esto, es posible afirmar que el trabajo de campo en sí mismo enriquece la investigación, pero tiene la dificultad de tener que manejar muchas variables a la vez, no solo de tipo operativo, sino variables climáticas, humanas, distinto a si se tratara de un trabajo en laboratorio o en condiciones controladas. De todas maneras, los hallazgos permiten comprender los fenómenos que actúan ante la presencia de obstáculos, concluir respecto al efecto de atenuación, en este caso de cortinas de árboles y, de manera general, validar metodologías existentes.

Al ser identificado el conjunto de árboles como un obstáculo entre una fuente y un receptor, se generan los fenómenos de reflexión, difracción, dispersión, y absorción. Cuantificar la contribución de cada uno de estos fenómenos y su combinación en la atenuación del ruido para un caso de estudio en exteriores presenta una dificultad importante ya que aún no se cuentan con soluciones simples aplicables. En este caso de estudio y con base en la información que fue posible medir o determinar por algún método, se calculó la atenuación total generada por la presencia de los árboles en su conjunto y por bandas de octava, es decir el efecto de la combinación de todos los fenómenos dados, sin disgregar el aporte de cada uno de los fenómenos.

Los niveles de presión sonora obtenidos a partir de la aplicación de las ecuaciones de la Norma ISO 9613-2 y de Hoover, para el cálculo de la atenuación por el follaje, son diferentes de los medidos en sitio, pero la diferencia no es mayor de lo que se esperaría, considerando la cantidad de variables que intervienen en la propagación del sonido en exteriores.

En el período del estudio las hojas de los árboles medían entre 21 y 30 cm de longitud que corresponden a una longitud de onda de 1.100 y 1.600 Hz. De acuerdo con la Bibliografía consultada, la dispersión del sonido se produce principalmente, cuando la longitud de onda del sonido que se propaga es menor que alguna de las dimensiones características del obstáculo que se encuentre en su trayectoria. En este caso de estudio, las hojas de los árboles deberían generar atenuación en las frecuencias a partir de 2.000 Hz donde la longitud de onda del sonido es mucho menor que la longitud de las hojas. Cuando se compara lo medido y lo esperable en R1 se tienen diferencias notorias en estas frecuencias de 2.000 y 4.000, e incluso desde 1.000 Hz, que luego serían explicadas a través del cálculo de la atenuación por el follaje según los dos métodos.

En cuanto a los troncos de los árboles, el diámetro a la altura del pecho (DAP) fue de 14,6 a 20,1 cm para la barrera B1 y de 13,4 a 23,3 cm para la barrera B2. Estas dimensiones corresponden a las longitudes de onda correspondientes al rango de 1.500 a 2.600 Hz. Lo anterior significa que los troncos de los árboles contribuyeron a la atenuación del sonido en las frecuencias a partir de 4.000 Hz, donde la longitud de onda del sonido es mucho menor que las dimensiones de los troncos, generando dispersión del sonido en todas las direcciones. Esto se observa en la Barrera 1 donde los valores calculados en las frecuencias de 4.000 y 8.000 Hz dieron menor a lo efectivamente medido, verificando la atenuación es dichas frecuencias, y en la Barrera 2, en el punto de control P4, donde el valor esperable en 8.000 Hz también es menor al medido en sitio, constatando la atenuación.

Cada caso de estudio es particular por lo cual es muy común observar conclusiones que se contradicen entre sí o que tienen resultados que llevan a conclusiones diferentes, como es el caso de la propagación del sonido en exteriores y en presencia de árboles como obstáculos. En algunas investigaciones se encuentra que el efecto de la vegetación en la atenuación del ruido es insignificante si no se tiene un área de vegetación importante, incluso algunos estudios mencionan que el efecto solo es apreciable a partir de los 100 m de profundidad de barrera. Con base en este estudio, se puede afirmar que el comportamiento de una barrera vegetal es variable y su eficacia como elemento atenuador del sonido depende de varios factores además de sus dimensiones, como son la configuración de la plantación, la distancia respecto a la fuente y las propiedades físicas de la especie en cuanto al tallo, hojas y su follaje en general. En el caso de la barrera 2 se observó que sirve como elemento atenuador para el punto P4, pero tiene muy poca eficiencia para el punto P2.

La cortina de árboles B1.1 interpuesta entre las Fuentes F3 (zaranda), F4 (molino) y el Punto R1, tiene una profundidad de 64 m y se evidenció una atenuación de 9 dB debida a la presencia de la cortina de árboles. En la condición operativa cuando solo operan F3 y F4, el valor esperable en el Punto R1 es de 55 dB y el valor medido equivalente es de 46,1 dB. Se menciona el efecto de la masa vegetal, puesto que las mayores diferencias se presentan en altas frecuencias a partir de 1.000 Hz y es en estas donde se verificó el efecto del follaje. Cuando se estudió el comportamiento de la barrera B1.1 solo operando la fuente F4 que es considerada una fuente cercana a R1, la atenuación de la barrera es de 12 dB, condición que podría denominarse como su mejor desempeño acústico.

La cortina de árboles B2 genera atenuación del sonido en el camino de la propagación hacia el Punto de control P4, pero no presenta ningún efecto en el camino de propagación hacia el Punto de control P2. La diferencia en los resultados se debe a la ubicación de los puntos P3 y P4 respecto a las fuentes F1 y F2, y a que en esta cortina vegetal se tienen espesores de masa vegetal de menos de 50 m para cada una de las fuentes.

Si bien la plantación de este caso de estudio no fue diseñada ni mantenida de manera sistemática, para tener una estructura y composición adecuadas para atenuar el ruido, su contribución sigue siendo importante. Para que esta contribución sea más eficiente, se debe garantizar la densidad de las áreas, manteniendo el nivel de vegetación del suelo lo más alto que sea posible, para generar más densidad de la masa arbórea y se potencie la no visibilidad a través de la barrera, siempre atendiendo a las recomendaciones de la Dirección Nacional de Bomberos en lo relativo a seguridad para prevención de incendios.

### ***Sobre el Punto que no tiene barrera interpuesta con las fuentes sonoras***

Se contó con un punto receptor denominado R2, el cual recibe el sonido proveniente de las Fuentes F1, F2, F3 y F4 sin tener obstáculos en el camino de la propagación directa y por tanto no presenta barrera de árboles en el camino. Las mediciones en este punto indican que el ruido de la operativa de la industria no ha disminuido. Los valores máximos cuando todas las fuentes están operativas se mantienen relativamente constantes en 72,3 dB y los valores mínimos han tenido un aumento de 2 dB de 63 a 65 dB.

Se evaluó el mismo escenario cuando solo operan las fuentes cercanas F3 y F4 y la situación es similar. Los valores máximos se mantienen relativamente constantes en 65 dB y los mínimos han tenido un incremento de 2 dB, de 58 a 60 dB

Este dato es importante porque corrobora que la disminución de los niveles de presión sonora en el Punto R1 no obedece a cambios en la operativa, sino a otro aspecto que es la presencia de las cortinas de árboles antes del punto, cuyos árboles han incrementado su tamaño y follaje a través del tiempo, convirtiéndolas en una barrera vegetal.

### ***Sobre la barrera 1***

La barrera N° 1, ubicada al este del predio, está formada por un conjunto de cuatro cortinas de árboles que se interponen entre las principales fuentes de ruido y el Receptor R1 y que para efectos de este estudio se ha generalizado como barrera 1. Comprende un área forestada de 72.360 m<sup>2</sup> (7,2 Ha).

Cuando solo operan las fuentes cercanas F3 y F4, el valor esperable en R1 (55,5 dB) es mayor que los valores medidos en sitio para la totalidad de las mediciones realizadas y cuya diferencia varía entre 7,5 y 14,9 dB. Calculando el valor equivalente de las mediciones realizadas (46,1 dB), la diferencia con lo esperable en R1 (55,5 dB) es de 9 dB, con diferencias importantes en 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 Hz. La disipación de energía en estas frecuencias es explicada a través de la atenuación por el follaje de los árboles, quedando aún diferencias en 63 Hz que no pudieron ser justificadas.

Cuando solo operan las fuentes lejanas F1 y F2, el valor esperable en R1 calculado (49,2 dB) es mayor que el valor medido en sitio (46,2 dB), es decir hay una atenuación total de 4 dB debidos a algún mecanismo. Las diferencias se presentan en las frecuencias de 1.000, 2.000 y 4.000 Hz. Este resultado ya es un indicativo de que existe una atenuación generada pero que



no es del orden de la atenuación generada cuando se evalúa el sonido que proviene de F3 y F4 únicamente. Al calcular el valor esperable en R1 aplicando las ecuaciones de propagación y considerando la atenuación del follaje, se obtienen valores esperables en R1 menores a lo medido, indicando que los 4 dB de diferencia pueden ser debidos a la acción de las cortinas de árboles B1.2, B1.3 y B1.4 interpuestas entre las Fuentes F1-F2 y R1

Cuando operan las fuentes principales F1, F2, F3 y F4 el valor esperable en R1 (56,2 dB) es mayor que los valores medidos en sitio para la totalidad de las mediciones realizadas y cuya diferencia varía entre 2 y 13 dB. Calculando el valor equivalente de las mediciones realizadas (49,6 dB), la diferencia con lo esperable en R1 (56,2 dB) es de 7 dB, con diferencias importantes en 63, 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 Hz. La disipación de energía en las frecuencias altas es explicada a través de la atenuación por el follaje de los árboles, quedando aun diferencias en 63 y 1.000 Hz que no pudieron ser justificadas.

En conclusión, la barrera 1 está generando una atenuación del sonido proveniente de las fuentes F1, F2, F3 y F4 hacia el receptor R1, y la cortina de árboles que presenta la mayor eficiencia es B1.1, que se interpone entre las fuentes F3 y F4 y el receptor R1.

De manera general, la aplicación del modelo ISO 9613-2 en esta barrera no generó resultados muy precisos, encontrándose aún diferencias entre lo medido y lo calculado en las bandas de 63, 1.000 y 2.000 Hz. Las grandes distancias entre las fuentes y el receptor R1, de más de 800 m, así como la presencia de algunos tramos con depresiones, hacen que la aplicabilidad de las ecuaciones planteadas en la Norma genere diferencias en algunas frecuencias entre lo calculado y lo realmente medido.

### ***Sobre la barrera 2***

La barrera 2 ubicada en el noroeste del predio, a pesar de ser una barrera pequeña, de 7.000 m<sup>2</sup> (0,7 ha) genera atenuación del sonido proveniente de la industria cuya eficiencia varía según la ubicación del punto de control respecto a las fuentes.

La diferencia entre los valores medidos antes y después de la barrera fue de 5 dB entre los puntos P1 y P2 y de 11 dB entre los Puntos P3 y P4. Teniendo en cuenta que la distancia entre estos puntos de control P1-P2 y P3-P4 no es muy grande y es igual (119 m) y, que el único obstáculo presente entre los puntos de control es la barrera de árboles, es posible evidenciar un efecto en la atenuación del sonido por la presencia de la misma.

El valor esperable en el punto P2 (66,3 dB) difiere del valor medido (64,3 dB) en 2 dB, siendo el valor medido menor que el esperable numéricamente, pero desde el punto de vista acústico, son prácticamente el mismo resultado. Si bien los valores después de la barrera sin considerar su presencia ya son iguales o muy similares, existen diferencias en algunas frecuencias como son 250 y 8.000 Hz, con 5 y 6 dB de diferencia respectivamente entre lo medido y lo esperable. Al calcular la atenuación por el follaje por los métodos utilizados en este estudio, se obtienen un valor en banda ancha expresado en escala A de 62,9 dB por el método de la ISO 9613-2 y 60,9 dB utilizando la ecuación de Hoover, que son valores próximos al valor medido y con valores muy similares en todas las frecuencias.

En la frecuencia de 8.000 Hz se puede estar generando una atenuación debida a las hojas y troncos de los árboles dado que la longitud de onda del sonido (4,3 cm) es menor que la longitud de onda de alguna dimensión de los obstáculos. En este caso las hojas tienen entre 21 y 30 cm de longitud y los troncos tienen entre 13,4 y 23 cm de diámetro a la altura del pecho, por lo cual en esta frecuencia se genera dispersión del sonido en todas las direcciones.

El valor esperable en el punto P4 (64,3 dB) difiere del valor medido (55 dB) en 9 dB, siendo el valor medido menor al esperable. Este resultado global indica que se está generando una atenuación adicional del sonido en el camino de la propagación. Las diferencias se presentan entre 63 y 4.000 Hz, destacando las mayores diferencias en 2.000 y 4.000 Hz con 11 y 12 dB Hz respectivamente. Al calcular la atenuación por el follaje por los métodos utilizados en este estudio, se encuentran valores muy similares entre lo medido y lo calculado para todas las frecuencias utilizando la ecuación de Hoover. Con base en lo anterior se concluye que se genera atenuación del sonido por efecto de la barrera al evaluar el sonido que se propaga hacia el punto P4.

El punto P4 se encuentra más protegido por la barrera 2 ante el ruido proveniente de la fuente F2, que tiene una altura de 17 m, y esto se corresponde con el hecho de que en el Punto P4 se obtenga mayor atenuación del sonido por efecto de la barrera que en el caso del punto P2.

La atenuación generada por el follaje calculada según la expresión propuesta por Hoover relaciona la frecuencia, y la distancia recorrida por el sonido a través de la vegetación. Al comparar los valores medidos con los valores calculados en el punto P4 (después de la barrera de árboles) cuando se calcula la atenuación del follaje según esta ecuación, se observa que los resultados son bastante similares, obteniendo diferencias que no superan los 3 dB en las frecuencias entre 500 y 8.000 Hz. Lo anterior permite concluir que además de existir una atenuación por el follaje de los árboles, la ecuación de Hoover predice bastante bien las condiciones dadas en sitio para la evaluación hecha en el punto P4.

La atenuación generada por el follaje calculada según la expresión de la Norma ISO 9613-2 relaciona la frecuencia con la distancia sobre el arco encima de los árboles en cercanías a la fuente y el receptor. En las dos barreras estudiadas, al comparar los valores medidos con los calculados usando esta metodología para determinar la atenuación generada por el follaje, se encuentra que los resultados son diferentes y que esta subestima el valor de la atenuación generada por la barrera.

#### *Otros comentarios*

Si bien el estudio pone foco en la mitigación del ruido por efecto de la presencia de cortinas de árboles entre fuentes y receptores, esta no sería la única consecuencia. Se debe tener en cuenta que la presencia de áreas con vegetación tiene un efecto positivo a nivel psicológico, tanto para el personal al interior de la industria como para los vecinos y personas que pasan por la zona. Estas cortinas de árboles cortan la visibilidad hacia el interior de la industria mejorando la percepción y por tanto una disminución en la molestia, si es que esta se genera por efecto del ruido.

### ***Posibles fuentes de error***

Los valores de G utilizados para el cálculo de la absorción del suelo fueron tomados de acuerdo con la bibliografía consultada en función de la tipología general del suelo a simple vista (suelo blando, suelo de hormigón, etc.) pero no están fundamentados en estudios de las propiedades del suelo in situ. Así mismo, en los tramos de suelo que se presentaron características variables se trabajó con un valor G ponderado en función de la distancia. Al no contar con un G que provenga de datos particulares del sitio, se considera que es una fuente de error.

En el trayecto entre la fuente F1 y el Receptor 1 –R1 se presenta un tramo donde existe una infraestructura con agua. Se trata de 2 piletas de sedimentación en serie de 23 m de ancho y 46 m de largo y 3,0 m de profundidad cada una. Esta área se tomó como un área reflectante y fue considerada para efectos del cálculo del valor de G, como acústicamente dura. Si se tiene en cuenta que la distancia total entre F1 y R1 es de 1.262 m, esta superficie con agua no parecería tener un gran aporte en los cálculos, pero se menciona porque es un aspecto que puede contribuir, aunque en menor medida a esas diferencias en los resultados entre lo medido y lo esperable que a veces no es posible justificar numéricamente.

Una de las restricciones para el uso de la Norma ISO 9613-2 es que el terreno entre la fuente y el receptor debe ser aproximadamente plano, ya sea horizontalmente o de pendiente constante. Estas condiciones son cumplidas en términos generales, pero en este estudio de caso hay algunos puntos que tienen depresiones topográficas que, si bien se intentaron representar lo mejor posible a través de asignación de coeficientes de absorción acordes, no dejan de ser una fuente de error al no ser el terreno totalmente plano o de pendiente constante.

## 9 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A FUTURO

Como fuera presentado a través del estudio, la plantación de *Eucalyptus* tiene una configuración regular de 4,0 m entre filas y 2,0 m entre árboles en la totalidad de las áreas estudiadas. Adicional a lo anterior las fuentes sonoras (maquinaria industrial) tienen perfiles estacionarios bien definidos por lo cual se abre una línea de investigación para establecer si este arreglo periódico de la disposición de los árboles puede estar generando una atenuación sonora que no fue considerada y que es la causa de algunas diferencias encontradas entre los valores medidos y los esperados.

De acuerdo con la revisión bibliográfica existen estudios que demuestran que las configuraciones regulares en los elementos que forman una barrera acústica abierta hacen que esta se comporte como cristales sónicos inhibiendo la transmisión del sonido en ciertas frecuencias, igual que los cristales fotónicos lo hacen con luz para determinados rangos de frecuencia (Martínez Salaa, 2006). En este caso de estudio, la distancia entre individuos y entre filas no es la misma lo que pudiera influir en la performance de la barrera, pero es un caso que podría ser de interés estudiar.

Adicional a lo anterior se cuenta con un volumen de información importante bajo distintas condiciones de operación de las fuentes sonoras, por lo cual podría analizarse si la ecuación de Hoover que fue empleada en el desarrollo del trabajo, tiene algunas limitaciones de uso respecto a la distancia entre la fuente sonora y el receptor, como sí lo presenta la metodología de la Norma ISO 9613-2.

Se deben realizar más mediciones para ampliar el análisis de las influencias meteorológicas en los reflejos del bosque y el comportamiento en terreno no totalmente plano donde un patrón de directividad vertical podría ser importante.

La plantación objeto de la investigación tiene la ventaja de estar disponible para hacer estudios a largo plazo, aprovechando además que se trata de una especie de hoja perenne, por lo cual las condiciones no van a tener un cambio significativo durante el año.

## REFERENCIAS

- Albert D. (2004). Past research on sound propagation through forest. US Army Corps of Engineers. Engineer research and development center.
- Asdrubali F, D'Alessandro F., Mencarelli N, Horoshenkov KV. (2014). Sound absorption properties of tropical plants for indoor applications. In: The 21st International Congress on Sound and Vibration; July 2014; Beijing/China.
- Attenborough, K. et al. (1985). Outdoor ground impedance models. Department of Design, Development, Environment and Materials, The Open University, Milton Keynes, MK7 6AA, United Kingdom.
- Attenborough K, (2008). Predicting, measuring and controlling outdoor ground effects. 15th International Congress on Sound and Vibration. 6-10 July 2008, Daejeon, Korea
- Attenborough K, et al. (2011). Outdoor ground impedance models. Article in Journal of Sound and Vibration April 1985.
- Attenborough K, et al. (2014). Noise reduction using surface roughness. Chapter · November 2014. Artículo subido por Philippe Jean on 19 June 2019
- Attenborough K et al.(2016). Exploiting ground effects for surface transport noise abatement. P1 From the journal [Noise Mapping https://doi.org/10.1515/noise-2016-0001](https://doi.org/10.1515/noise-2016-0001)
- Aylor, D. (1972). Sound Transmission through Vegetation in Relation to Leaf Area Density, Leaf Width, and Breadth of Canopy. The Journal of the Acoustical Society of America 51, pp. 411-414; doi: 10.1121/1.1912852
- Aylor, D. (1972). Noise reduction by Vegetation and Ground. The Journal of the Acoustical Society of America 51, Number 1 (Part 2), pp. 197-205
- Azkorra Z, Pérez G, Coma J, Cabeza LF, Bures S, Álvaro JE, et al. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. Applied Acoustics.
- Bass, J. H., Bullmore, A. J. & Sloth, E. (1998). Development of a wind farm noise propagation prediction model. The European Commission, Joule III, Contract JOR3-CT95-0051, Final Report
- Beranek. L (1969). *Acústica*. Editorial Hispano Americana S.A Buenos Aires
- Bies, David A. Hansen, Colin H. Engineering noise control: Theory and practice. London: Spon Press, 3rd Ed., 2003. 0-415-26713-7.
- Boletín Oficial del Estado Español. Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. BOE núm. 254, de 3/10/2007. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/10/19/1367/>
- Bucur V. (2005). Urban forest acoustics. Artículo en Tecniacustica Terrassa
- Brussa, C. A. 1994. Eucalyptus; especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p
- Capelli A et al.(2016). Speed and attenuation of acoustic waves in snow: Laboratory experiments and modeling with Biot's theory. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.01.004>

- Cook, David I. and D. F. Van Haverbeke, 1971. Trees and shrubs for noise abatement. Nebraska Agr. Expt. Sta., Res. Bulletin 246. 77 pp. NB1.000/RB-246.
- Cook, David I. and F. Van Haverbeke (1972). The potential value of trees, shrubs, and landform combinations for noise control. Int. Shade Tree Conf., Hic.western Chapter, Proc. 27:19-25
- Carreteras. - 4ª época - núm. 150 - extraordinario 2006 - Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, p.36
- Defrance, J, Salomons, E I. Noordhoek, D. Heimann, B. Lovsing et al., Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project, Acta Acust. united Ac, vol.93, pp.213-227, 2007.
- Dickinson, P. J. and Doak, P. E., 1970. Measurements of the Normal Acoustic Impedance of Ground Surfaces, J. Snd & Vib., Vol. 13, No 3, pp 309-322. Medidas de la impedancia acústica normal de superficies de tierra
- Doolan, Barry Leonard. The use of artificial intelligence to predict road traffic noise (2008)
- Doran, J., Du, G. & Lightstone, A. D., 2016. Sound Propagation Modelling for Offshore Wind Farms. Ontario: Valcoustics Canada Ltd.
- Echeverri C. (2017). Predicción de los niveles sonoros asociados a los parques eólicos. [Tesis de doctorado]. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/22615>.
- Embleton, T. F. W. (1963). Sound Propagation in Homogeneous Deciduous and Evergreen Woods. The Journal of the Acoustical Society of America 35, pp. 1119-1125, (1963); doi: 10.1121/1.1918662
- Evans T, and Cooper J. (2012). Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. Acoustics Australia, Vol. 40, No. 1, pp.28-36, April 2012
- Everest Alton F, Pohlmann Ken C. (2009). The Master Handbook of Acoustics Fifth Edition Mc Graw Hill.
- Eyring, C.F. (1946). Jungle Acoustics. J. Acoust. Soc. Am., 18(2):257-270, 1946.
- Fan, Y. Zhiyi, Bao; Zhujun, Zhu; Jiani, Liu (2010). The investigation of noise attenuation by plants and the corresponding noise-reducing spectrum. Journal of Environmental Health, Vol. 72 No. 8, pp. 8-15, April 2010.
- Fang C.F and Ling D.-L (2003) Investigation of the noise reduction provided by tree belts, *Landsc. Urban Plan.* **63**(4) (2003) 187–195
- Fang C-and D.-L. Ling D.-L, Guidance for noise reduction provided by tree belts, *Landsc. Urban Plan.* 71(1) (2005) 29–34.
- Fertilab (s.f) *Interpretación del resultado de textura y humedad del suelo.* <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/INTERPRETACION%20DE%20RESULTADOS%20DE%20TEXTURA%20Y%20HUMEDAD%20DEL%20SUELO.pdf>
- García V. M, Sánchez J, (2012). Optimum control of broadband noise by arrays of cylindrical units made of a recycled material. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.06.008>

- Ghanbarian B. et al.(2013). Tortuosity in Porous Media: A Critical Review Article in Soil Science Society of America Journal September 2013 DOI: 10.2136/sssaj2012.0435
- Glaretas C (1981). A new method for measuring the acoustic impedance of the ground. Thesis of the Pennsylvania State University
- González, Alice Elizabeth (2022). Overview of Noise Control Techniques and Methods. In: Caniato, Marco (Ed.) Noise Control, IntechOpen, UK, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.104608>
- González Arias, P. (2016). Propagación del sonido en exteriores en condiciones de niebla (PhD Thesis, Universidad de Valladolid). <https://doi.org/10.35376/10324/17451>
- Graciá R (2014). Diseño y caracterización de meta materiales acústicos basados en guías de onda- [Tesis doctoral.] Universidad Politecnica de Valencia Diffusion Magazine (2012). *Cristal sónico*. <https://www.diffusionmagazine.com/index.php/nosotros/noticias/221-cristal-sonico>
- Guimarães da Silva Jôse Lorena G. (2017). Computational sound propagation models: an analysis of the models Nord 2000, Concawe, and ISO 9613-2 for sound propagation from a wind farm. Uppsala University- Department of Earth Sciences, Campus Gotland. p.9
- Hart, C. R. et al., 2016. Comparisons between physics-based, engineering, and statistical learning models for outdoor sound propagation. J. Acoust. Soc. Am., 12 May, pp. 2640-2655
- Hankard Micahel, Cerjan, Jeff, Leasure Joshua (2006). Evaluation of the FHWA traffic noise model (TNM) for highway traffic noise prediction in the state of Colorado. Report No. CDOT-2005-21 Final Report
- Herrington, L.P. and Brock, C. (1977). Propagation of noise over and through a forest stand.
- Horoshenkov, Kirill V.; Khan, Amir; Benkreira, Hadj (2013). Acoustic properties of low growing plants. J. Acoust. Soc. Am. 133 (5), pp. 2554-2565, May 2013. The Acoustical Society of America.
- Huddart L (1990). The use of vegetation for traffic noise screening. United Kingdom
- Huisman, Willibrord H. T.; Attenborough, Keith (1991). Reverberation and attenuation in a pine forest. The Journal of the Acoustical Society of America 90, 2664 (1991); doi: 10.1121/1.401861
- International Standard Organization. ISO 9613:1996- Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation.
- Ishida, T. (1965). "Acoustic properties of snow," Contrib. Inst. Low Temp. Sci., A20, 23–63
- Johansson, Elis (2010). The sound amplifying forest, with emphasis on sounds from wind turbines. Master Thesis. Chalmers University of technology. 2010
- Juliá S, E. (2008). Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Jung S.Y, et al. (2020). Sound Absorption Property of the Leaves of Two Evergreen Broad-Leaved Tree Species, *Dendropanax morbiferus* and *Fatsia japonica*. J. Korean Wood Sci. Technol. 2020, 48(5): 631~640. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.5.631>

- Karbalae S. et al.(2015). Investigation of the Traffic Noise Attenuation Provided by Roadside Green Belts. *Project: a case study*. Fluctuation and Noise Letters. Vol. 14, No. 4 (2015) 1550036 (9 pages). World Scientific Publishing Company. DOI: 10.1142/S0219477515500364
- Kellomäki S., Haapanen A., Salonen H. (1976). Tree stands in urban noise abatement. *Silva Fennica* vol. 10 no. 3 article id 4949. <https://doi.org/10.14214/sf.a14795>
- Kotzen B, English C. (2009). *Environmental Noise Barriers: A Guide to their Acoustic and Visual Design*. 2nd ed. Canadá and USA: Simoultaneously published; 2009. ISBN 10: 0-203-93138-6
- Kurze, U., J and Anderson, G.S, (1971). "Sound attenuation by barriers," *Appl. Acoust.* 4, 35–53 [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(71\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(71)90024-7)
- Lee S.E., Velasquez S., Flintsch G., Peterson J. (2008). Road noise attenuation study: Traffic noise, trees, and quiet pavement: A report in response to item 442 c. of Chapter 847 of the Acts of Assembly of 2007. The Virginia Transportation Research Council, USA.
- Li, Mengmeng; Van Renterghem, Timothy; Kang, Jian; Verheyen, Kris; Botteldooren, Dick (2020). Sound absorption by tree bark. *Applied Acoustics* 165 (2020), 9 pp. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107328>
- Maekawa, Z, 1965. Noise Reduction by Screens, Proc. 5th International Congress on Acoustics, Liege, Paper F13.
- Maleki K. et al.(2010). The Effect of Pure and Mixed Plantations of Robinia Pseudoacasia and Pinus Eldarica on Traffic Noise Decrease. *International Journal of Environmental sciences* Volume 1, No 2, 2010. <https://www.researchgate.net/publication/301558587>
- Martens M. (1981): *Absorption of acoustic energy by plant leaves*. The Journal of the Acoustical Society of America 69, 303 (1981); <https://doi.org/10.1121/1.385313>.
- Martínez-Salaa, R., Rubio, C., García-Raffi, L.M Sanchez Perez, J.V Sanchez Perez, EA., &Linares, J. (2006). Control of noise by trees arranged like Sonic crystals. *Journal of Sound and vibration*, 291 (1-2), 100-106.
- Menounou, Penelope (2001). A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110, pp. 1828-1838 (2001); doi: 10.1121/1.1398050
- Miyara, Federico (1999). *Control de ruido*. Edición electrónica propia, Rosario, Argentina.
- Ochoa de la Torre, J. M. (1999). La vegetación como instrumento para el control microclimático en línea. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93436>
- Olmos, E. (2002). Evaluación de la pérdida por inserción de una barrera acústica aplicada a un proyecto lineal. Informally published manuscript, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. p. 23-24.
- Onuu, Michael U. (2006). Modelling of excess noise attenuation by grass and forest. *Nigerian Journal of Physics*, 18(2), pp.197-202, 2006.



- Organización de las Naciones unidas para la alimentación y la agricultura.  
<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Ostashev V. E. , Wilson D. K., Muhlestein M. B., Attenborough K. (2018). The Journal of the Acoustical Society of America **143**, 1194 (2018). <https://doi.org/10.1121/1.5024904>
- Palazzuoli D. and Licitra G. (2013). Chapter 1 Fundamentals. In: Licitra, Gaetano (2013). Noise Mapping in the EU, Models and Procedures. 412 pp., ISBN 9780415585095, FL CRC Press, Taylor and Francis Ed., Boca Raton, USA.
- Pathak, K. (1996). Modelling and prediction of environmental noise near mechanised surface mines and quarries. [Ph. D. Thesis, Department of Earth Resources Engineering, Imperial College of Science Technology and Medicine, London].
- Pathak V., Tripathi B.D., Mishra V.K. (2008). Dynamics of traffic noise in a tropical city Varanasi and its abatement through vegetation, Environmental Monitoring Assessment, 146, 67–75.
- Price, M. A.; Attenborough, K., Heap, N. W. (1988). Sound attenuation through trees: Measurements and models. The Journal of the Acoustical Society of America 84, 1836-1844 (1988); doi: 10.1121/1.397150
- Pierce, A.D., (1974). Diffraction of sound around corners and over wide barriers. The Journal of the Acoustical Society of America. 55, 941 (1974). <https://doi.org/10.1121/1.1914668>
- Piercy, J. E., Embleton, T. F. W. and Sutherland, L. C., 1977. Review of Noise Propagation in the Atmosphere, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 61, No. 6, pp. 1403- 18.
- Parrondo G. et al. (2006). Acústica Ambiental. Ediciones de la Universidad de Oviedo. Asturias, España.
- Redfearn, R.S. (1940). Some acoustical source-observer problems. Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci. 1940, 30, 223–236. [Google Scholar] [CrossRef]
- Redondo J, et al. (2011). Difusores de sonido basados en cristales acústicos Consultado en Tecniacustica- 42º Congreso español de acústica, Encuentro ibérico de acústica, European Symposium on Environmental acoustics and on Buildings acoustically sustainable
- Reethof G et al. (1975). Absorption of sound by tree bark.
- Ren, M. and Jacobsen, F. (1992). A method of measuring the dynamic flow resistance and reactance of porous materials.
- Romero Ibañez A. (2010). Estudio de la Reducción del Ruido Aerodinámico de Trenes de Alta Velocidad con Pantallas Acústicas. Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10803/31823>
- Rodríguez R. (2003). Propiedades acústicas del caucho granular. [Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid]
- Salomons, E and Maercke, D.V (2011). The Harmonoise Sound Propagation Model, Acta Acoustica United with Acustica, Vol. 97 pp 62 to 74, 2011, doi:10.3813/aaa.918387

- Salguero M, Arias B, González B (2014). Lineamientos técnicos de manejo forestal. Instituto Nacional de Bosques--INAB
- Sommerfeld, A (2004). Mathematical Theory of Diffraction (Springer, Berlin 2004), (R. Nagem, M. Zampolli, G. Sandri, translators) <http://www.ub.edu/javaoptics/teoria/castella/node17.html>
- Swearingen, M.E.; White, M. J. Influence of scattering, atmospheric refraction, and effect on sound propagation through a pine forest (2007). The Journal of the Acoustical Society of America 122, 113 (2007); doi: 10.1121/1.2735108. pp. 113-119, No. 1, July 2007.
- Tarrero, A. I. (2002). Propagación del sonido en bosques. Análisis comparativo de las medidas in situ, en laboratorio y de los valores predichos por un modelo en línea. [Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid]. <https://www.cervantesvirtual.com/obra/propagacion-del-sonido-en-bosques-analisis-comparativo-de-las-medidas-in-situ-en-laboratorio-y-de-los-valores-predichos-por-un-modelo--0/>
- Tarrero A.I et al.(2000). Evaluación de la resistividad al flujo  $\sigma$  en distintos tipos de suelos por el método indirecto. Tecniacustica Madrid 2.000
- Tonin, R.: (1993). Environmental Noise Modelling, Vol. 1, in: P. Zannetti (ed.), Computer Methods and Software for Simulating Environmental Pollution and Its Averse Effects, Computational Mechanics Publication, Elsevier Applied Science, London.
- Torres F. (2010). Método acústico para la obtención de la porosidad total en diversos suelos. Universidad Austral de Chile, p. 4
- Trimpop M., Mann P. (2014). Determination of noise damping by forests. Presentado en Inter noise 2014 Melbourne. Australia
- Tunick, Arnold (2002). Coupling Meteorology to Acoustics in Forests. U.S. Army Research Laboratory, Adelphi, MD 20783-1197, ARL-MR-538, 41 pp., USA, 2002.
- Tyagi V, Kumar K, y Jain V.K (2013). Road Traffic Noise Attenuation by Vegetation Belts at Some Sites in the Tarai Region of India. Archives of Acoustics. Vol. 38, No. 3, pp. 389–395 (2013) DOI: 10.2478/aoa-2013-0046
- University of London and for Diploma of Imperial College. London, (October 1996)
- Van Renterghem Timothy, Meeussen Camille, Hiraguri Yasuhiro, Dekoninck, Luc, Aletta Francesco, Botteldooren Dick (2018). Validating sound propagation predictions with increasing complexity near multi-lane roads. Euronoise
- Van Renterghem, T., D. Botteldooren and K. Verheyen, (2012). Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth, J. Sound Vib. 331(10) (2012) 2404–2425
- Watanabe T y Yamada S. (1996) -Sound attenuation through absorption by vegetation Article in the Journal of the Acoustical Society of Japan (e) July 1996 DOI: 10.1250/ast.17.175
- Witte Rob (2018). CNOSSOS and industrial noise. Euronoise 2018.
- Zhimin Xu, et al. (2020). Sound propagation in porous materials containing rough tubes <https://doi.org/10.1063/5.0017710>