

Incidencia del porcentaje de abertura de las ventanas en la ventilación natural y el ruido de fondo  
en tres tipos diferentes de aulas de básica primaria en Medellín, Colombia

José Luis Arredondo Rincón, ✉ [josel@tau.usbmed.edu.co](mailto:josel@tau.usbmed.edu.co)

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Magíster en Bioclimática

Asesora: Natalia Giraldo Vásquez, Magíster (MSc) en Arquitectura y Urbanismo

Co-asesor: Ader Augusto García Cardona, Doctor (PhD) en Ciencias Técnicas,  
Especialidad Arquitectura



Universidad de San Buenaventura Colombia

Facultad de Artes Integradas

Maestría en Bioclimática

Bello, Colombia

2019

Citar/How to cite	(Arredondo, 2019)
Referencia/Reference	Arredondo, J. L. (2019). <i>Incidencia del porcentaje de apertura de las ventanas en la ventilación natural y el ruido de fondo en tres tipos diferentes de aulas de básica primaria en Medellín, Colombia</i> . (Trabajo de grado Maestría en Bioclimática). Universidad de San Buenaventura Colombia, Facultad de Artes Integradas, Bello.
Estilo/Style: APA 6th ed. (2010)	



Maestría en Bioclimática, Cohorte II.

### Bibliotecas Universidad de San Buenaventura



Biblioteca Digital (Repositorio)  
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

### Universidad de San Buenaventura Colombia

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

## **Dedicatoria**

A mis hijas por ser mi motor y una mejor versión de mí. A mi amiga y mi compañera de vida por sus burlas y chistes sobre esta investigación, ella hace de mí una mejor persona. Y no dedico este trabajo a Alejandra Arredondo.

## **Agradecimientos**

Agradezco especialmente al profesor Ader García y a la profesora Natalia Giraldo por todo su apoyo, paciencia y ayuda.

## Tabla de contenido

Resumen .....	13
Abstract .....	15
Introducción .....	17
1 Justificación.....	19
2 Objetivos .....	21
2.1 Objetivo general .....	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3 Marco Teórico .....	22
3.1 Localización del estudio.....	22
3.2 Comportamiento de los niños.....	25
3.3 Respuesta fisiológica a estímulos térmicos en los niños.....	26
3.4 Comportamiento acústico y de ventilación de las aulas.....	27
3.5 Las aberturas de las aulas de básica primaria según la NTC 4595 .....	29
3.6 Referencia de investigaciones sobre aberturas en las aulas .....	32
3.7 Ventilación natural .....	34
3.7.1 Corrección de velocidades del viento. ....	36
3.7.2 Métodos empíricos para el cálculo del caudal .....	40
3.7.3 Métodos empíricos para el cálculo de la velocidad del aire dentro de los edificios. ....	41
3.7.4 Método empírico para dimensionar las aberturas de fachada. ....	41
3.8 Acústica.....	43
3.8.1 Ruido.....	43
3.8.2 La propagación del sonido.....	47

3.8.3	Perdida por transmisión (TL) o reducción sonora (R),	47
3.8.4	Mitigación del sonido por el entorno.	50
3.8.5	Mitigación del sonido por posición de la fuente.	51
3.9	Análisis simultaneo de acústica y ventilación	52
4	Metodología	56
4.1	Características de las aulas estudiadas	57
4.1.1	Variaciones en el área y forma de las aberturas.	58
4.2	Definición de los parámetros de ventilación	65
4.3	Definición de los parámetros de Acústicos (TL)	68
4.4	Evaluación de modelos teóricos	71
5.	Resultados	73
5.1.1	Análisis de distribución de los datos según forma del aula con flujo ascendente.	80
5.1.2	Análisis de distribución de los datos según proporción de la vano con flujo ascendente.	81
5.2	Viento con flujo descendente	84
5.2.1	Análisis de distribución de los datos según forma del aula con flujo descendente.	85
5.2.2	Análisis de distribución de los datos según proporción de la vano con flujo descendente.	86
5.3	Variable atenuación con fuente alta	89
5.3.1	Análisis de distribución de los datos según forma del aula con atenuación con fuente alta.	90
5.3.2	Análisis de distribución de los datos según proporción del vano con atenuación fuente alta.	91
5.4	Variable atenuación con fuente baja	93
5.4.1	Análisis de distribución de los datos según forma del aula con atenuación con fuente baja.	94

5.4.2 Análisis de distribución de los datos según proporción de la vano con atenuación fuente baja.....	95
5.5 Análisis de correlaciones entre las variables.....	97
5.5.1. Atenuación vs sentido del flujo.....	98
5.5.2 Tamaño vs sentido del flujo.....	104
5.5.3 Tamaño vs. atenuación.....	108
5.6 Revisión de la NTC 4595 de 2015, contra la los resultados obtenidos con la NTC 4595 2006.....	113
6 Conclusiones .....	125
6.1 Conclusiones sobre el marco teórico.....	125
6.2 Conclusiones sobre la metodología.....	125
6.3 Conclusiones sobre la adquisición y manejo de datos .....	126
6.4 Conclusiones sobre los hallazgos .....	126
7 Recomendaciones.....	129

## Lista de tablas

Tabla 1. Relación número estudiantes/ área m <sup>2</sup> .....	32
Tabla 3. Factor de corrección debido al ángulo de incidencia del viento.....	42
Tabla 4. Corrección por terreno f <sub>2</sub> .....	42
Tabla 5 Factor de corrección por vecindario f <sub>3</sub> .....	43
Tabla 6. Prueba de normalidad área viento ascendente.....	79
Tabla 7. Prueba Kruskal-Wallis para forma del aula con viento ascendente .....	80
Tabla 9. Prueba de normalidad para flujo descendente .....	84
Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para forma del aula y viento descendente .....	86
Tabla 11. Prueba Kruskal-Wallis para viento descendente y proporción vano.....	88
Tabla 12 Prueba de normalidad para atenuación con fuente alta .....	89
Tabla 13. Prueba Anova para forma del aula con atenuación fuente alta.....	90
Tabla 14. Prueba Anova para atenuación fuente alta y proporción vano .....	92
Tabla 15 Prueba de normalidad para atenuación con fuente baja .....	93
Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para forma del aula y atenuación con fuente baja .....	94
Tabla 17. Prueba Anova para proporción del vano y atenuación con fuente baja.....	96

## Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de los colegios en la ciudad de Medellín .....	18
Figura 2. Carta psicométrica de Medellín .....	22
Figura 3. Velocidades del viento en estaciones meteorológicas de Medellín de 04/11 a 05/12.....	24
Figura 4. Comportamiento climático de Medellín .....	25
Figura 5. Gasto metabólico según las edades.....	26
Figura 6. Estándares de ruido de diferentes países.....	28
Figura 7. Esquema principio de Huygens.....	29
Figura 8. Dimensiones antropométricas.....	30
Figura 9. Altura del aula bajo la NTC 4595 .....	30
Figura 10. Área de las ventanas bajo NTC 4595.....	30
Figura 11. Medición de los ruidos según la forma del vano medidos en la cámara reverberante.....	33
Figura 12. Atenuación según disposición del vano en un rango de 500 Hz.....	33
Figura 13. Desempeño de la forma del vano en relación con el ángulo de incidencia del viento.....	34
Figura 14. Diferentes presiones de viento sobre edificios.....	35
Figura 15. Plano neutro .....	35
Figura 16. Perfiles de velocidad en diferentes terrenos.....	37
Figura 17. Coeficiente de rugosidad.....	37
Figura 18. Efecto de la posición de arbustos a través de un edificio.....	38
Figura 19. Efecto del patrón de flujo de viento con respecto a la distancia de obstáculos.....	38
Figura 20. Porcentajes Promedio de velocidades del viento con respecto a la proporción del vano .....	39
Figura 21. Formulas empíricas de caudal.....	40
Figura 22. Noise Criteria.....	44
Figura 23. Curvas NC de diferentes espacios y su equivalencia en dBA.....	44
Figura 24. Mapas de ruido de Medellín.....	45
Figura 25. Contribución frecuencial del nivel de la voz y la inteligibilidad de la palabra .....	46

Figura 26. Pérdida por transmisión .....	48
Figura 27. Dependencia de las frecuencias .....	48
Figura 28. Atenuación por pendiente de la vía.....	50
Figura 29. Ecuación lineal por atenuación baja.....	51
Figura 30. Ecuación lineal por atenuación con fuente alta.....	52
Figura 31. Relación entre SRI y el flujo de tráfico.....	53
Figura 32. Efecto de atenuación de las rejillas acústicas.....	54
Figura 33. Relación entre SRI y el flujo de aire .....	55
Figura 34. Esquema de la metodología de la investigación .....	56
Figura 35. Sección transversal. Ubicación del modelo a evaluar.....	58
Figura 36. Comportamiento presiones positivas y negativas sobre las aulas.....	58
Figura 37. Variaciones del porcentaje de abertura .....	59
Figura 38. Dimensiones de los vanos a partir de las proporciones.....	59
Figura 39. Muestra las características de los vanos evaluados.....	60
Figura 40. Resumen de áreas y vanos evaluados .....	61
Figura 41. Sección aula mostrando distribución de aire en sección.....	61
Figura 42. Esquema aula cuadrada.....	62
Figura 43. Aula rectangular profunda .....	63
Figura 44. Aula rectangular ancha .....	64
Figura 45. Corrección por ángulo de incidencia del viento $f_1$ .....	65
Figura 46. Factor por corrección de terreno $f_2$ .....	66
Figura 47. Factor de corrección por vecindario.....	66
Figura 48. Cálculo de corrección del aire flujo descendente.....	67
Figura 49. Cálculo de corrección del aire flujo ascendente.....	67
Figura 50. Esquema donde muestra viento ascendente y descendente.....	68
Figura 51. Fotos paneles y cámara reverberante .....	70

Figura 52. Sección cámara reverberante .....	70
Figura 53. Esquema que muestra la posición de las fuentes alta y baja .....	71
Figura 54. Parámetros técnicos de evaluación .....	72
Figura 55. Área de ocupación de las aulas según su distribución .....	72
Figura 56. Aula cuadrada, viento ascendente y atenuación con fuente alta .....	73
Figura 57. Aula cuadrada, viento descendente y atenuación con fuente baja .....	74
Figura 58. Aula rectangular ancha, viento ascendente y atenuación con fuente alta .....	74
Figura 59. Aula rectangular ancha, viento descendente y atenuación con fuente baja .....	75
Figura 60. Aula rectangular profunda, viento ascendente y atenuación con fuente alta .....	75
Figura 61. Aula rectangular profunda, viento descendente y atenuación con fuente baja .....	76
Figura 62. Resumen gráfico del comportamiento simultaneo según el tipo de aula .....	77
Figura 63. Resumen del análisis estadístico .....	77
Figura 64. Resumen de análisis estadístico (gráfico) .....	78
Figura 65. Histograma área ventilada con flujo ascendente .....	79
Figura 66. Prueba de normalidad para área ventilada ascendente y forma del aula .....	80
Figura 67. Diagrama de cajas para forma del aula y viento ascendente .....	81
Figura 68. Prueba de normalidad del área ventilada con flujo ascendente y proporción del vano .....	82
Figura 69. Prueba de Kruskal-Wallis para proporción y viento ascendente .....	82
Figura 70. Diagrama de cajas viento con flujo ascendente y proporción del vano .....	83
Figura 71. Histograma del área ventilada descendente .....	84
Figura 72. Prueba de normalidad para área ventilada descendente y forma del aula .....	85
Figura 73. Diagrama de cajas para viento descendente y forma del aula .....	86
Figura 74. Prueba de normalidad para flujo de aire descendente y proporción del vano .....	87
Figura 75. Diagrama de cajas para viento con flujo descendente y proporción del vano .....	88
Figura 76. Histograma para atenuación con fuente alta .....	89
Figura 77. Prueba de normalidad para atenuación fuente alta y forma del aula .....	90

Figura 78. Diagrama de cajas para atenuación fuente alta y forma del aula .....	91
Figura 79. Prueba de normalidad para atenuación fuente alta y proporción vano .....	91
Figura 80. Diagrama de cajas de fuente alta y proporción del vano .....	92
Figura 81. Histograma atenuación con fuente baja .....	93
Figura 82. Prueba de normalidad de atenuación con fuente baja y forma del aula .....	94
Figura 83. Diagrama de cajas para atenuación con fuente baja y forma del aula.....	95
Figura 84. Prueba de normalidad para proporción del vano y atenuación con fuente baja .....	95
Figura 85. Diagrama de cajas para atenuación con fuente baja y proporción del vano .....	96
Figura 86. Parámetros técnicos .....	97
Figura 87. Aula cuadrada con proporción de vano 2:3, viento ascendente vs atenuaciones alta y baja.....	99
Figura 88. Aula cuadrada 2:3 viento descendente vs atenuaciones alta y baja .....	99
Figura 89. Aula ancha 2:3 viento descendente vs atenuaciones alta y baja .....	101
Figura 90. Aula ancha 2:3 viento ascendente vs atenuaciones alta y baja .....	101
Figura 91. Aula profunda viento descendente vs atenuaciones alta y baja .....	103
Figura 92. Aula cuadrada 2:3 viento descendente vs atenuaciones alta y baja .....	103
Figura 93. Resumen mejores áreas ventiladas y atenuaciones acústicas.....	104
Figura 94. Tamaño vs sentido del flujo aula cuadrada 2:3 .....	105
Figura 95. Resumen comportamiento aula cuadrada .....	105
Figura 96. Resumen comportamiento aula rectangular ancha.....	106
Figura 97. Tamaño vs sentido del flujo aula rectangular ancha 2.3 .....	106
Figura 98. Resumen comportamiento aula rectangular profunda.....	107
Figura 99. Tamaño vs sentido del flujo aula rectangular profunda 1:2.....	107
Figura 100. Tamaño vs sentido del flujo aula rectangular profunda 2:3 .....	108
Figura 101. Tamaño vs atenuación aula cuadrada 1:3 .....	109
Figura 102. Tamaño vs atenuación aula cuadrada 2:3 .....	109
Figura 103. Tamaño vs atenuación aula rectangular ancha 2:3.....	110

Figura 104. Tamaño vs atenuación aula 1:2 rectangular ancha.....	111
Figura 105. Tamaño vs atenuación aula rectangular profunda 1:3.....	112
Figura 106. Tamaño vs atenuación aula rectangular profunda 1:2.....	112
Figura 107. Medida vanos aplicando la norma NTC 4595 2015.....	113
Figura 108. Comparación áreas ventiladas ascendente 1:2 entre NTC 4595 2006 y 2015 .....	114
Figura 109. Comparación áreas ventiladas 1.2 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	115
Figura 110. Comparación áreas ventiladas descendentes 1:3 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	116
Figura 111. Comparación áreas ventiladas ascendentes 1:3 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	116
Figura 112. Comparación áreas ventiladas ascendente 2:3 entre NTC 2006 y 2015 .....	117
Figura 113. Comparación áreas ventiladas descendentes 2:3 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	118
Figura 114. Cuadro resumen con diferencias en porcentaje del aumento de la ventilación flujo ascendente .....	118
Figura 115. Cuadro resumen con diferencias en porcentaje del aumento dela ventilación flujo descendente .....	119
Figura 116. Comparación Atenuación F. Alta 1:3 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	120
Figura 117. Comparación Atenuación F. Alta 1:2 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	120
Figura 118. Comparación atenuación 2:3 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	121
Figura 119. Comparación atenuación f. baja 1:3 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	122
Figura 120. Comparación atenuación F. Baja 1:2 entre la NTC 4595 2006 y 2015 .....	122
Figura 121. Comparación atenuación 2:3 entre NTC 4595 2006 y 2015.....	123
Figura 122. Cuadro resumen de las diferencias en porcentaje de la reducción de la atenuación de NTC 4595 2006 a 2015 fuente alta .....	124
Figura 123. Cuadro resumen de la diferencia en porcentajes de la reducción de la atenuación entre NTC 4595 2006 Y 2015 fuente baja .....	124

## Resumen

Este trabajo está situado en Colombia, país ubicado en la zona de convergencia intertropical, caracterizado por aires cálidos y húmedos, provenientes de las latitudes norte y sur. Colombia, a pesar de ser altamente tórrido, por la perpendicularidad de los rayos solares, tiene una gran cantidad pisos térmicos que hacen fluctuar el clima, debido a su ubicación cercana a la Cordillera de los Andes. El estudio se desarrolló específicamente en la ciudad de Medellín, situada a 6.25° de la latitud norte, con una altura promedio de 1495 msnm y con un clima cálido húmedo subandino (Narváez-Bravo & León-Aristizábal, 2001), características importantes a considerar para la medición del ambiente en las aulas de clase de básica primaria consideradas en este estudio.

En este trabajo se evaluaron 3 tipos de aulas de básica primaria en la ciudad de Medellín: 1) cuadrada, 2) rectangular con vanos en lado ancho y 3) rectangular con vanos en su lado corto. Estas dos últimas se nombran como rectangular ancha y rectangular profunda, respectivamente, las cuales cumplen con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC & Colombia. Ministerio de Educación Nacional, 2015).

Para conocer comportamientos simultáneos del viento y ruido en las aulas, se evaluaron 5 porcentajes de apertura, con respecto al área total del vano: 20%, 40%, 60%, 80%, 100%, en tres tipos de proporción referidas a las dimensiones del mismo: 1:2, 1:3, 2:3, dando 15 casos distintos de vanos a evaluar; la abertura al 100% cumple con el área de entrada sugerida en la NTC 4595 (2006) y es la única que cumple con las proporciones. Bajo las condiciones de la NTC 4595 de 2015, que actualiza la de 2006, el clima de Medellín no encaja en la categoría de templado, pues tiene un rango de temperaturas que varía de 18 a 24 °C; y tampoco encaja en la categoría de cálido-húmedo porque sus rangos de humedad están por encima de 75%. Sin embargo, este inconveniente se resolvió al usar 1/6 del área en planta, que es la sugerida para ventilar, de acuerdo a la norma NTC 4595 del 2006 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC] & Colombia. Ministerio de Educación Nacional), que se ajustó más al comportamiento del clima en Medellín.

Se hicieron dos modelos: 1) con ayuda del software de CFD (Computational Fluid Dynamics) de *Autodesk*, en cuanto a viento; y 2) con el TL (Transmission Loss) combinado, en cuanto al ruido. Las evaluaciones de viento y ruido en las diferentes combinaciones de aula y porcentaje de abertura de la ventana, demuestran que: las tres diferentes formas de aula no tiene

relación con el área ventilada ni con los grados de atenuación; la proporción del vano no tiene relación con los niveles de atenuación; y, la proporción que tiene mayores efectos simultáneos es la 2:3, con 40% de abertura en el aula cuadrada.

**Palabras clave:** Aberturas, Pérdida por transmisión, Reducción sonora, Ruido de fondo, Ventilación natural.

### Abstract

This study was made in Colombia, a country located in the intertropical convergence zone, characterized by warm and humid winds, coming from the northern and southern latitudes. Colombia's weather, despite being highly torrid, due to the perpendicularity of the sun's rays, has a large number of thermal floors that make the climate fluctuate, due to its location near the Andes Mountain Range.

This study was developed specifically in the city of Medellín, located at 6.25° of the northern latitude. The study was developed specifically in the city of Medellín, located at 6.25° of the northern latitude, with an average height of 1495 meters above sea level and with a hot sub-Andean humid climate (Narváez-Bravo & León-Aristizábal, 2001). These are important characteristics that should be taken into consideration for the measurement of the environment in the primary school classrooms considered in this study.

3 types of primary school classrooms were evaluated in the city of Medellín for this study: 1) square; 2) rectangular with openings on wide side; and 3) rectangular with openings on its short side. The names of these last two are rectangular and deep rectangular, respectively, which must comply with the Colombian Technical Standard (NTC) 4595 (Colombian Institute of Technical Standards and Certification [ICONTEC] & Colombia, Ministry of National Education, 2015).

Five aperture percentages were evaluated with respect to the span's total area: 20%, 40%, 60%, 80% and 100% in three proportion types referencing its dimensions: 1:2, 1:3, and 2:3. Given 15 different cases of spans evaluated, the aperture at a 100% complies with the entrance suggested in NTC 4595 (2006). It's also the only one that adjusts with the proportions. Under NTC 4595 2015, updated from 2006, Medellín's weather doesn't fit into mild category, because its temperature ranges from 18 to a 24 °C. Neither does it fit into the warm-humid category because its humidity ranges are above 75%.

Nevertheless, this inconvenient was resolved by using 1/6 of the space's area, which is the suggested area for venting, according to NTC 4595 norm of 2006 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC] & Colombia. Ministerio de Educación Nacional), which adjusted better to Medellín's climate.

Two models were made: 1) with the help of Autodesk CFD software (Computational Fluid Dynamics), in terms of wind; and 2) with the TL (Transmission Loss) combined, in terms of noise. The wind and noise evaluations in the different combinations of classroom and percentage of window opening, show that: the three different classroom forms have no relationship with the ventilated area nor with the degrees of attenuation; the proportion of the span is not related to attenuation levels; and, the proportion that has greater simultaneous effects is 2: 3, with 40% opening in the square classroom.

**Keywords:** Background noise, Loss by transmission, Natural ventilation, Openings, Sound reduction.

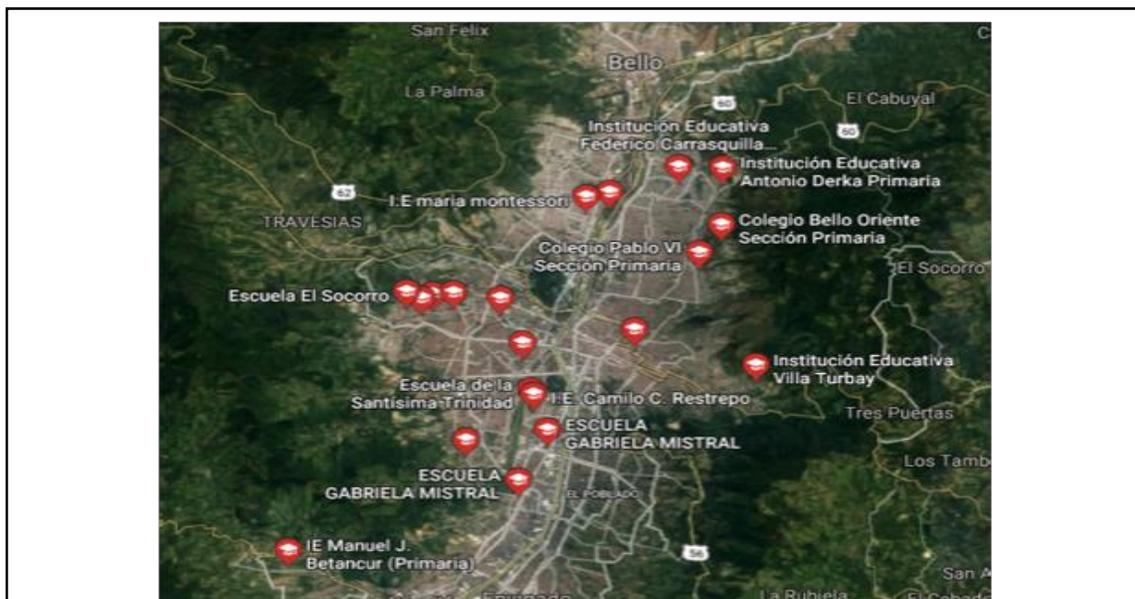
## Introducción

A partir de la política de estado del 2014, denominada Colombia la Más Educada (Colombia. Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2015), se instauró como visión que el país en el 2025 fuera el más educado de América Latina. Se dieron directrices como la implementación de una jornada única, en la que los alumnos permaneciera más tiempo dentro del colegio, extendiendo la jornada de 7:00 a. m. a 4:00 p. m., con el fin de dictar las diferentes materias con mayor profundidad y así mejorar la calidad de la educación. No obstante, para que una política como esta tenga éxito, es necesario subsanar el déficit existente de más de 51134 aulas (Consejo Privado de Competitividad, 2016); por ello, se hizo un cálculo para que en 2018 se completara la construcción de 30693 aulas y así reducir el déficit de un 60% a un 40% (Fundación Corona, Periódico El Tiempo, Pontificia Universidad Javeriana, & Camara de Comercio de Bogotá, 2017)

La infraestructura educativa requiere esfuerzos importantes para el mejoramiento y el acondicionamiento de los colegios existentes. Es urgente la construcción de nuevos establecimientos siguiendo los lineamientos de las normas respectivas, en este caso la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595 de 2015. La política de mejoramiento de la infraestructura en el país, está acompañada con una política pedagógica llamada desarrollo por competencias, que consiste en enseñar a los niños y adolescentes a: aprender a hacer, aprender a conocer, aprender a convivir y aprender a ser; en resumen, dicha política busca una formación holística del ser humano, y para ello se requieren espacios que permitan, no solo la clase magistral, sino la exploración, la discusión y el debate para la formación de alumnos que posean las competencias necesarias para analizar los problemas de manera integral (Colombia. Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2015; Colombia. Ministerio de Educación Nacional, 2015).

A partir de lo expuesto se desprende el interés de la presente investigación: ¿cómo poder ayudar, con una arquitectura pasiva, a la construcción de la infraestructura educativa? ¿Cómo, por medio del estudio de las variables bioclimáticas como son la ventilación y el ruido de fondo, se puede llegar a comprender su comportamiento simultaneo en aulas de clase? ¿Cómo, manipulando los porcentajes de abertura de las ventanas, se pueden lograr atenuaciones y porcentajes de áreas ventiladas dentro de las aulas, que contribuyan a la comodidad de sus usuarios y permitan espacios con mayor confort?

Los análisis de ventilación se hacen por medio de software CFD de *Autodesk*, que arroja áreas ventiladas que posteriormente se correlacionan con las atenuaciones conseguidas de manera teórica por medio de la fórmula del TL combinado y cámara reverberante, para dar como resultado las aberturas con el mejor comportamiento simultaneo entre atenuación sonora y área ventilada dentro de las aulas.



*Figura 1. Ubicación de los colegios en la ciudad de Medellín*

*Nota:* fuente: (Secretaría de Educación de Medellín, 2018). Se aprecia la localización de gran parte de los colegios de Medellín sobre las laderas occidental y oriental.

## 1 Justificación

Las aulas analizadas en esta investigación están ubicadas en Medellín, Colombia, una ciudad con condiciones cercanas al clima cálido y húmedo subandino (Narváez-Bravo & León-Aristizábal, 2001). Estas condiciones climáticas hacen necesarias la ventilación y la generación de aberturas en la envolvente de los espacios para propiciar un mejor ambiente en las aulas de clase; sin embargo, estas mismas aberturas hacen que el ruido del exterior se filtre, lo que se convierte en otra variable a considerar. Por la escasez de recursos para infraestructura y mantenimiento, no se permite contar con elementos mecánicos que ayuden a la impulsión de aire u otro tipo de ayudas técnicas que mejoren las condiciones de las aulas. Medellín es una ciudad calificada como ruidosa, con promedios durante el día de entre 72 dBA y 80 dBA, y en la noche de 68 dB (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015; Escobar Velásquez et al., 2011).

Por otro lado, el desarrollo por competencias que es el modelo pedagógico implementado en Colombia (Velez, Diaz, Vanegas, Castaño, & MEN, 2006) está estructurado sobre tres ramas: el lenguaje, las ciencias y las matemáticas. Las tres competencias usan como vehículo de aprendizaje el lenguaje y la comunicación verbal, de ahí la importancia del control del ruido de fondo y los tiempos excesivos de reverberación (Sommerhoff & Rosas, 2011). Para los niños no es tan fácil deducir el contexto de una frase cuando en el mensaje se enmascaran las consonantes (sonidos de baja frecuencia), lo que genera estrés, fatiga, y problemas graves de aprendizaje. Por tal razón, el control de los ruidos de bajas frecuencias son de marcada importancia en las aulas de clase, pues la pérdida de concentración y los tiempos de trabajo intelectual o de aprendizaje tendrían que ser los más bajos posibles (Sommerhoff, 2012).

Por otra parte, los niños producen mucho más calor metabólico por unidad de masa corporal en sus actividades que los adultos (Schibuola, Scarpa, & Tambani, 2016; Yarke, 2005), si no se refrescan o no hay una renovación de aire dentro del aula, las concentraciones de CO<sub>2</sub> hacen bajar el nivel de atención y se reduce o se pierde el trabajo intelectual que hacen (Yarke, 2005).

Las aulas deben ser un espacio para el debate y el uso de la palabra hablada, por ello se requiere controlar el ruido de fondo, puesto que es un factor que perturba el aprendizaje; de igual modo, estos mismos espacios necesitan airearse naturalmente con ventilación cruzada. De estas dos necesidades resulta un problema a resolver: ¿de cuánto debe ser la abertura ideal de las ventanas para tener un aula ventilada que refresque a todos sus ocupantes, sin que el ruido de tráfico, y otros

elementos externos, perturben el desarrollo de las actividades que se desarrollan dentro? De la importancia de poder modular el porcentaje de abertura para poder controlar los niveles de atenuación y las áreas ventiladas; la idea es obtener una aproximación al comportamiento simultáneo de las variables de acústica y de ventilación para que los responsables de proyectos escolares tomen decisiones y para que los usuarios finales se sientan cómodos en el espacio.

Lo anterior se puede reforzar con una alternativa de arquitectura pasiva que procure lograr la reducción del ruido de fondo que ingresa por las aberturas de las ventanas (Brotas, Roaf, & Nicol, 2017), donde modificando la forma de las mismas, se puede reducir en banda de frecuencia de 500 Hz, entre 0,5 y 0,86 dBA; y en frecuencia de 4000 Hz, se logra una reducción entre 2 a 4 dBA para los vanos, cuyas proporciones son de 1:3 y 2:3 con respecto al área de la fachada (Brotas et al., 2017).

Es por esto que se justifica la presente investigación, pues resulta interesante conocer cuál el porcentaje de abertura ideal, que deje pasar un caudal que permita ventilar el aula y a su vez logre atenuar los ruidos de fondo para conseguir la menor interferencia posible dentro del salón de clase.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Identificar la incidencia del cambio en el tamaño de abertura de las ventanas en el comportamiento del área ventilada naturalmente y el ruido de fondo dentro de las aulas de básica primaria en Medellín.

### **2.2 Objetivos específicos**

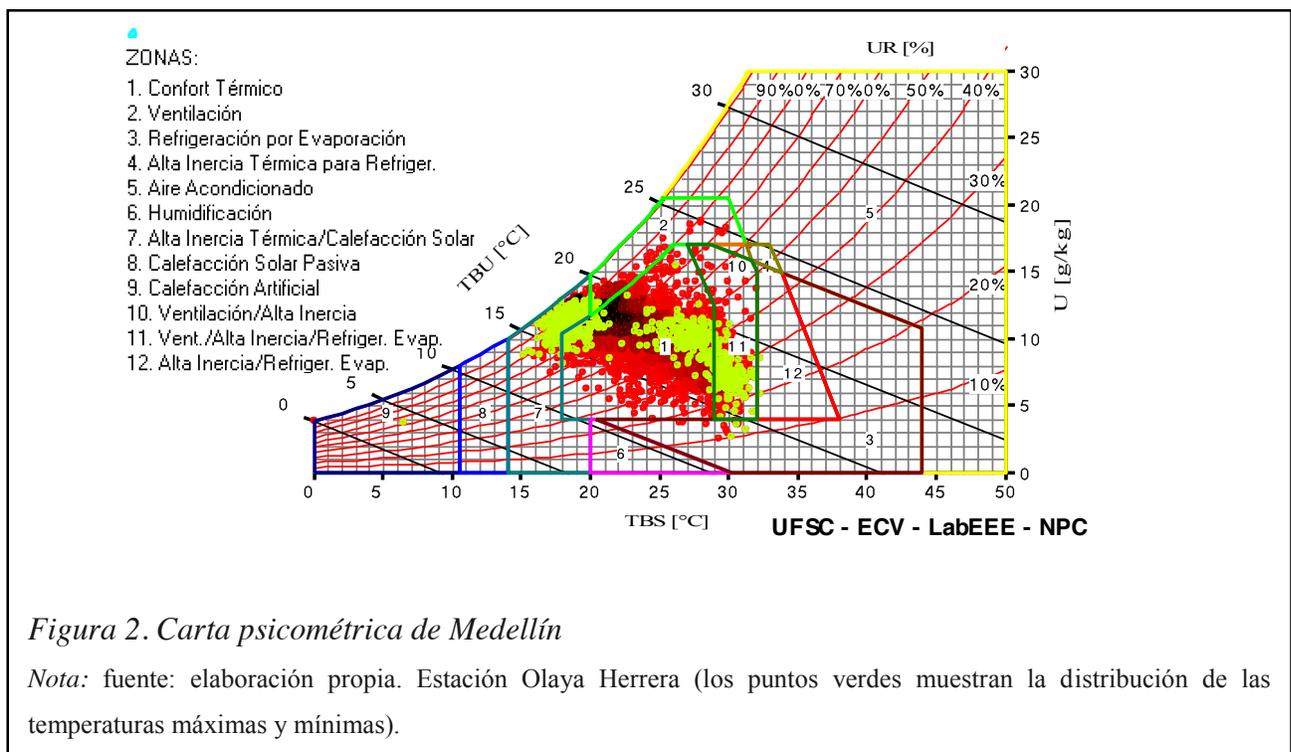
- Analizar las posibles relaciones entre el comportamiento de la ventilación y la atenuación del ruido al interior de un aula de clase, con respecto al tamaño de sus ventanas.
- Evaluar experimentalmente el comportamiento del ruido de fondo y el área ventilada de los diferentes tamaños de las ventanas de las aulas de clase seleccionadas para el presente estudio, según se modifique el tamaño o proporción del vano.
- Presentar resultados que muestren comparativamente el comportamiento del viento y la atenuación del ruido con modificaciones al tamaño de las ventanas de las aulas.

### 3 Marco Teórico

Este marco teórico se estructura en nueve secciones que darán el soporte a la investigación: la primera parte focaliza brevemente en el estudio a nivel climático; las siguientes dos unidades describen la respuesta y comportamiento de los niños en edades entre 6 y 11 años a las condiciones de comodidad auditiva y térmica, dando soporte a parte de los datos técnicos usados en el desarrollo de la investigación; y el resto de unidades son las que enmarcan el estado del arte en cuanto a ventilación y atenuación.

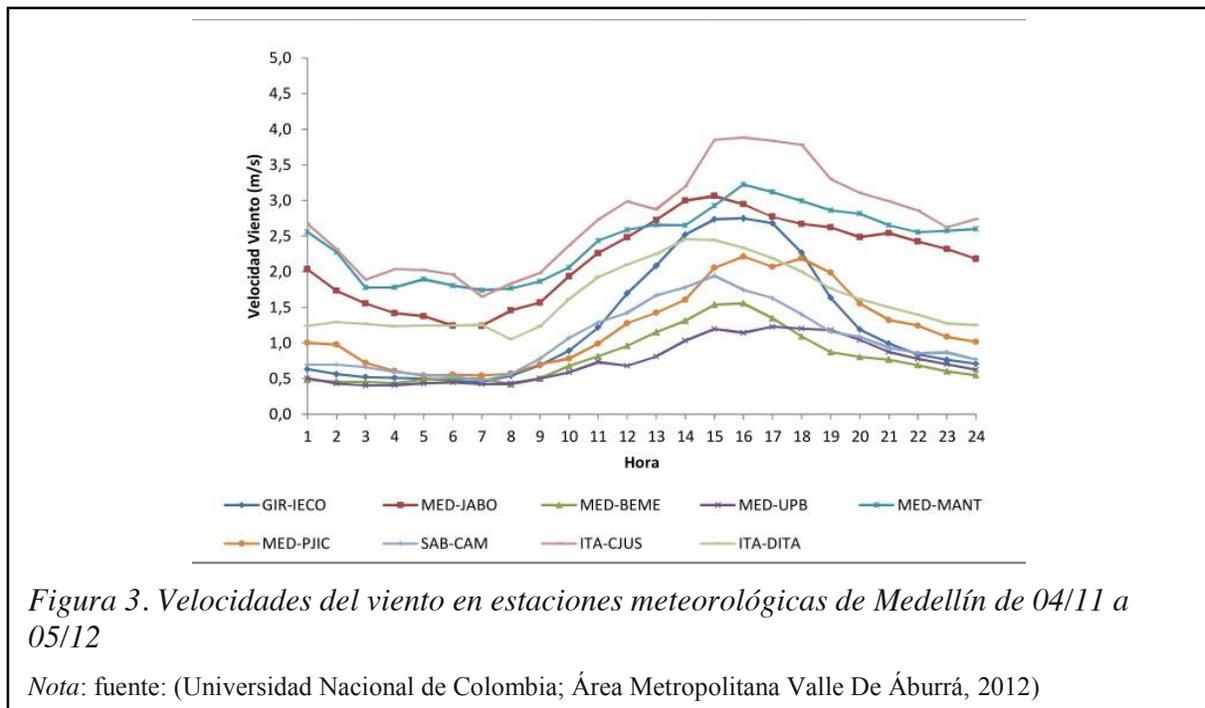
#### 3.1 Localización del estudio

Este estudio fue realizado considerando las características climáticas y de ruido de la ciudad de Medellín, situada a 6.25° de la latitud norte, con una altura de 1.495 msnm, temperaturas promedio entre 17 y 28 °C, y humedad relativa entre 40% y 80%. La velocidad promedio del viento varía entre 1m/s y 1.6m/s.



En la carta psicométrica de la ciudad de Medellín se observa que en la mayor parte del año, la ciudad permanece dentro de los rangos de confort climático, con un 69,9% del tiempo y se está en estrés térmico durante el año en un 32,1%. El tiempo que permanece en condiciones asociadas a temperaturas por debajo de la zona de confort durante el año, es de 17,9%, y en condiciones asociadas a temperaturas por encima de la zona de confort es de 4,2%. Lo anterior es considerando algunos meses con temperaturas por debajo de estos rangos, con humedades relativas por encima de 80%, y otros meses que están por encima de la temperatura de confort, con humedades relativas entre 20% y 30%. No hay que olvidar que Medellín posee laderas orientales y occidentales, donde están los mayores asentamientos de la ciudad, y donde el comportamiento del clima es diferente por las corrientes ascendentes y descendentes, que predominan en esos sectores. La temperatura promedio de la ciudad, es de 21 °C, y la temperatura máxima está entre 26 y 28 °C. Las temperaturas mínimas en la madrugada fluctúan entre 17 y 18 °C. El sol brilla alrededor de 4 horas por día en meses lluviosos y 6 horas en meses secos; la humedad relativa oscila entre 40 y 80% (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2012).

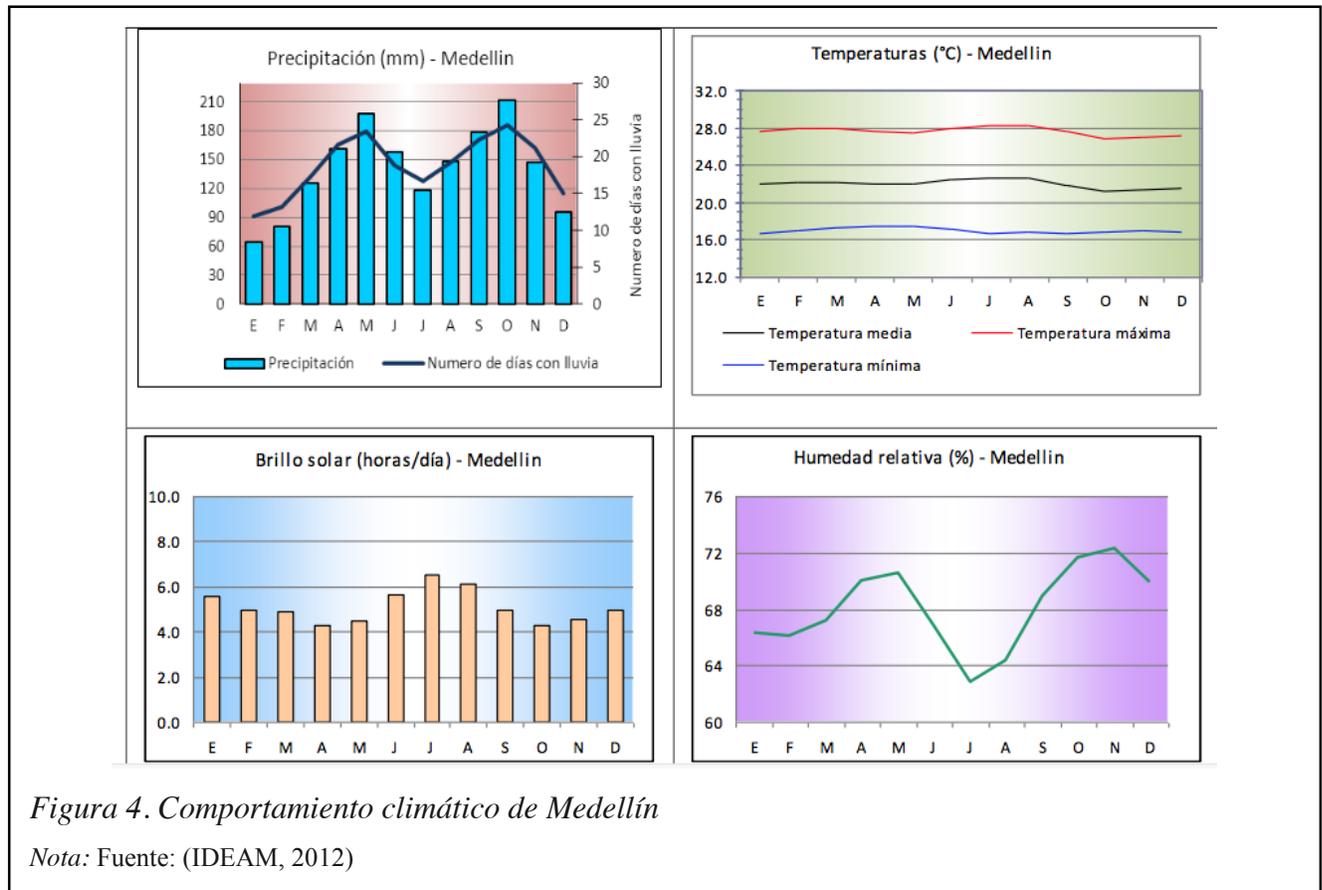
Los vientos con velocidades más altas son reportados en estación ITACJUS (Itagüí Casa de Justicia), MEDMANT (Museo de Antioquia) y MEDJABO (Jardín Botánico de Medellín), entre 3 y 4 m/s, catalogados como brisas leves en la escala de Beaufort (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, 2016; Universidad Nacional de Colombia; Área Metropolitana Valle De Aburrá, 2012). El resto de las estaciones se pueden clasificar en esta misma escala como brisa leve con velocidades promedio entre de 1 m/s y 1,6 m/s; la dirección predominante del viento es en sentido norte-sur en el Valle, y en las laderas, proviene de oeste-este, con velocidades promedio ascendentes de 4 m/s y descendentes de 2,8 m/s (Columbia University & Escuela de Asuntos Internacionales y Públicos, 2017).



El promedio de las lluvias en Medellín es de 1.685 mm. El clima en la ciudad se distribuye en 2 temporadas secas y 2 temporadas lluviosas. La temporada lluviosa va de finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre; la temporada seca se ubican entre julio y agosto y nuevamente a mediados de diciembre hasta finales de febrero, siendo estos últimos los meses más secos enero y febrero c.

Las características del ruido en la ciudad de Medellín tienen promedios en el día, que fluctúan entre 72 dBA y 80 dBA, y en la noche de 68dBA. Con estos promedios, puede decirse que Medellín es altamente ruidosa (Yepes, Gómez, Sánchez, & Jaramillo, 2009); es una ciudad de servicios y por ende sus niveles de ruido tanto en el día como en la noche son bastante altos.

Se puede concluir que el clima de Medellín permanece, gran cantidad de tiempo en el año, en condiciones de confort, con brisas en sus laderas con velocidades promedio entre 2.8 y 4 m/s; esto implica que al interior de los espacios deba existir una ventilación mecánica, para poder refrescar a sus ocupantes. Por otro lado, los altos niveles de ruido, de una ciudad de servicios como lo es esta, impide, en gran medida, que se puedan ventilar los espacios de forma natural. Es importante equilibrar estas dos condiciones ambientales por medio de los grados de abertura del vano y, poder simultáneamente, ventilar los espacios con un nivel de atenuación del sonido tolerable para no tener incomodidad acústica.



### 3.2 Comportamiento de los niños

En la educación básica primaria en Colombia, los niños tienen edades que oscilan entre los 6 y 11 años. Durante este período, los niños viven importantes etapas en su desarrollo físico, social y cognitivo: entre los 6 y los 8 años se alcanza la fluidez en el lenguaje hablado y se concreta el lenguaje escrito con la conformación de ideas y frases completas, estas tareas se hacen a través de la repetición y de oír a sus propios semejantes, adicional a esto, leen textos acompañados por el profesor y la práctica de actividades físicas a través de juegos propicia la mayor carga metabólica dentro de las aulas. De los 8 a los 11 años empiezan los juegos de reglas y se afianza el pensamiento espacial, nace la lógica y son menos egocéntricos, es en esta etapa donde se desarrollan las actividades grupales, los lazos de amistad y la conformación de su propia personalidad (Munar, Rosselló, Mas, Morente, & Quetgles, 2002; Vázquez, 2007).

Durante su paso por la primaria el niño adquiere el lenguaje como forma de comunicación, tanto oral como escrita y se caracteriza por tener su propia fonología (Fabbri, 2015), por ello la importancia del diseño acústico y térmico con una correcta ventilación de las aulas de clase para estos grupos de edades. Lo ideal es que los espacios permitan el desarrollo de un modelo pedagógico por competencias, donde el salón es adecuado para en foros, cátedras o cualquier otra modalidad de enseñanza que permitan espacios.

### 3.3 Respuesta fisiológica a estímulos térmicos en los niños

La necesidad de renovación de aire dentro de las aulas es de 8 l/s por persona, es lo mínimo para garantizar la no propagación de enfermedades (“Calidad de ambiente interior,” 2009; Fuentes Freixanet, 2004; Montazami, Wilson, & Nicol, 2012). Un niño tiende a respirar alrededor de 20 veces por minuto, la respiración esta enlazada con su frecuencia cardiaca que es mucho mayor que la de un adulto (alrededor de 95,4 latidos por minuto, mientras los adultos en reposo son de 71 latidos por minuto); debido a esto, cada exhalación de los niños están arrojando al ambiente  $\text{CO}_2$  a una tasa mucho más alta, claro está que en menor volumen: alrededor de  $1,368+10^{-2}\text{m}^3/\text{h}$ , mientras que un adulto produce por cada expiración alrededor de  $2,337+10^{-2}\text{m}^3/\text{h}$ . Adicionalmente, la temperatura de confort en la piel debe estar alrededor de  $32\text{ }^\circ\text{C}$ , y la piel de un niño tiene menos área que la de un adulto; su tasa enfriamiento o de sofocamiento es mucho más elevada o sensible (Schibuola et al., 2016; Yarke, 2005). Los niños producen mucho más calor metabólico por unidad de masa corporal en sus actividades físicas (Garcia C, 2017) (ver figura 5).

EDAD	PESO(KG)	CAL/KG
2-5 AÑOS	15-20	45
6-10 AÑOS	20-35	40-45
11-15 AÑOS	35-60	25-40
adultos (30 años)	70	15-20

*Figura 5. Gasto metabólico según las edades*

*Nota:* Fuente (García C, 2017)

Según estudios realizados por el Departamento de Ciencias de la Salud de la Escuela de Graduados de la Universidad de Corea, se encontró que los niños tienen sensaciones térmicas más cálidas que los adultos y prefieren temperaturas más bajas, además se descubrió que las velocidades internas del viento empiezan a ser percibidas a partir de 0,3m/s por los niños. En los adultos ocurre a partir de 0,25m/s. Por otra parte la velocidad de viento confortable para los niños dentro del aula de clase en climas cálidos húmedos es a partir de 0,45m/s y para adultos a partir de 0,5m/s (Bojórquez, Luna, Gómez-Azpeitia, García-Cueto, & Ruiz-Torres, 2014; Fabbri, 2015; A. García Cardona, 2017; Yun et al., 2014).

### **3.4 Comportamiento acústico y de ventilación de las aulas**

Las aulas diseñadas en la ciudad de Medellín, funcionan, la gran mayoría de ellas, con ventilación natural cruzada puesto que es la indicada para el clima cálido- húmedo de la ciudad (Eysenbach, 2008; Jenks & Burgess, 2000). Teniendo en cuenta que no existe un delta de temperatura tan alto para permitir el movimiento del aire por convección, se recomienda esta ventilación para garantizar la renovaciones mínimas por hora por alumno; adicionalmente a lo expuesto, para zonas tropicales con poca velocidad de viento se recomienda que la dirección sea perpendicular al vano, dado que otras direcciones disminuyen los valores de velocidad al interior del aula en 0,1m/s y los porcentajes del área ventilada de la misma (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE, 2009; Yarke, 2005).

Una de las razones para ventilar naturalmente las aulas, es que los aires acondicionados representan un alto costo de energía y mantenimiento. Por las razones expuestas, las aberturas en la fachada son las que proporcionan la ventilación y a su vez dejan pasar el ruido exterior, creando problemas de inteligibilidad (Ercoli, Azzurro, & Stornini, 1999), teniendo ruidos de tráfico con un nivel de presión sonora entre de 72 dBA Leq y ruidos de fondo de un orden de 80 dBA Leq, según mapas de ruido elaborados por el área metropolitana (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015). Mientras que en Medellín hay 80dBA de ruido dentro la ciudad, la NTC 4595 exige un nivel de ruido de fondo de 40 a 45 dBA al interior de las aulas, lo que conlleva a que los colegios procuren aislar de la mejor manera las aulas para evitar que sean perturbadas las clases por los ruidos de fondo de la ciudad (Casas-García, Betancur-Vargas, & Montaña-Erazo, 2015; Instituto

Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC, 2016).

Por lo tanto, los niveles de atenuación necesarios para aulas en Medellín debe de ser, de un orden de 25 y 30 dBA con el fin de manejar un nivel óptimo de atenuación de ruido de fondo al interior, entre 45 y 50 dBA.

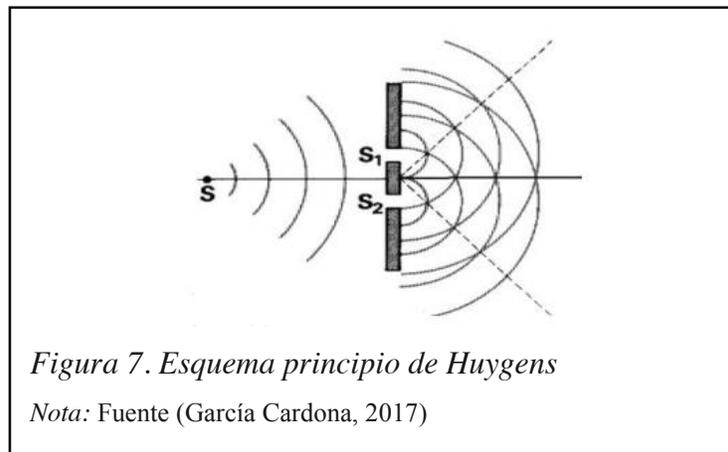
País	Fecha	Tipo	Descripción	Criterio	Baja frecuencia
Australia y Nueva Zelanda		Standard, AS/NZS 2107:2000	A-wtd Leq	35-45 (max)	
Belgica	1987	Standard	A-wtd Leq	30-45, re:extr	
chile			N/A		
Dinamarca	1995	Bygningsreglement	A-wtd Leq	35	
Egipto			N/A		
Francia	1995	Decree	A-wtd Leq	33,38	
Alemania	1983	Standard	A-wtd Leq	35-40	
Italia	1975	Std, UNI 8199	A-wtd Lmax	36	
Países Bajos		Guideline, NEN5077	A-wtd Leq	30-35-40	
Polonia	2002	Standard PN-87/B-02151/02	A-wtd Leq	35(equipamento edificios) 40(otras fuentes)	
Portugal	2002	Decree	A-wtd Leq	43(no continuo) 38(contínuo) (+3dBA margen) bibliotecas 38/33+3	
España		N/A			
Suecia	2001	Standard	Leq	26-40	
Turquia	1986	Regulation	A-wtd Leq	45	
Reino Unido	2004	Std, Building Bulletin	A-wtd Leq	35	
EUA	2002	Standard	A-wtd Leq	35-40	dBC<(dBA+20)

*Figura 6. Estándares de ruido de diferentes países*  
 Nota: fuente: (Evans, 2006)

El rango ideal en los ruidos de fondo dentro de las aulas para estudiantes de básica primaria es entre 30dBA y máximo 40dBA (Escobar Velásquez et al., 2011; Evans, 2007), además se deben tener en cuenta los sonidos en baja frecuencia, ya que estos perturban tanto a docentes como alumnos y generan mucha más fatiga y desconcentración (Evans, 2007; Sala & Rantala, 2016).

El espectro de frecuencias de la voz de los niños va de 500 Hz a 1000 Hz y el espectro del ruido de tráfico va desde 163 Hz a 4000 Hz (García Boscá & Mora, 2010), donde se evidencia que existe interferencia y que los niños deben elevar su nivel de voz para ser comprendidos, haciendo el ambiente mucho más ruido dentro de las aulas. Sumado a esto, en estas edades el oído del niño está en formación y las competencias comunicativas del pensum requieren de una buena transmisión de las ondas medias y altas donde se localiza la voz humana (Miyara, Pasch, Cabanellas, & Yanitelli, 2014).

Las ondas de sonido que ingresan por los vanos de las aulas dependen en cierta medida de su longitud de onda. Las longitudes de onda más pequeñas que las dimensiones del vano, ingresan sin obstáculos, por el contrario las longitudes de onda más grandes que el vano, se difractan al llegar a este y se emiten con la misma frecuencia a partir del centro del mismo, lo que se conoce como el principio de Huygens. Resumiendo, el ruido de tráfico con bajas frecuencias y longitudes de onda grandes se difractan en los vanos de las aulas, creando nuevos emisores de ruido al interior del mismo (A. García Cardona, 2017).



### 3.5 Las aberturas de las aulas de básica primaria según la NTC 4595

La NTC 4595, antes de la revisión del 2015, hace una clasificación de tres tipos de climas para las diferentes zonas del país: clima moderado frío, con temperaturas entre 5 y 22 °C y humedades relativas entre 40 y 60%; clima cálido seco con temperaturas entre 5 y 35 °C y humedades relativas entre 10 y 60%; y clima cálido húmedo con temperaturas entre 22 y 32 °C y humedades relativas entre 65 y 95%. Es en este último, el que se acerca más al comportamiento climático de Medellín, y con base en esto se puede establecer, según la norma citada, qué porcentaje de abertura se exige para las aulas. Según la norma, para el clima donde clasifica la ciudad, las aberturas deben tener una orientación hacia la dirección predominante del viento de 45° y establecer una ventilación cruzada. El área efectiva de ventilación debe corresponder a 1/6 del área del aula en planta (ver figura 10), y la altura mínima del interior del aula debe ser 3 m (ver figura 9). En cuanto a la radiación, se deben buscar que la mayor cantidad de aberturas estén orientadas en el eje norte-sur y deben contar con elementos arquitectónicos de protección contra los rayos directos del sol sobre los espacios y superficies de trabajo.

Dimensiones		6 años (n=384)					7 años (n=405)					8 años (n=375)				
				Percentiles					Percentiles					Percentiles		
		$\bar{x}$	D.E.	5	50	95	$\bar{x}$	D.E.	5	50	95	$\bar{x}$	D.E.	5	50	95
22	Altura normal sentado	633	30	584	634	682	654	29	606	655	702	676	31	625	675	727
23	Altura hombro sentado	385	26	342	385	428	403	26	360	403	446	421	27	376	420	466
24	Altura omoplato	304	22	268	304	340	316	25	275	315	357	325	25	284	324	366
25	Altura codo sentado	161	23	123	162	199	164	23	124	163	202	169	27	126	167	214
26	Altura máx. muslo	97	13	76	96	118	102	14	79	100	125	108	14	85	107	131
27	Altura rodilla sentado	350	22	314	351	386	370	25	329	368	412	389	25	348	389	431
28	Altura poplítea	296	18	266	297	326	312	20	279	312	345	328	19	297	326	360
29	Anchura codos	333	37	272	332	394	348	41	281	348	416	363	40	297	356	429
30	Anchura cadera sentado	238	24	198	235	278	248	29	201	244	296	262	32	209	256	315
31	Longitud nalga-rodilla	384	26	341	382	427	409	26	366	406	452	429	27	385	427	474
32	Longitud nalga-poplíteo	314	24	274	314	354	335	24	295	333	375	352	25	311	350	394
33	Diámetro a-p cabeza	175	8	162	176	188	177	7	165	177	188	178	7	166	179	189
48	Perímetro cabeza	514	18	484	515	544	518	15	493	520	543	522	16	496	520	548

Figura 8. Dimensiones antropométricas

Nota: fuente: (Roselia et al., 2007). Se explica cómo altura del codo es la altura base para establecer los sillares de ventana y garantizar que el flujo de aire que entre refresque a los alumnos.

Ambiente	Frio/templado	calido/seco	calido/humedo
Ambiente E	2,2	2,2	2,2
Oficinas, tubículos para música, Baños, Cuartos de servicio y bodegas	2,2	2,5	2,5
Ambientes A, B, C	2,7	3,0	3,0
Ambiente F	3	3,5	3,5
Ambiente D	NO INFERIOR A LOS 1/3 SEGÚN DISCIPLINA		

Figura 9. Altura del aula bajo la NTC 4595

Nota: fuente adaptada de (Norma técnica colombiana NTC 4595 - 4596 - Ministerio de Educación Nacional de Colombia, 2006).

AMBIENTE	FRIO/TEMPLADO	CALIDO SECO	CALIDO HUMEDO
OFICINAS, AMBIENTES A, AMBIENTES B EN BIBLIOTECAS, AMBIENTES DE CUBIERTOS, Y AMBIENTES EN SALONES DE COMPUTO, AMBIENTES C, AMBIENTES E, COCINAS Y BAÑOS	1/15 A 1/12 DEL AREA DE LA PLANTA	1/9.	1/6.
	1/12 A 1/10 DEL AREA DE LA PLANTA	1/8.	1/5.

Figura 10. Área de las ventanas bajo NTC 4595

Nota: fuente adaptada de (Ministerio de Educación Nacional de Colombia, 2006)

En la versión revisada del 2015, la NTC 4595, reclasifica los climas de la siguiente manera: zona climática fría y templada, donde la zona fría va desde 1800 msnm hacia arriba con temperaturas entre 12 y 17 °C, y humedades relativas entre 60% y 80%, con velocidades de viento entre 1m/s y 3 m/s, con una área efectiva de ventilación de 1/15 del área en planta del aula; en la zona templada, donde se puede clasificar a Medellín, va desde los 800 a los 1800 msnm, con temperaturas entre 18 y 24 °C, humedades relativas entre 70% y 80% y con velocidades de viento entre 1m/s y 3m/s y con un área efectiva de ventilación de 1/12 del área en planta del aula (NTC 4595, 2015).

A la luz de la revisión de la NTC 4595 del 2015, el área efectiva de la entrada del aire se reduce a la mitad del caudal con respecto al de la norma del 2006, lo que disminuye significativamente las renovaciones por hora; adicionalmente, usando las formulas empíricas para dimensionamiento de los vanos de entrada y salida del flujo de aire, no cumple con las dimensiones mínimas de vano, y revisando la norma NTC 4595 del 2015 para el clima templado, las temperaturas límites son entre 18 y 24 °C, rango que corresponde a las mañanas en Medellín. Por esa razón se decide trabajar con el rango del clima cálido húmedo de la NTC 4595 del 2006, que se asemeja mucho más al comportamiento del clima que corresponde a las jornadas de trabajo en los colegios. Las velocidades de viento al interior de las aulas no superan 1m/s (A. García Cardona, 2017). Es conveniente aclarar que la NTC 4595, en sus dos versiones, no logra clasificar a Medellín climáticamente, pues es una ciudad con un clima cálido húmedo de montaña, donde las corrientes de aire se ven influenciadas por esta condición, produciendo variedad de microclimas, por ello cada sitio específico se debe evaluar climáticamente. Este trabajo pretende ser solo una herramienta para el proyectista en su etapa inicial de diseño.

Con lo anteriormente descrito, hay que resolver un problema de proporción y área de las aberturas, de tal manera que garantice dentro del aula, la distribución del viento a lo largo del espacio con la menor afectación en cuanto a la filtración de ruidos de fondo (ICONTEC & Colombia. Ministerio de Educación Nacional, 2006).

El 80% de los colegios en Medellín se ubican en las laderas: los vientos tienen orientaciones occidente-orientado y viceversa (Secretaría de educación de Medellín, 2018), y por la topografía los edificios se colocan paralelos a las curvas de nivel. Estos factores hacen que las ventanas se ubiquen perpendiculares al flujo del viento, en contravía de lo que exige la Norma (García Cardona, 2016)

Una variable importante para determinar el volumen a ventilar, está dada por los metros cuadrados exigidos por cada estudiante en la NTC 4595. Para básica primaria se exige como máximo 40 personas (incluyendo el profesor) por aula, a razón de 1,65 a 1,80 m<sup>2</sup> por persona; cada vez que se reduzca en 10 alumnos, la capacidad total debe aumentarse en el área ocupada por alumno, a razón de 0,10 m<sup>2</sup>. Se exige 1,80 m<sup>2</sup> por alumno, cuando el amueblamiento es individual con pupitres de 0,50m\*0,70 m (ver tabla 1).

*Tabla 1. Relación número estudiantes/ área m<sup>2</sup>*

<b>Ambiente</b>	<b>Número</b>	
	<b>máximo de estudiantes</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>/Estudiante)</b>
Prejardín (3-4años)	15	2,00
Jardín (4-5 años)	20	2,00
Transición 5-6 años)	30	2,00
Básica y Media 6-16	40	1,65 a 1,80

*Nota:* fuente adaptada (NTC 4595 - 4596 - Ministerio de Educación Nacional de Colombia,"2006)

### **3.6 Referencia de investigaciones sobre aberturas en las aulas**

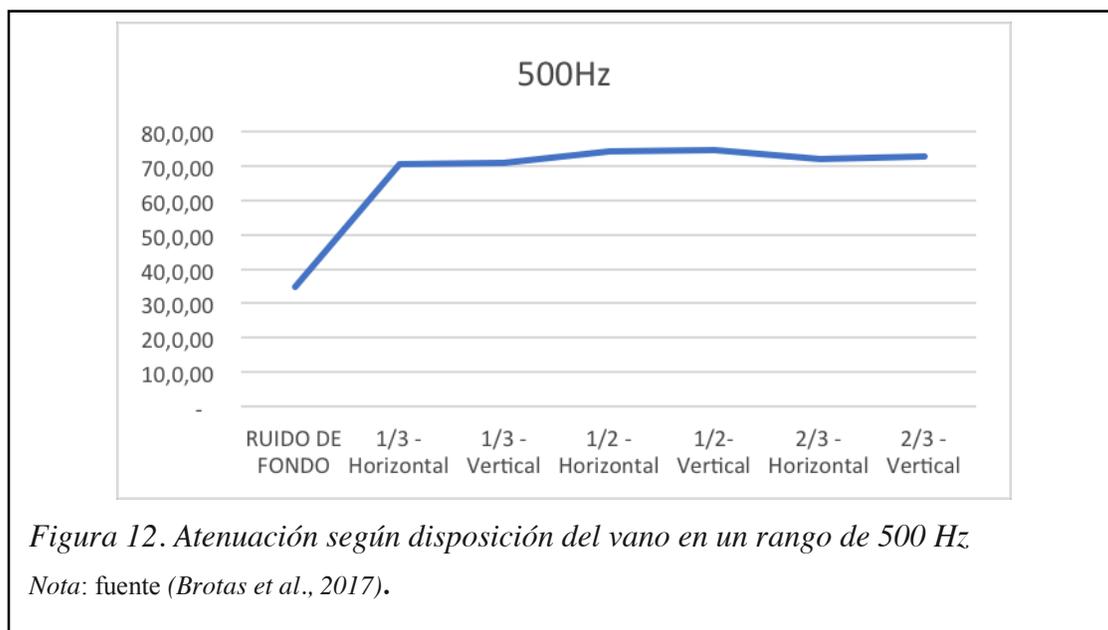
Esta investigación parte de un estudio hecho durante la Maestría en Bioclimática. Nace de la necesidad de estudiar la forma de los vanos en la fachada y del cuestionamiento acerca de la atenuación del sonido que ingresa por los mismos. Se hacía la pregunta sobre el mayor porcentaje de distribución del aire al interior vs. la apertura de las ventanas. Con base en esta pregunta, se quiere profundizar en cómo poder hallar la forma y el área más conveniente para mejorar la atenuación del ruido, y qué porcentaje de abertura del vano es el más conveniente para equilibrar estas dos variables (Brotas et al., 2017).

De esta investigación se concluye que los vanos de forma horizontal, en proporciones 1:3 y 2:3 con respecto al área de fachada, logran atenuaciones en la frecuencia de 500 Hz, de un orden de 0,5 y 0,86 dBA, y en frecuencias de 4000 Hz se logran atenuaciones de entre 2 y 4 dBA. Adicionalmente estos vanos, tienen una cobertura en ventilación de 86,1% del área. La importancia de este estudio radica en que los resultados demuestran que la forma y proporción del vano influye

en la atenuación acústica, y es de donde se parte para investigar cuanta abertura es suficiente para lograr una atenuación aceptable dentro del aula y cuanta área ventilada se logra con dicha abertura, ver figuras 11 y 12.

Posición del vano	LeqA	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
RUIDO DE FONDO	77.89	34.60	32.93	37.67	40.80
1/3 - Horizontal	100.68	70.43	73.37	80.13	80.53
1/3 - Vertical	100.53	70.93	72.50	79.20	82.63
1/2 - Horizontal	101.57	74.33	74.83	79.20	81.50
1/2 - Vertical	101.83	74.73	75.17	80.93	81.10
2/3 - Horizontal	101.23	71.97	73.40	78.97	80.20
2/3 - Vertical	101.23	72.83	73.60	79.77	81.53

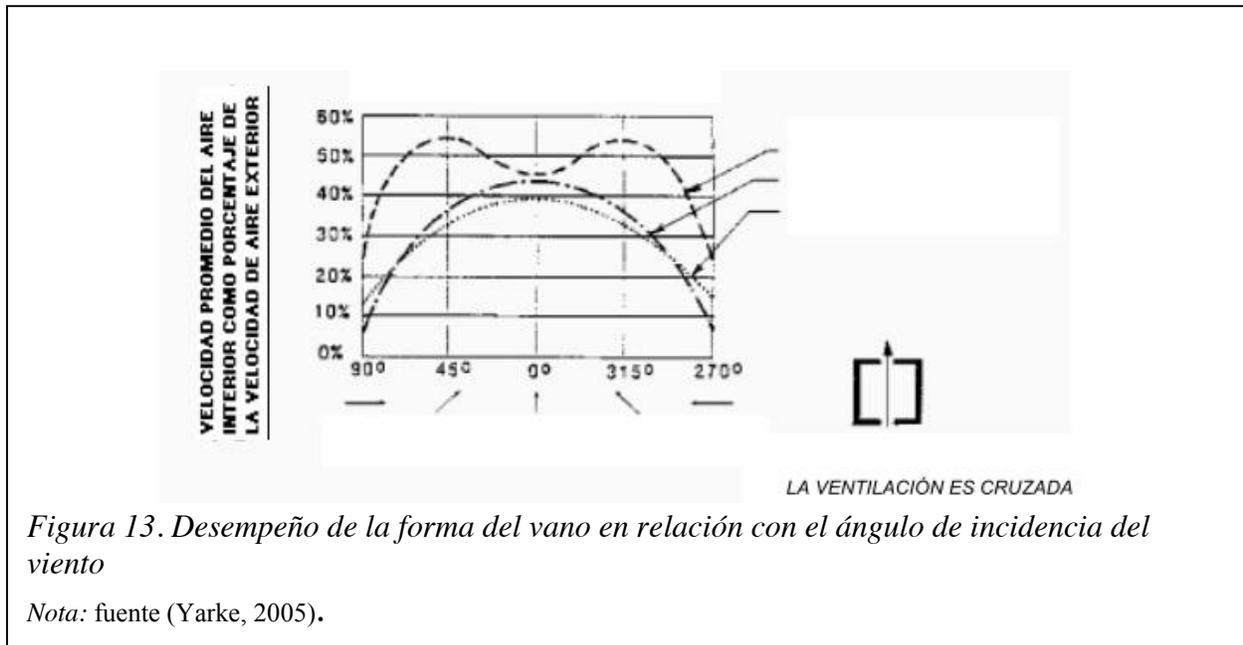
*Figura 11. Medición de los ruidos según la forma del vano medidos en la cámara reverberante*  
 Nota: fuente (Brotas et al., 2017).



Otra de las referencias que ayudaron en gran medida a este trabajo investigativo, fue la investigación realizada entre la Universidad de Dalian en China y el Instituto Politécnico de Virginia, donde se evalúa cual diseño de ventanas genera mejores índices de ventilación dentro de los recintos (Wang, Wang, Zhang, & Battaglia, 2017). Las mejores conformaciones de ventana que generan menos turbulencia al interior de los espacios y con mejores tasas de ventilación son las

ventanas pivotadas en su eje, tanto en su posición vertical como horizontal.

En estudios efectuados por Yarke, se recomienda la forma horizontal para el refrescamiento, siendo esta la que mejor funciona para dar entrada a diferentes direcciones del



viento en cuanto a su distribución interna en los espacios (2005).

### 3.7 Ventilación natural

Las diferencias de presiones creadas por la superficie de la envolvente y el delta de temperatura entre el interior y exterior, hacen que el aire se desplace entre las zonas de baja presión a zonas alta presión; al tropezarse esta masa de aire, que se llama viento, con las edificaciones, la topografía, vegetación etc., es perturbado y desviado por encima y por los lados, creando presiones positivas en la fachada que lo recibe de frente (barlovento), además de presiones negativas en la fachadas posterior y laterales con succión (sotavento). Estas dos formas de presiones forman diferentes patrones de flujo de aire con turbulencias que se conocen como sombra de viento (Yarke, 2005).

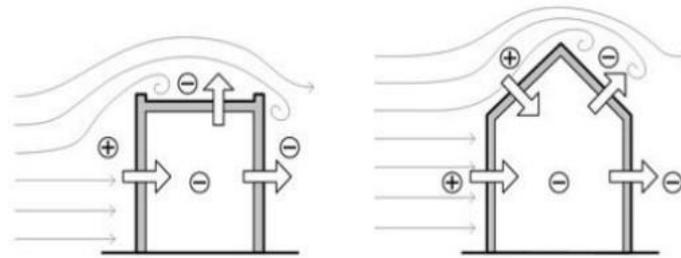


Figura 14. Diferentes presiones de viento sobre edificios

Nota: fuente (Beltrán & Castillo, 2015).

La ventilación natural depende de dos principios de la mecánica de fluidos. La flotabilidad térmica y la fuerza o velocidad del viento, consiste en la fuerza que se produce cuando existen diferencias de presiones entre el interior y el exterior debido al gradiente de temperaturas, creando movimientos de flujo por la disparidad de la densidad del aire, lo que genera presiones más altas en la parte superior y presiones más bajas en la parte inferior del edificio, creando lo que se conoce como eje neutro de presión NPL (Neutral Pressure Level). Este nivel es la altura en que las presiones interiores y exteriores se igualan, esto es llamado también *efecto stack* (ver figura 15).

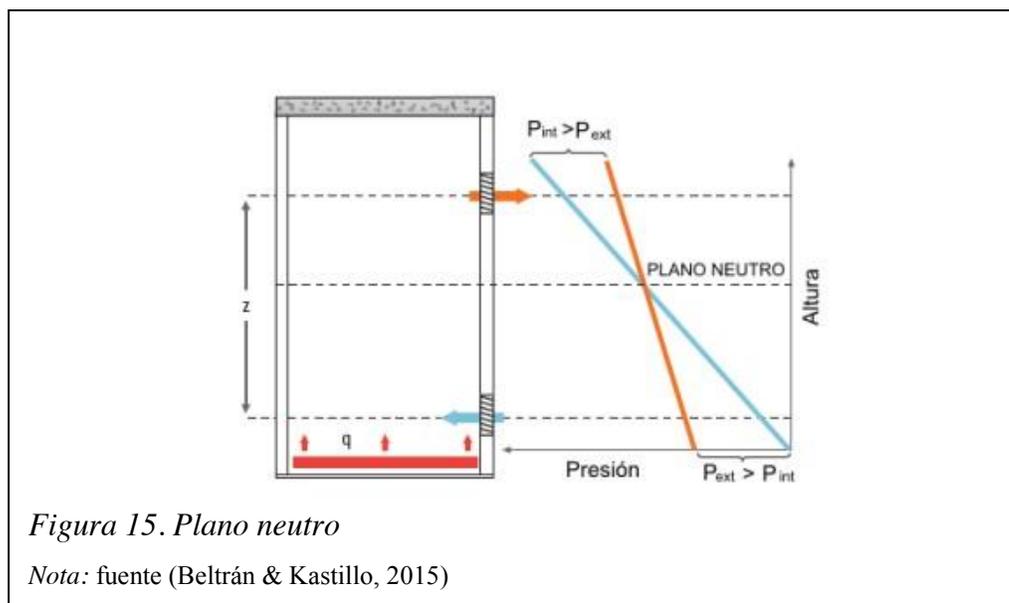


Figura 15. Plano neutro

Nota: fuente (Beltrán & Castillo, 2015)

### 3.7.1 Corrección de velocidades del viento.

Es importante, antes de analizar los diferentes métodos empíricos de medición, saber que las condiciones del viento exterior son modificadas y alteradas por: los flujos, la topografía, la vegetación, el urbanismo y la forma y ubicación de los vanos alrededor de los edificios. El tipo de vegetación puede ayudar a resguardar del viento, desviarlo, ayudar a la aceleración y humectar el aire. La distancia de las aberturas a la vegetación es de vital importancia, ya que puede afectar los desplazamientos verticales del aire al interior de los espacios (Van Moeseke, Gratia, Reiter, & De Herde, 2005).

Las velocidades del viento son tomadas por lo general en estaciones meteorológicas, a una altura de 10 m sobre el suelo, estas estaciones casi siempre, en Colombia, están situadas cerca a los aeropuertos. Las velocidades del aire son modificadas o perturbadas, como se dijo anteriormente, por la rugosidad del terreno por la densidad de urbanización y por la vegetación, por tanto, se debe aplicar factores de corrección, para ello se usa la siguiente fórmula:

$$v(z) = v(z_0) \left[ \frac{z}{z_0} \right]^{\alpha} \quad ((1))$$

Ecuación (1) en donde:

$v(z)$  = velocidad del viento a una altura  $Z$  [m/s],

$v(z_0)$  = velocidad del viento a una altura de referencia  $Z_0$  (ms)

$\alpha$  = exponente que depende del terreno

El exponente que  $\alpha$  es coeficiente que depende de la rugosidad del terreno y se incrementa cuanto más rugoso este sea, para ello existen cuadros que tasan este coeficiente según los obstáculos.

Clase	Entorno	Exponente de perfil de velocidades $\alpha$
I	Edificio expuesto	0.17
II	Campo con algunos obstáculos	0.20
III	Urbanizado	0.25
IV	Centro de la ciudad	0.33
V	Area urbana de muy alta densidad	0.45

Figura 17. Coeficiente de rugosidad

Nota: fuente (Yarke, 2005)

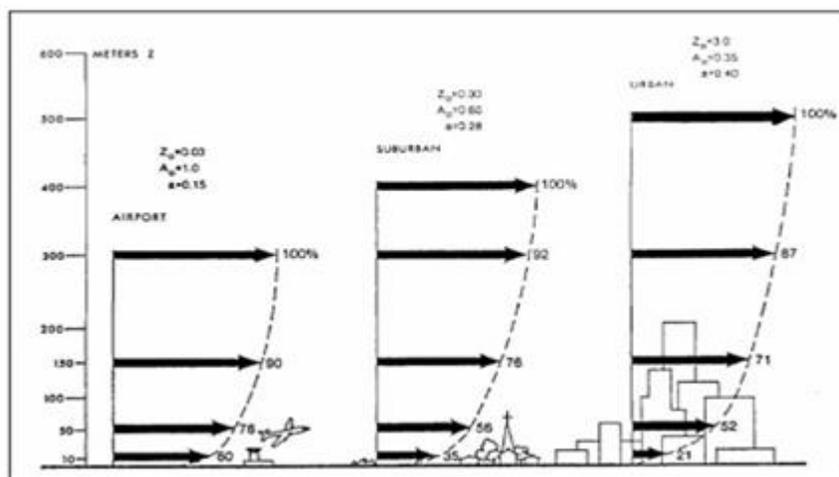


Figura 16. Perfiles de velocidad en diferentes terrenos

Nota: fuente (Yarke, 2005).

Este trabajo se concentra más en la distribución del aire al interior del aula, y no en el confort térmico de los individuos, ya que el interés es encontrar la relación entre la abertura del vano y la cantidad de área ventilada al interior del espacio, por ello es necesario el uso de modelos CFD que arrojen resultados de campos de distribución y velocidad de aire.

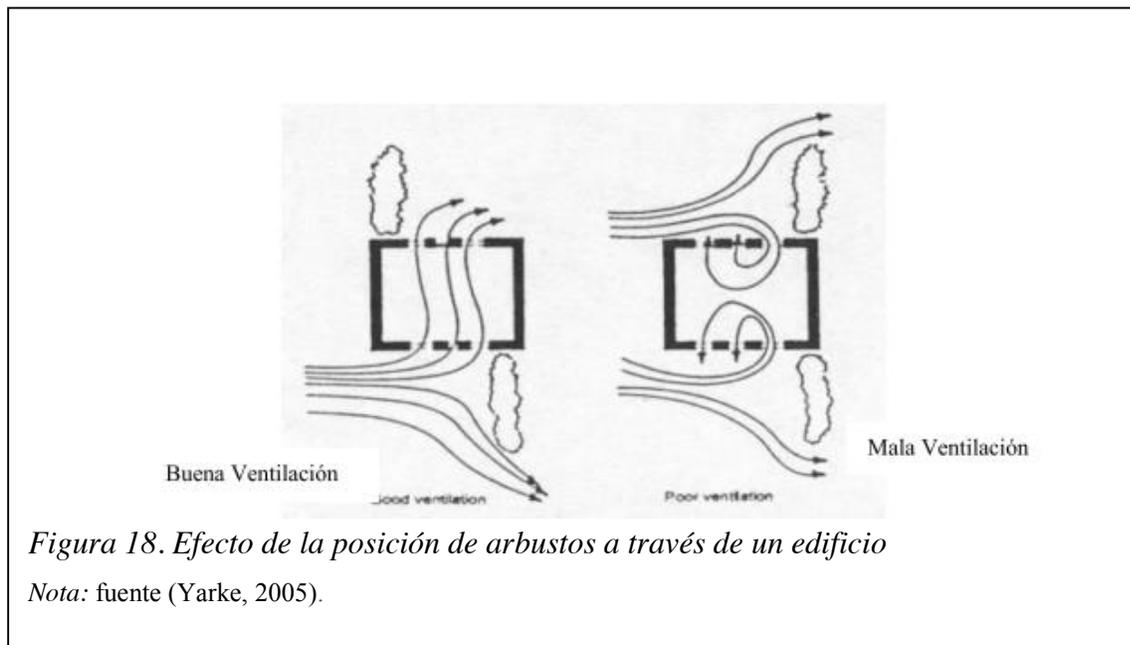


Figura 18. Efecto de la posición de arbustos a través de un edificio

Nota: fuente (Yarke, 2005).

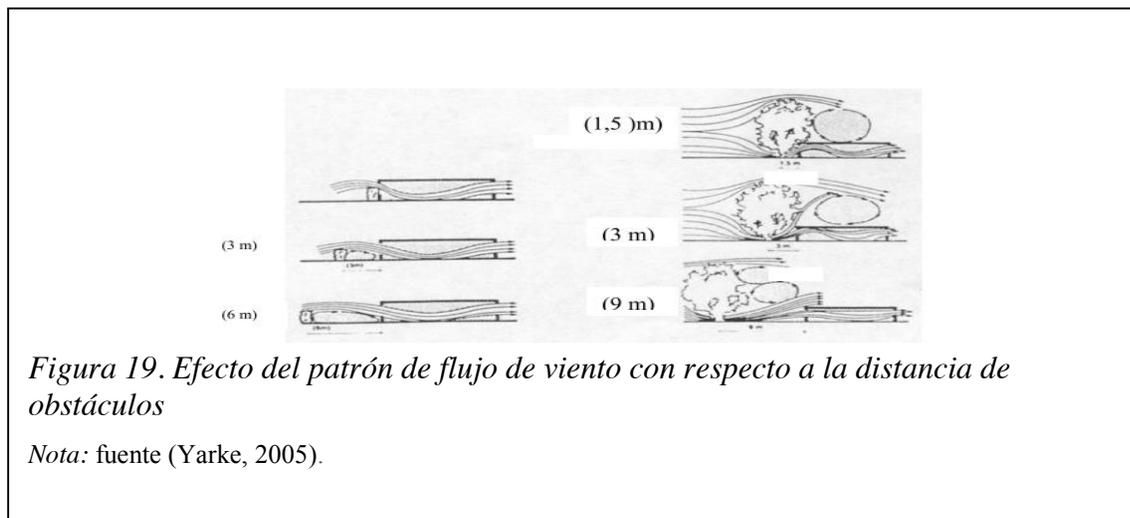


Figura 19. Efecto del patrón de flujo de viento con respecto a la distancia de obstáculos

Nota: fuente (Yarke, 2005).

Las zonas donde el flujo del aire es acelerado son las de mayor presión negativa y se recomienda colocar las aberturas de salida sobre estas fachadas. Los aleros aumentan las presiones positivas en el exterior, induciendo flujos mayores del aire al interior de las aulas. En cuanto a la localización de los vanos lo más conveniente es colocarlos enfrentados para generar una ventilación cruzada, y la proporción que mejor distribución de aire al interior ofrece es la forma horizontal. Mientras más se aleja de esta proporción el porcentaje de ventilación al interior de las aulas es mucho menor; es importante también saber que para tener mayores flujos y mayores velocidades

al interior, los vanos de entrada y de salida deben de ser del mismo tamaño (ver siguiente tabla) (Erhart, Guerlich, Schulze, & Eicker, 2015; Yarke, 2005).

Ancho vano entrada/ ancho pared	Ancho vano salida/ ancho pared	Vi promedio % de la Ve
1/3	1/3	35
1/2	1/2	36
2/3	2/3	37

*Figura 20. Porcentajes Promedio de velocidades del viento con respecto a la proporción del vano*

*Nota: fuente (García, 2017).*

Adicional a la forma horizontal del vano, es importante considerar la localización del mismo, ubicándolo centrado en la fachada, lo que genera la mejor distribución del aire al interior de las aulas (Yarke, 2005). Si se busca una distribución que abarque la mayor cantidad de alumnos, el sillar debe obedecer a la ergonomía de los ocupantes (Picción, Camacho, Cheirasco, Noel López, & Milicua, 2010). Según Givonni la forma horizontal es la que tiene la mejor forma para cubrir la mayor área ventilada dentro de los espacios, y según el panel de expertos en la tesis doctoral de Ader García, la condición más influyente dentro de las aulas de clase es la ventilación (García C, 2017; Teli, Jentsch, & James, 2012; Yarke, 2005)

En sitios tropicales es frecuente el uso de mosquiteros o mallas, estos elementos reducen el flujo en un 60% y su colocación funciona mejor en direcciones perpendiculares del viento. Para poder medir los parámetros de la ventilación natural se tienen varias maneras:

A. Cálculos empíricos usando algoritmos de experimentación hechos a través de túneles de viento o de espacios reales que han estado bajo estudio.

B. Con el software CFD (Computacional Fluid Dynamic), que usa modelos y algoritmos matemáticos resolviendo las ecuaciones de conservación de masa, energía y momento, dando resultados de movimientos de masa, distribución y velocidad del viento.

Para los cálculos empíricos basados en experimentación, existen varias metodologías: 1. el cálculo de caudal de aire, 2. calcular la estimación de aire dentro de los edificios, y 3. calcular el tamaño de las aberturas.

### 3.7.2 Métodos empíricos para el cálculo del caudal.

Existen varios: A. Bristish Standard, B. Método Ashrae, C. Método Aynsley, y D. Método Gridds y Phaff. Para el cálculo del caudal, se seleccionó el método Bristish Standard, el cual tiene en cuenta: ventilación cruzada usando una sola abertura de entrada y otra de salida y no contempla el delta de temperatura. El método British Standard propone el cálculo de ventilación de espacios con una abertura en fachada y con ventilación cruzada. En este cálculo empírico se descartan divisiones internas y en cada caso se proponen ecuaciones derivadas del efecto del viento y del efecto de diferencia de temperatura así:

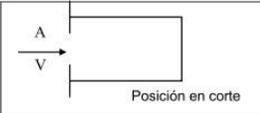
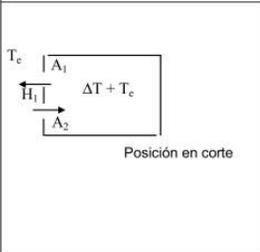
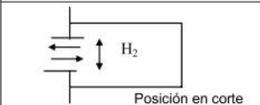
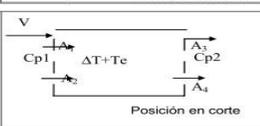
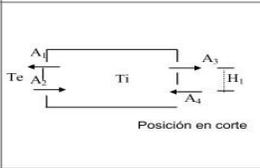
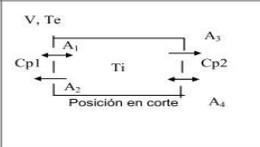
<p>(a) Ventilación debida al efecto del viento  <math>Q=0,025AV</math>                      Donde <math>Q[m^3/s]</math> es el caudal de aire, <math>A[m^2]</math> es la superficie de aberturas y <math>V [m/s]</math> la velocidad del viento.</p>	 <p>Posición en corte</p>
<p>(b) Ventilación debida al efecto de la diferencia de temperaturas con dos aberturas</p> $Q = C_d A \left[ \frac{\varepsilon \sqrt{2}}{(1 + \varepsilon)(1 + \varepsilon^2)^{1/2}} \right] \left( \frac{\Delta T g H_1}{\bar{T}} \right)$ <p><math>\varepsilon = A_1/A_2</math>, <math>A = A_1 + A_2</math>                      donde <math>C_d</math> es el coeficiente de descarga, <math>\Delta T</math> es la principal diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior, y <math>\bar{T} = \frac{T_e + T_i}{2}</math> en <math>K^\circ</math>.</p>	 <p>Posición en corte</p>
<p>(c) Ventilación debida al efecto de la diferencia de temperaturas con una abertura</p> $Q = C_d \frac{A}{3} \sqrt{\frac{\Delta T g H_2}{\bar{T}}}$	 <p>Posición en corte</p>
<p>(a) Ventilación debida al efecto del viento</p> $Q_w = C_d A_w V \sqrt{\Delta C p}$ $\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$	 <p>Posición en corte</p>
<p>(b) Ventilación debida al efecto de la diferencia de temperaturas</p> $Q_b = C_d A_b \left( \frac{2 \Delta T g H_1}{\bar{T}} \right)^{0,5}$ $\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$ <p><math>T = \frac{T_e + T_i}{2}</math> en <math>K^\circ</math></p>	 <p>Posición en corte</p>
<p>(c) Ventilación debida al efecto del viento y de la diferencia de temperaturas</p> <p><math>Q = Q_b</math> para <math>\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} &lt; 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C p}}</math></p> <p><math>Q = Q_w</math> para <math>\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} &gt; 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C p}}</math></p> <p><math>\Delta T = T_i - T_e</math></p>	 <p>Posición en corte</p>

Figura 21. Formulas empíricas de caudal

Nota: fuente (Yarke, 2005).

### 3.7.3 Métodos empíricos para el cálculo de la velocidad del aire dentro de los edificios.

Son los siguientes: A. Método Givonni, B. Método basado en datos tabulados, C. Método CSTB (Centro Científico en Técnicas de Ventilación), y D. Método Ernest (Yarke, 2005). Para el cálculo de la velocidad interna del aire se escogió la fórmula empírica Givonni, ya que usa corrección de la velocidad del viento y adicionalmente es diseñada para viento cruzado, que es la forma como deben ventilarse las aulas en Medellín por tener vientos leves y suaves. El método Givonni es utilizado para calcular la velocidad promedio dentro de un recinto con características cuadradas, con abertura de entrada igual a la de salida, ubicadas en paredes opuestas así:

$$V_i = 0,45 \left( 1 - e^{-3,48x} \right) V_{r \text{ vi}} \quad (2)$$

Ecuación (2) en donde:

**V<sub>i</sub>** es la velocidad promedio interior m/s

**X** es la relación entre área de abertura sobre el área de la pared donde esta se ubica.

**V<sub>r</sub>** es la velocidad externa de referencia

### 3.7.4 Método empírico para dimensionar las aberturas de fachada.

Son cinco métodos a saber: A. The Florida Solar Energy Centre Method I, B. The Ashrae, C. Método Ansley, D. Método British Standard. El método seleccionado para el cálculo de las aberturas y corrección de la velocidad del viento es el The Florida Solar Energy Centre Method I. Este Método, asume la entrada de aire igual a la salida, no tiene en cuenta el efecto de la temperatura, y se calcula con la siguiente expresión:

$$TOA = \frac{1,16 \cdot 10^3 \cdot V \cdot ach}{W \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4} \quad (3)$$

Ecuación (4) En donde TOA, es el área total de la abertura (entrada más salida) en M<sup>2</sup>,

V= es el volumen del espacio o del edificio en M<sup>3</sup>

**ach**= son las renovaciones por hora de diseño (1/h)

**W**= es la velocidad del viento m/s

**F1**=es el coeficiente del ángulo de incidencia del viento, el ángulo 0 indica que el viento tiene dirección perpendicular a la fachada del edificio

*Tabla 2. Factor de corrección debido al ángulo de incidencia del viento*

<b>Ángulo de incidencia del viento</b>	<b>F1</b>
0-40	0,35
50	0,3
60	0,25
70	0,2
80	0,14
90	0,08

*Nota:* fuente (Yarke, 2005).

F2= es el coeficiente de corrección debido al terreno. Está en función de la ubicación del edificio.

*Tabla 3. Corrección por terreno f2*

<b>Tipos de terreno</b>	<b>Ventilación 24 horas</b>
Costa o cerca del océano	1,3
Aeropuerto o terrenos planos con edificios	1,00
Separado por muros aislados rural	0,85
Suburbano o industrial	0,67
Centro de una gran ciudad	0,47

*Nota:* Fuente (Yarke, 2005)

F3= es el coeficiente debido a densidad urbana. Este factor está en función de la altura h del obstáculo que interrumpe el camino del viento al edificio y la distancia entre ellos (g). La relación g/h se ha generado por estudios en túneles de viento.

*Tabla 4 Factor de corrección por vecindario f3*

<b>Relación g/h</b>	<b>F3</b>
0	0,00
1	0,41
2	0,63
3	0,77
4	0,85
5	0,93
6	1,00

*Nota:* Fuente (Yarke, 2005)

F3= coeficiente de multiplicación debido a la altura. Para ventanas en segundo piso el factor es 1,15, de lo contrario es igual a 1. Se considera que las velocidades del aire al interior de las aulas es de 0,45 m/s o superiores, el PMV se clasifica como confort, según estudios aplicando el método Fanger en niños (Fabbri, 2015; García Cardona, 2016).

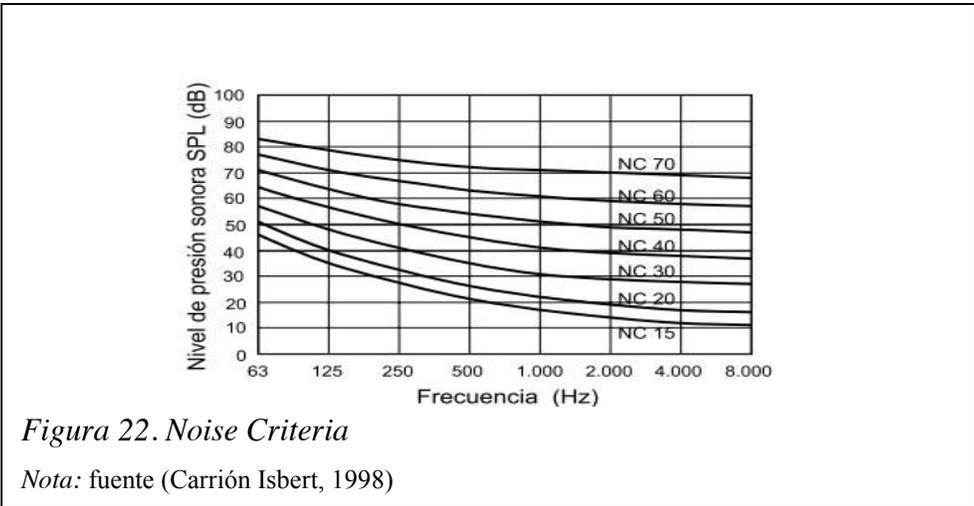
### **3.8 Acústica**

Existen dos tipos de ámbitos acústicos: el acondicionamiento y el aislamiento. El primero es aquel donde el objetivo es realizar un control del sonido reverberante, que se utiliza en teatros, auditorios, aulas de clase, etc. El segundo es aquel donde la meta es minimizar la energía sonora incidente, utilizado en hospitales, estudios de grabación, bibliotecas, etc. (Medina Valdez, 2009).

#### **3.8.1 Ruido.**

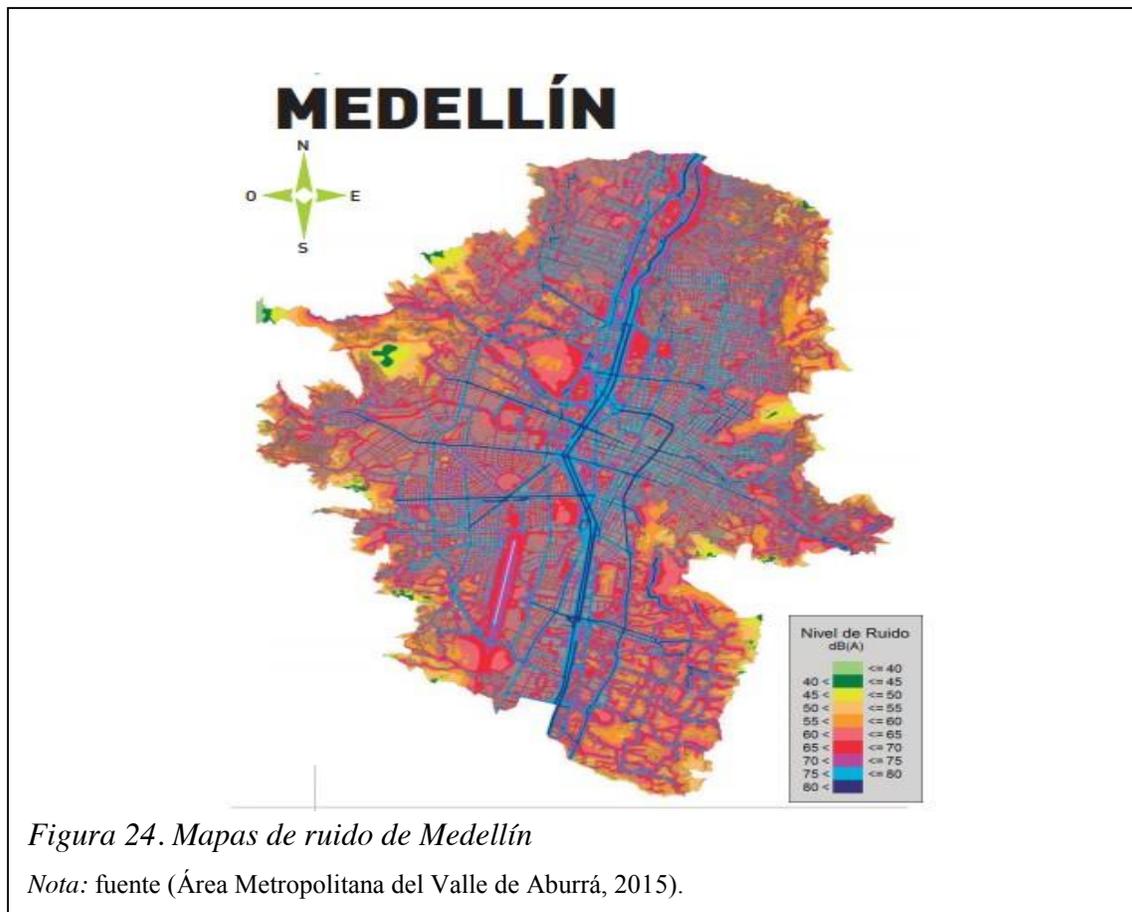
El ruido es cualquier sonido no deseado o cualquier sonido que no se le esté prestando atención y que se interpone en la comprensión del sonido principal; puede provenir del interior o exterior, por ejemplo: tráfico, movimientos de sillas, sonidos de sistemas de aire acondicionado, vecinos etc., y puede causar trastornos de sueño, fatigas, problemas de aprendizaje. Los ruidos de fondo que tienen relación con el tráfico o ruidos provenientes de la calle, tienen un espectro muy amplio de frecuencias, predominando las bajas frecuencias en bandas de 2000 Hz y 4000 Hz (Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía - OSMAN, 2009).

El ruido altera de tres maneras la percepción de la palabra: 1. Alteración del espectro, 2. Por enmascaramiento, y 3. Confusión de patrones temporales, este último ocurre cuando al sonido útil se le superpone el espectro resultante y difiere del original, dando como resultado un patrón espectral alterado que dificulta su interpretación (Jacome, 2009). La molestia causada por un determinado ruido se determina por cada banda de octava entre 63 Hz y 8 KHz, comparándolas con curvas tabuladas de referencia llamadas NC (Noise Criteria). Las NC son utilizadas para establecer clasificación de ruidos máximos por determinada función de los espacios, se dice que un recinto cumple con determinada especificación NC cuando está por debajo de ella (Carrión Isbert, 1998).



Tipo de recinto	Cuevas NC recomendada	Equivalencia en dBA
Estudio de grabación	15	28
Salas de concierto y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias/aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas/bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Taller (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Taller (maquinaria pesada)	50-65	60-75

*Figura 23. Curvas NC de diferentes espacios y su equivalencia en dBA*  
 Nota: fuente (Carrión Isbert, 1998)



La curva NC que se debe usar para criterios de aislamiento y acondicionamiento de aulas es la NC 20-30 que tiene como equivalencia en decibelios entre 33 y 42 dBA. Esto reafirma lo dicho anteriormente en cuanto a la exigencia de la norma Colombiana NTC 4595, donde reglamenta ruidos de fondo para aulas entre 40 y 45 dBA, muy por debajo de los estándares mundiales. Si a esto se suma que las aulas de básica primaria son (por la característica de sus usuarios) ruidosas, los diseños presentados pueden tener deficiencias a la hora de su funcionamiento. Por otro lado, según estudios, los límites máximos permitidos son de 50 dBA en aulas de clase para no perder concentración. Esto contrasta con los estudios y mediciones hechos en Medellín por el Grupo Emat de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional para jardines infantiles en áreas densamente pobladas, donde también se asientan los colegios de esta ciudad. Se encontraron mediciones en promedio de 57,9 dBA (Marin-Restrepo, Morales-Maya, Guerrero-Teran, Garcia-Cardona, & Waldron-Toro, 2015).

En las aulas de clase es muy importante evitar los ruidos de fondo que producen los enmascaramientos de la voz, provocando la pérdida del mensaje, pues las consonantes tienen un tiempo de emisión menor que el de las vocales (alrededor de 20 milisegundos), y son las consonantes las que dan sentido al mensaje oral porque ellas se emiten en un contenido frecuencial abundante. Por otro lado, y para reforzar la importancia de las consonantes en el mensaje oral, existe una estrecha relación entre la inteligibilidad de la palabra con la correcta percepción de las altas frecuencias (Miyara, Miyara, Pasch, Cabanellas, & Yanitelli, 2014).

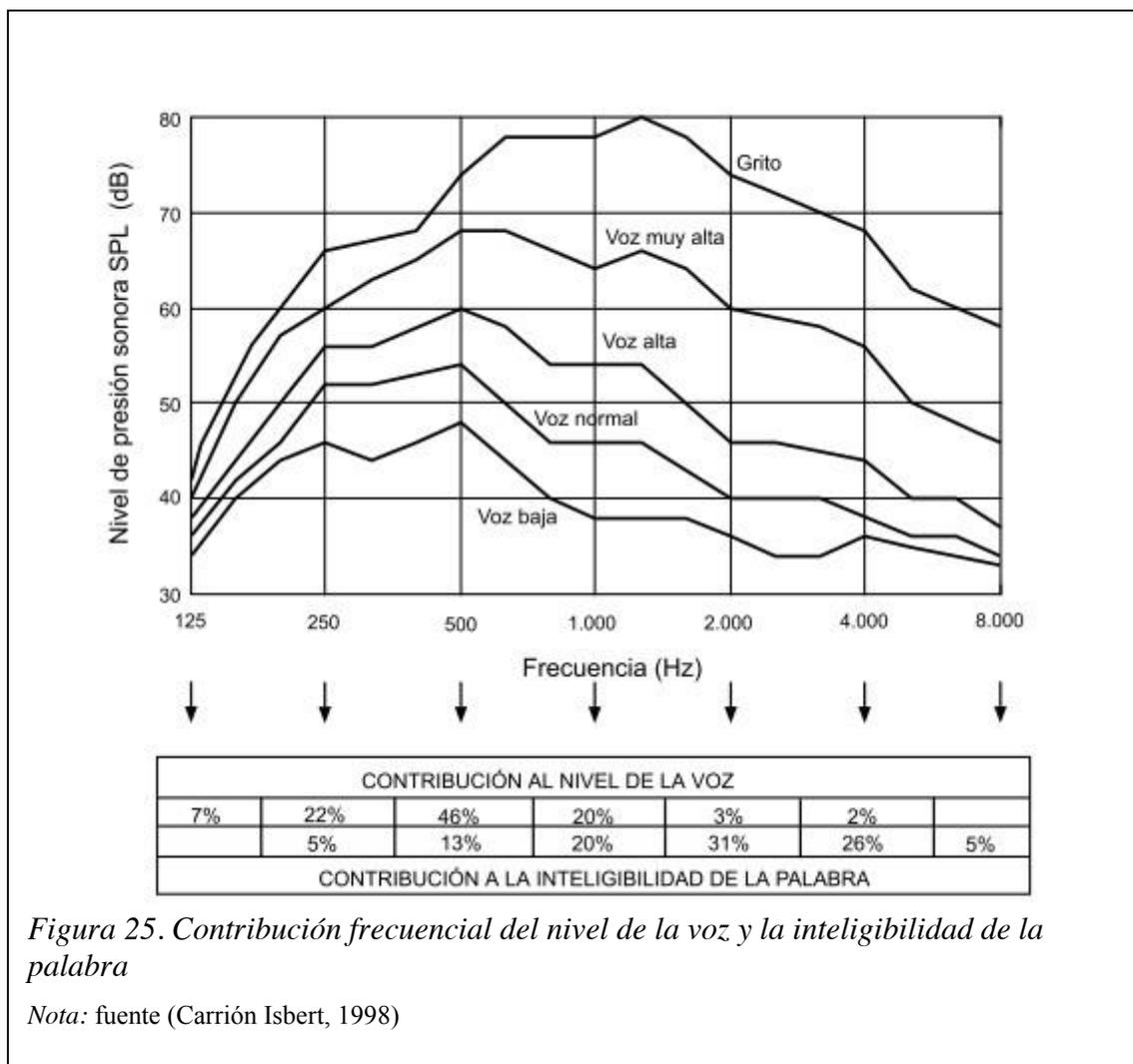


Figura 25. Contribución frecuencial del nivel de la voz y la inteligibilidad de la palabra

Nota: fuente (Carrión Isbert, 1998)

La voz humana tiene una directividad debido al sistema de fonación y la forma de la cabeza, teniendo menor percepción del mensaje oral detrás del locutor, siendo las bandas de 2000 y 4000 Hz donde se tienen mayores pérdidas del mensaje cuando el receptor se ubica detrás del locutor,

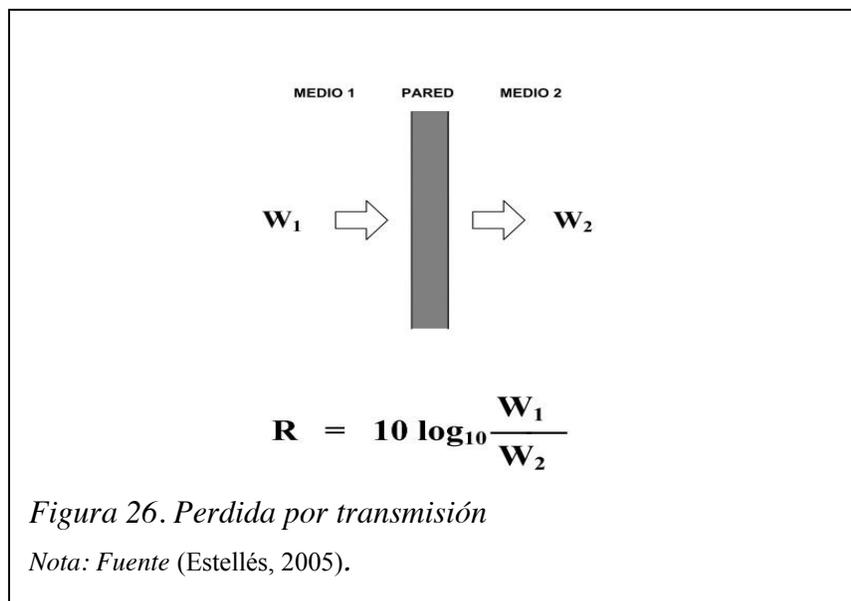
por ser la voz más directiva a medida que la frecuencia considerada es mayor (Carrión Isbert, 1998). De tal manera, es importante no solo valorar las NC para frecuencias medias, sino tener NC para frecuencias altas entre 2000 y 4000 Hz.

### **3.8.2 La propagación del sonido.**

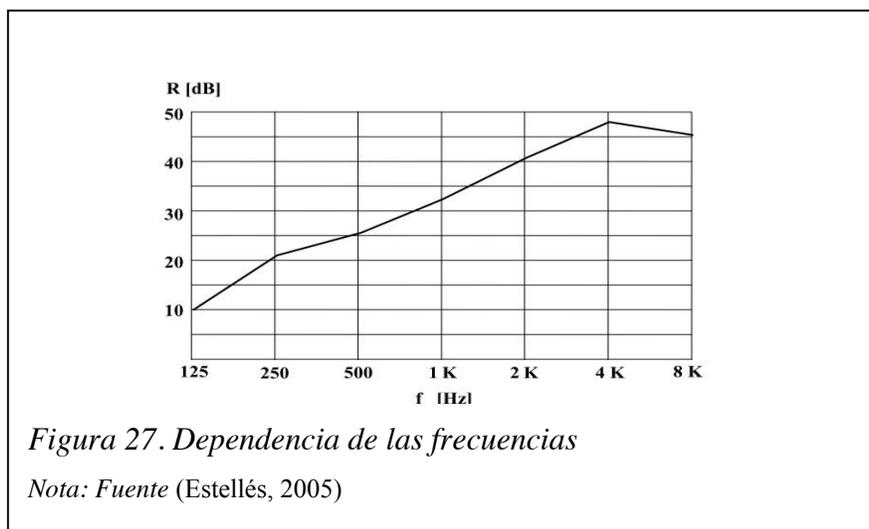
Esta investigación es sobre recintos cerrados afectados por la propagación del sonido en espacio libre cuando choca con su arquitectura. La propagación del sonido en el espacio libre es un sonido omnidireccional, que viene directamente desde la fuente y cada vez que se duplica la distancia a la misma se reduce su presión sonora en 6 dBA. El sonido en recintos está compuesto por el sonido directo de la fuente y el sonido reflejado. La energía del sonido directo depende de la distancia que se tiene con la fuente sonora; el sonido reflejado depende del recorrido de la onda y de cuanta energía pierde por la absorción que le pueda brindar el material donde se refleja. Al conocer cómo se propaga el sonido dentro de los recintos es importante entonces saber que la geometría de los espacios es vital en el diseño de las aulas para no generar, al interior, sonidos no deseados. Por ello es relevante conocer los modos propios de los recintos.

### **3.8.3 Pérdida por transmisión (TL) o reducción sonora (R),**

Es la expresión logarítmica del cociente entre la potencia sonora, que incide sobre un material y es transmitida hacia el otro lado (Estellés, 2005). Es una propiedad del material con respecto a la incidencia de la onda sonora, es también la medida de la reducción sonora entre dos espacios que dependen de los materiales que los dividen; se deben contemplar todas las uniones entre los espacios y verificar los grados de absorción y reflexión de los mismos. Las ventanas y vanos son los elementos arquitectónicos de mayor absorción sonora.



El índice de reducción sonora R, o pérdida por transmisión, está asociado a las bandas de frecuencia.



Las particiones están compuestas por varios elementos, como por ejemplo, puertas, ventanas, muros, aislantes etc. Es necesario en estos casos encontrar el índice de reducción equivalente:  $R_{eq}$  o TL combinado, que con el área total del cerramiento produzca una disminución acústica igual a la que tendrán en forma combinada de los materiales utilizados.

El Req o TL combinado se determina conociendo los Ri o TL de los elementos componentes, así como el área S1 de los mismos. El Req se puede determinar en forma analítica según la ecuación siguiente (Estellés, 2005):

$$Req = 10 \log_{10} \frac{S_{total}}{S_1 10^{R_1/10} + \dots + S_n 10^{R_n/10}} \quad ((4))$$

Ecuación (4), en dónde:

**S1:** Área del elemento 1

**Sn:** Área del elemento n

**Stotal:** Área total de la partición

**R1:** Pérdida de transmisión del elemento 1

**Rn:** Pérdida de transmisión del elemento n

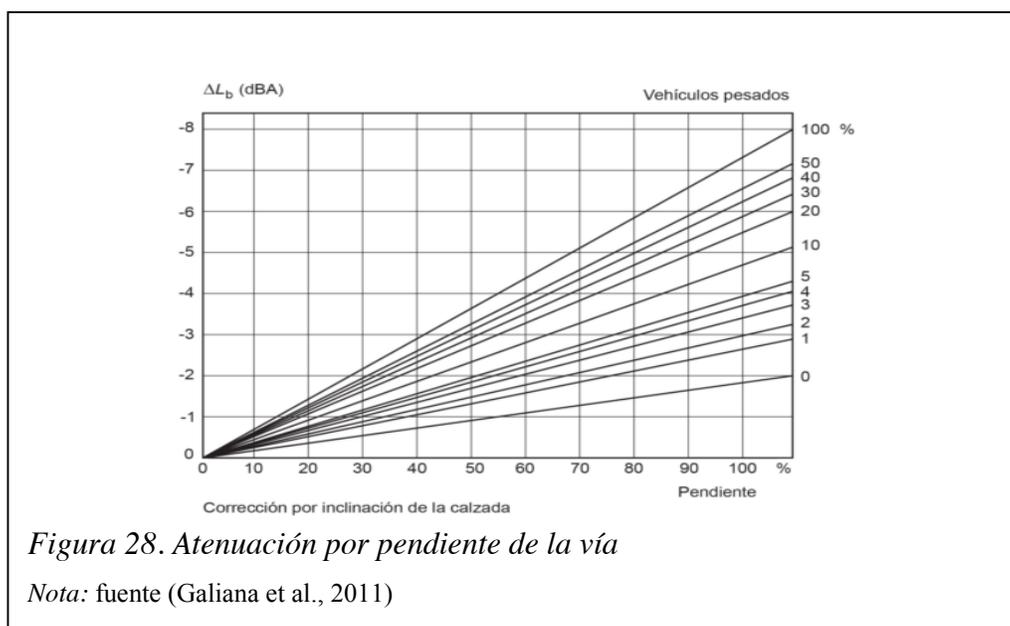
Con lo expuesto anteriormente, se infiere que la condición más débil de un aislamiento es la que afecta el resultado final del TL o Req, por lo tanto, los vanos o ventanas en la envolvente por donde las aulas se ventilan, son los puntos más críticos y determinan al interior del aula el grado de pérdida por transmisión. Los aislamientos dependen del grado de absorción, elasticidad y de la masa de los mismos, por ello para su estudio se emplea la ley de masas.

En conclusión, para las aulas de básica primaria, los ruidos de fondo se deben establecer entre 45 y 50 dB. Es de vital importancia el control de los ruidos de bajas y medias frecuencias que perturban, especialmente, a los niños de los rangos de edades aquí estudiados, puesto que en las frecuencias mencionadas, es donde se da el mayor porcentaje de la inteligibilidad de la palabra; así, los niños perciben más claramente los sonidos agudos y captan el mensaje con claridad, con un ruido de fondo de 45xdBA a una distancia de 5,4m. La NTC, sugiere distancias máximas a la fuente sonora de 8m (García C, 2017). Otra conclusión es que los salones deben tener proporciones rectangulares, ya que la propagación del sonido partiendo del emisor (profesor) es unidireccional, que aborda un ángulo de 140 grados cuyo vértice está situado en el orador; adicionalmente, se puede concluir que la geometría óptima de un aula, implica que no tenga sus paredes paralelas y, en caso de tenerlas, deben estar dotadas de materiales absorbentes para evitar los modos propios (Carrión Isbert, 1998). Por otro lado, queda claro que los ruidos de tráfico y ruidos de fondo tienen

un espectro amplio en frecuencias donde son predominantes en bandas de bajas y medias frecuencias.

### 3.8.4 Mitigación del sonido por el entorno.

Es importante saber que las características urbanas y geográficas ayudan a mitigar los ruidos urbano: el suelo blando, la topografía quebrada de la ciudad y, en cierta medida, los árboles, que por medio de sus hojas, logran con ciertas disposiciones densas y altas, bajar hasta 3 dBA (Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, 2018). Otro aspecto importante a tener en cuenta, son las pendientes de las vías y lo sinuosas o no que estas sean, ya que a mayor pendiente y mayor sinuosidad pueden generar mayor ruido (ver la siguiente gráfica) (Breithaupt, 2000; García Boscá & Mora, 2010; International Organization for Standardization - ISO, 1996).



Existen modelos empíricos de cálculo de pérdida de energía por ruido urbano. Se podría cuantificar del siguiente modo:

$$L_{eq} = L_{1eq10} + \Delta L_d + \Delta L_{\theta} + \Delta L_{tp} + \Delta L_{2p} + \Delta L_{\beta}, \text{ donde las equivalencias son:}$$

**L<sub>1eq10</sub>**: atenuación a 10 m de distancia de la vía y tiene en cuenta la velocidad, la cantidad y tipología

$\Delta L_d$ : atenuación del ruido por la distancia

$\Delta L_\Theta$ : corrección por el ángulo de vista de la vía. Es la relación visual entre fuente y receptor

$\Delta L_{tp}$ : atenuación por el terreno, por obstáculos como pantallas, entre el receptor y la fuente.

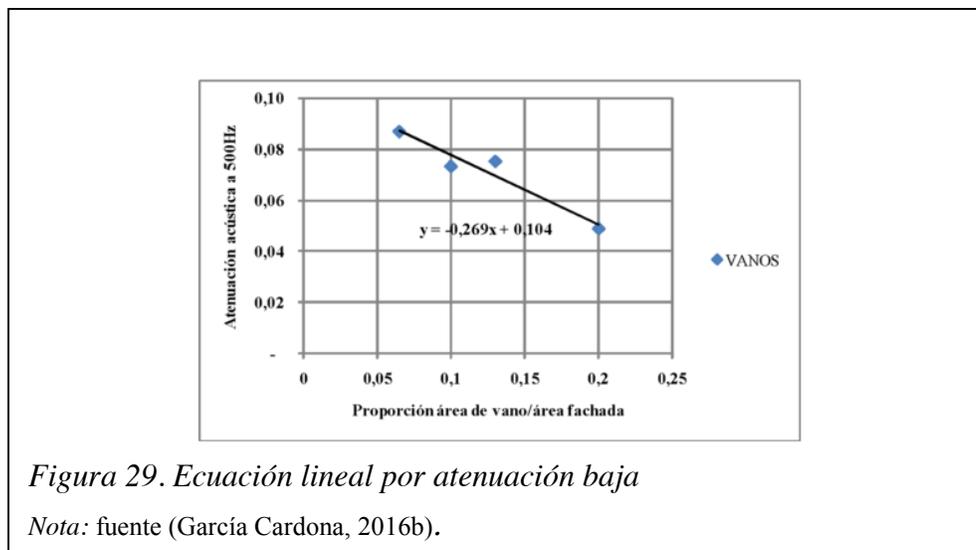
La atenuación empieza a ser efectiva después de los 100 m, y para pantallas a partir de los 30 m.

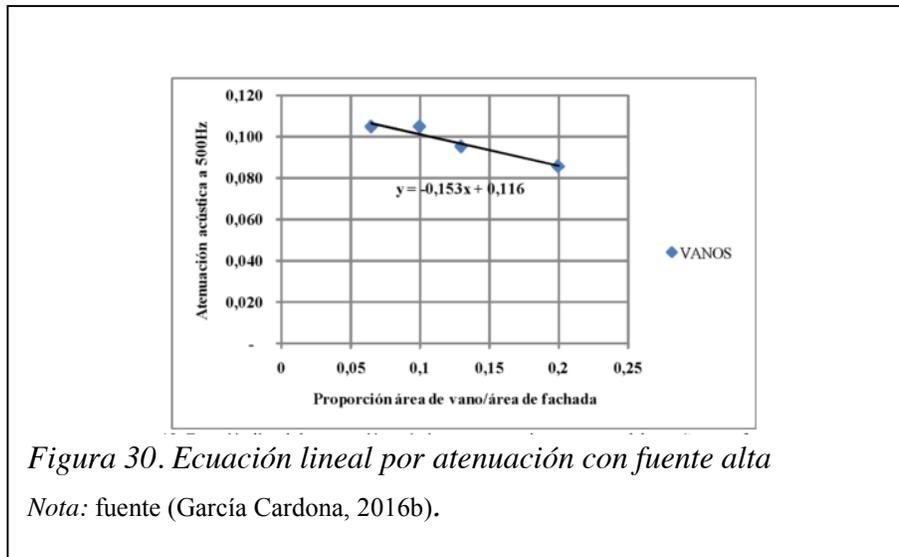
$\Delta L_{2p}$ : atenuación por doble pantalla, que se utilizan en vías de alto tráfico

$\Delta L_\beta$  : atenuación por la inclinación de la vía, que se calcula a partir de las pendientes más cercanas al lote de estudio (Galiana, Sancho Vendrell, & Llopis Reyna, 2011; Garcia C, 2017)

### 3.8.5 Mitigación del sonido por posición de la fuente.

Una investigación en el grupo Emat (Grupo de Investigación Energía, Medio Ambiente, Arquitectura y Tecnología) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, arrojó que, según la posición de la fuente con respecto a la posición y el área del vano, se da cierto nivel de atenuación, que se puede calcular mediante una ecuación lineal que ayuda a proyectar esta disminución del ruido, según la posición de la fuente, como se ve en las figuras 29 y 30:





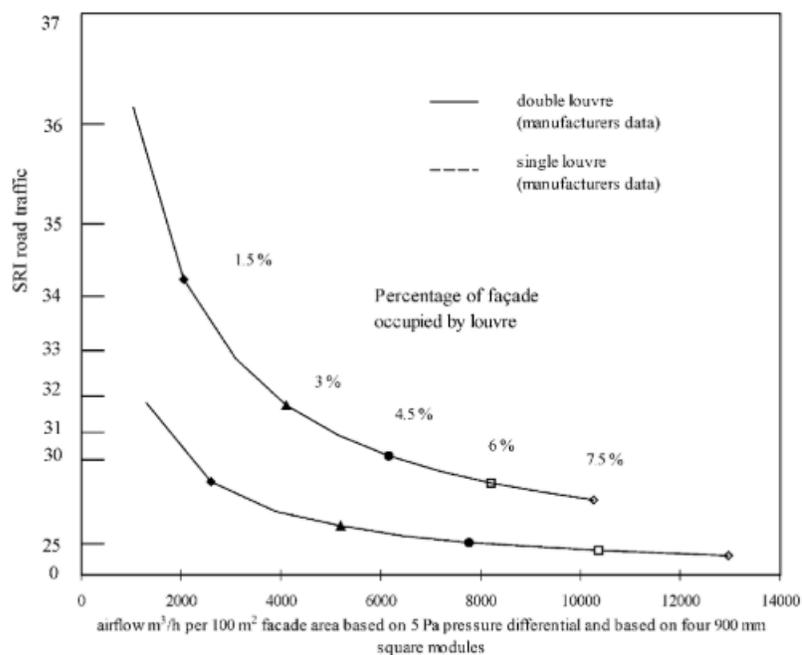
La posición de las fuentes en sitios altos genera mayor atenuación que la posición en sitios bajos. en las fuentes con posición bajas a medida que se modifica el vano hay mayor afectación dentro del espacio (García Cardona, 2016b)

### 3.9 Análisis simultaneo de acústica y ventilación

Existen varias investigaciones que tratan los temas de una adecuada ventilación, del cumplimiento de las normativas higiénicas de renovación de aire y del alto nivel de atenuación del ruido de fondo, reduciendo principalmente los sonidos del tráfico automotriz, donde los espectros de los sonidos son muy amplios, destacándose los de bajas frecuencias. También se habla el tema de las estrategias a nivel constructivo y de sonido electroacústico (Mínguez, Recuero, Sancho, & Pascual, 1999).

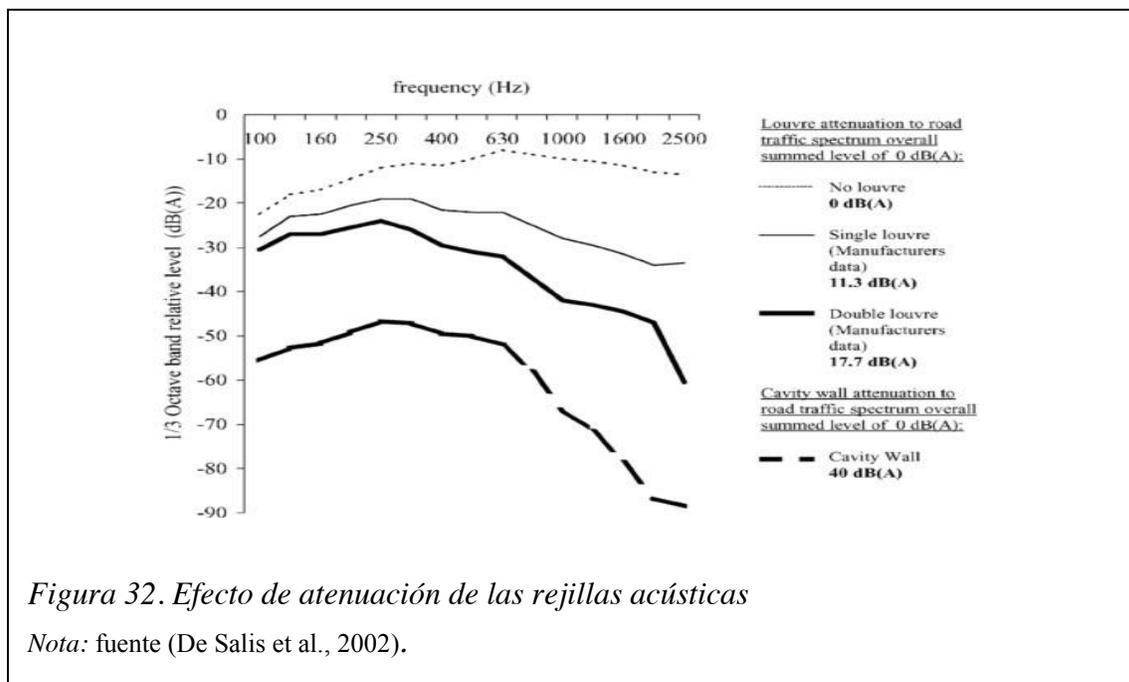
Algunos de los experimentos y pruebas en recintos construidos con rejillas acústicas (con marcos compuestos por resonadores Helmholtz), muestran que este material no es muy eficiente para aislar las bajas frecuencias, debido a la difracción alrededor de las cuchillas, sin embargo, resultan muy efectivas en altas frecuencias. En cuanto a la ventilación, para que esta sea eficiente y cumpla con la renovación de aire necesario para los alumnos, las aulas necesitan mucha área de fachada, lo que produce decaimiento del SRI (Índice de Reducción Sonora) (De Salis, Oldham, & Sharples, 2002). El SRI, es regido por el medio que peor desempeño tenga; una manera de mejorar la atenuación de las rejillas acústicas a bajas frecuencias es colocarlas dobles con una cavidad,

cuyas paredes esten hechas de resonadores; esto mejora notablemente la atenuación del sonido en bajas frecuencias, pero reduce dramáticamente el flujo de aire; para ello se introducen, en lugar de la carpintería de la ventana, aireadores que cumplen con la renovaciones solicitadas según las normas de cada país (De Rozas, Escudero, Fuente & De Lorenzo, 2013; Díaz Chyla, 2015; Tang, 2017).



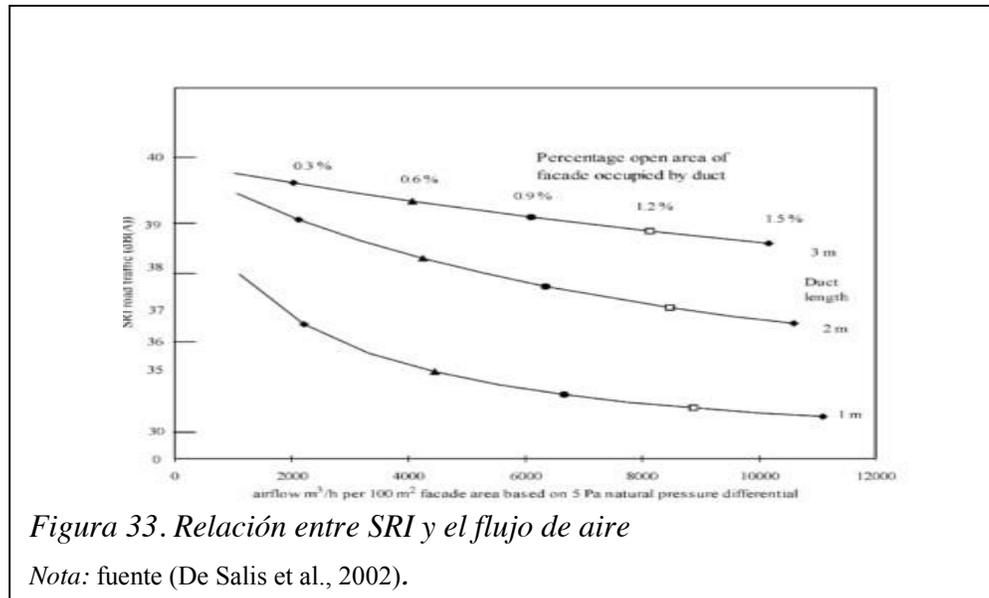
*Figura 31. Relación entre SRI y el flujo de tráfico*

*Nota:* fuente (De Salis et al., 2002).



Otros sistemas de atenuación del sonido, incorporando ventilación, son los tratamientos con ductería, que a diferencia de las rejillas que tienen una abertura poco profunda, son ductos muy largos y con curvas, que a mayor longitud tienen más atenuación del sonido, pero inversamente aumenta la resistencia al flujo de aire (Mínguez et al., 1999). Estos tubos pueden estar revestidos para crear mayor reducción del sonido, con materiales absorbentes, y creando al interior del ducto un material poroso con resonadores que mejoran el SRI en las bandas medias y altas (Murua, 2005). Para mejorar la reducción sonora en bajas frecuencias, se pueden incorporar curvas, que traen una reducción del flujo del aire donde se puede incrementar, añadiéndole al sistema paletas giratorias, que no podrían ser más cortas que  $1/8$  de la longitud de la onda, ya que no es inviable la reducción de las reflexiones (Magnusson, Pàmies, Romeu, & Arcos, 2014).

Una variación de estos es: cámara de plenum de ducto, que aporta buena ventilación, pero necesita ser muy grande en su sección transversal; logra la reducción de sonido gracias a la falta de coincidencias en las impedancias de la entrada y salida, donde se colocan materiales absorbentes. Esto es práctico en edificios con grandes áreas, como teatros, auditorios y centros convenciones (De Salis et al., 2002).



Otro método de reducción del ruido, es por medio de la cancelación de ruido activo, ya que el sonido se transmite en forma de ondas. Diferentes sonidos provocan diferentes ondas sonoras que se suman entre ellas para dar una sola (que es lo que el oído percibe). Cuando se tienen ondas sonoras de la misma frecuencia en un mismo espacio, se habla de interferencia. Estas interferencias pueden ser constructivas o destructivas, dependiendo de si la resultante tiene una amplitud mayor o menor a la onda de interés (Minguez, 1998). Estas características de las ondas son las que se usan para hacer la cancelación activa del ruido. Para la construcción de estos sistemas es necesario identificar las bandas de frecuencia que se necesitan cancelar, y la elaboración de sistemas electroacústicos y electromecánicos, los cuales cancelan el ruido primario no deseado, basándose en los principios de superposición, es decir, un antiruido de igual amplitud y fase contraria, combinado con un ruido primario que al combinarse se anulan (Arámburo, 2007). Esta técnica funciona muy bien para sonidos de bajas frecuencias, pero tiene como inconveniente en el uso de energía para poder emitir la señal que anula el ruido; adicionalmente, debe contemplar algoritmos suficientes para poder acomodarse al cambio frecuente de la amplitud de las ondas que pudiera anular.

Este sistema se combina con los ductos envueltos en materiales porosos y absorbentes, y pudiera ayudar a cubrir una gama más amplia de reducción en las bandas de octava, incrementando el flujo de aire, disponiendo ventiladores al interior para mejorar su impulso y anulando el ruido de estos con un sistema de cancelación activa del ruido (ANC - Active Noise Cancelation).

### 4 Metodología

La metodología usada para esta investigación está regida por dos variables cuantitativas dependientes (área ventilada y atenuación sonora) y dos variables cualitativas independientes (proporción del vano y forma del aula). La figura 34, muestra el esquema de la metodología de esta investigación.

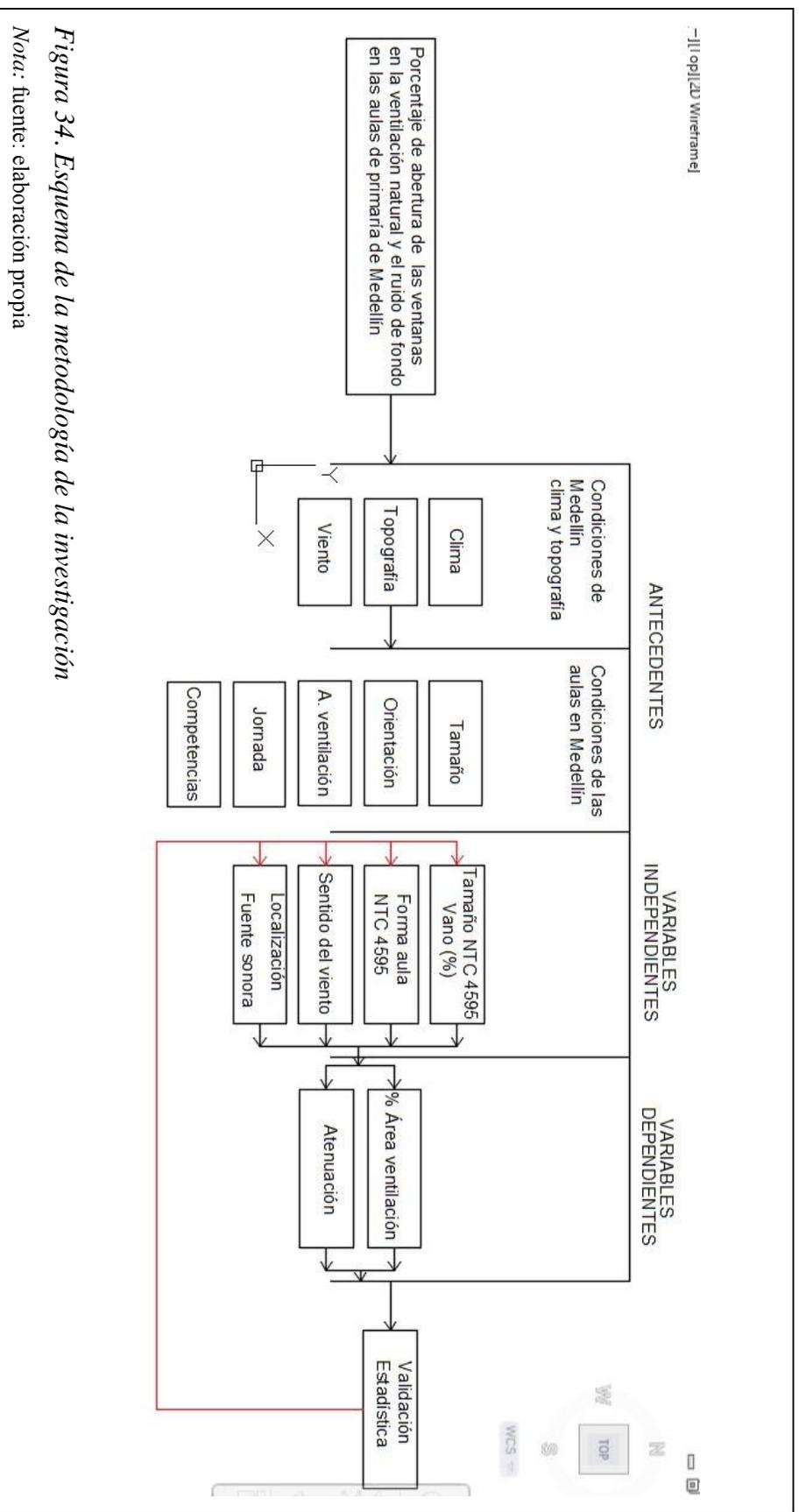


Figura 34. Esquema de la metodología de la investigación

Nota: fuente: elaboración propia

#### 4.1 Características de las aulas estudiadas

Para recaudar y analizar los datos de área o porcentaje de área ventilada y los datos de pérdida por transmisión, se proponen tres tipos de aulas de  $66 \text{ m}^2$ , que tienen una capacidad de 40 estudiantes a razón de  $1,65 \text{ m}^2$  por estudiante según la NTC 4595. Los tipos de aulas son: 1) cuadrada, 2) rectangular con vanos en lado ancho y 3) rectangular con vanos en su lado corto.

Con relación a las aberturas para ventilación natural, la norma NTC 4595 de 2006 establece que para clima cálido-húmedo, debe ser de mínimo  $1/6$  del área en planta del aula, que corresponde a  $5,5 \text{ m}^2$  de entrada y  $5,5 \text{ m}^2$  de salida para cumplir con la ventilación cruzada. Se evalúa un aula cuadrada de  $8,12 \times 8,12 \text{ m}$ , y un aula rectangular de  $10,0 \times 6,6 \text{ m}$ , esta última tiene dos variaciones con ventanas en su sección ancha y en su sección profunda, cumpliendo con los numerales 4.2.1.1, 7.3.5 y 7.3.6 de la NTC 4595 de 2006. Las formas escogidas obedecen a razones de racionalidad constructiva y económica. Adicionalmente se hace comprobación de la ecuación lineal resultante, al usar aberturas con  $1/6$  del área en planta, con la norma NTC 4595 2015 que reduce el área efectiva de los vanos a la mitad, es decir, a  $1/12$  de área en planta del aula.

Las aulas evaluadas se ubican en el primer piso en centro del volumen, son 3 en este caso, para evitar el efecto que pueden causar las presiones negativas en los extremos, pues si no se aleja el aula de los extremos, las presiones negativas afectarían la distribución de aire dentro, aumentando la succión y el comportamiento interno del aire.

Las aulas evaluadas se ubican en el primer piso de un modelo de 2 niveles, pues el Ministerio de Educación, como se explicó en el marco teórico, dice que los estudiantes de primaria deben ubicarse en plantas bajas. Se puso el aula evaluada en el centro del volumen; son 3 aulas las que conforman el modelo en este caso (ver figuras 35 y 36), para evitar el efecto que puedan causar las presiones negativas en los extremos, pues si no se aleja el aula de dichos extremos, las presiones negativas afectarían la distribución del aire una vez dentro, aumentando la succión y el comportamiento interno del mismo.

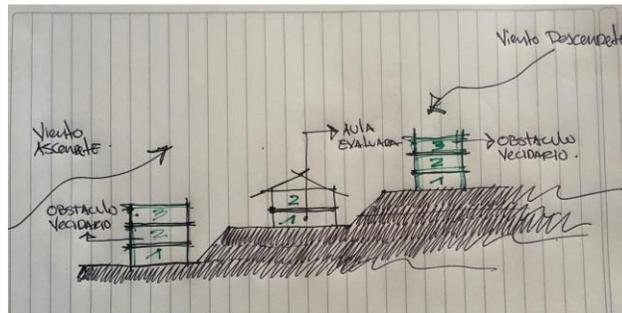


Figura 35. Sección transversal. Ubicación del modelo a evaluar

Nota: elaboración propia

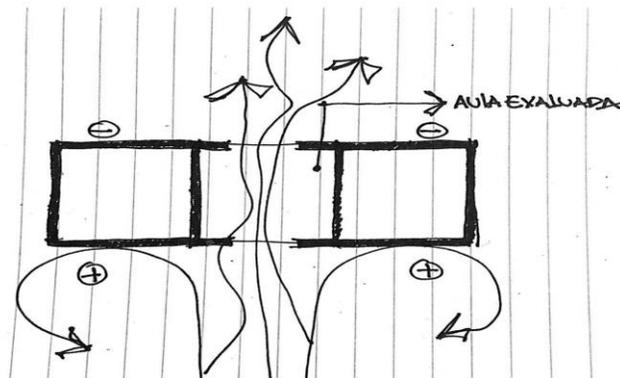
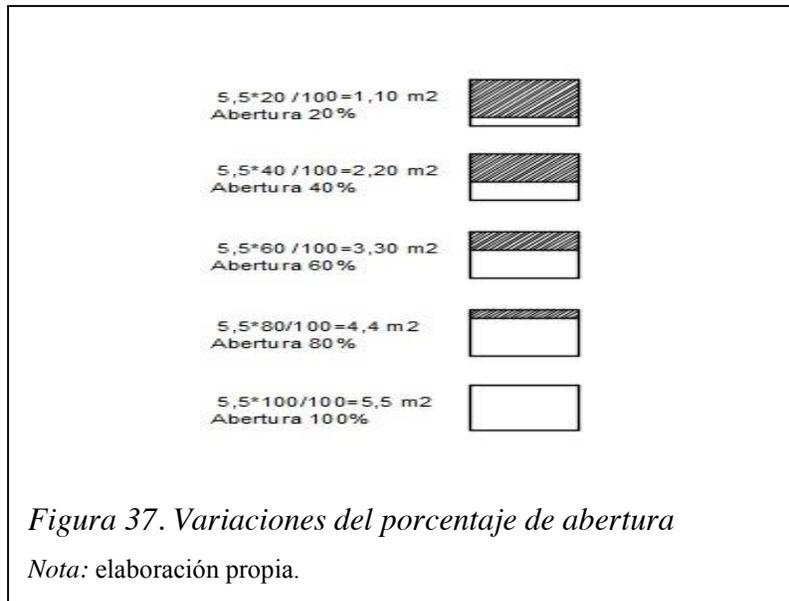


Figura 36. Comportamiento presiones positivas y negativas sobre las aulas

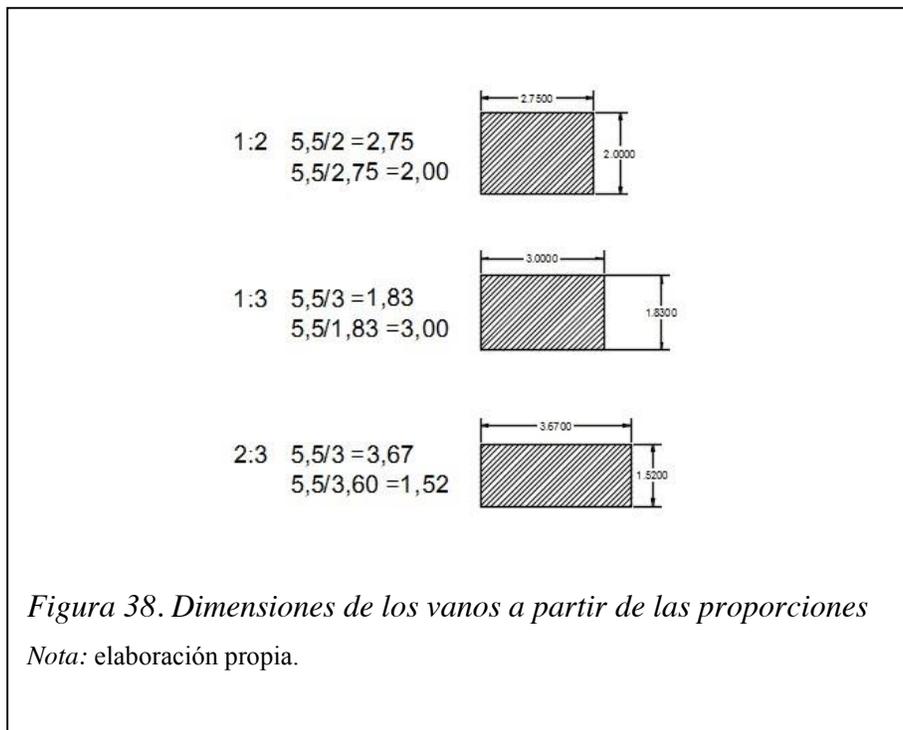
Nota: elaboración propia.

#### 4.1.1 Variaciones en el área y forma de las aberturas.

Se crean 5 variaciones en el porcentaje de abertura del vano, así: 20%, 40% 60%,80% y 100%, siendo 100% el vano base de la norma (5,5 m<sup>2</sup>), todas con forma horizontal, como lo muestra la figura 37.



Se evaluaron 15 ventanas con varianza en su porcentaje de abertura y proporción, ver figura 38 y se nombraron como lo indican las figuras 39 y 40.



Cant	Color según % de apertura	Nombre vano	Altura sillar	Altura intel	Dimensiones	Área de apertura	Figura
1		1:2.20%	0,67ms	2,67	2,75*0,40	1,10M2	
2		1:2.40%	0,67ms	2,67	2,75*0,80	2,20M2	
3		1:2.60%	0,67ms	2,67	2,75*1,20	3,30M2	
4		1:2.80%	0,67ms	2,67	2,75*1,60	4,40M2	
5		1:3.00%	0,67ms	2,67	2,75*2,00	5,50M2	

Cant	Color según % de apertura	Nombre vano	Altura sillar	Altura intel	Dimensiones	Área de apertura	Figura
6		1:3.20%	0,67ms	2,50	3,00*0,367	1,10M2	
7		1:3.40%	0,67ms	2,50	3,00*0,733	2,20M2	
8		1:3.60%	0,67ms	2,50	3,00*1,10	3,30M2	
9		1:3.80%	0,67ms	2,50	3,00*1,46	4,40M2	
10		1:3.00%	0,67ms	2,50	3,00*1,83	5,50M2	

Cant	Color según % de apertura	Nombre vano	Altura sillar	Altura intel	Dimensiones	Área de apertura	Figura
11		2:3.20%	0,67ms	2,50	3,00*0,367	1,10M2	
12		2:3.40%	0,67ms	2,50	3,00*0,733	2,20M2	
13		2:3.60%	0,67ms	2,50	3,00*1,10	3,30M2	
14		2:3.80%	0,67ms	2,50	3,00*1,46	4,40M2	
15		2:3.00%	0,67ms	2,50	3,00*1,83	5,50M2	

Figura 39. Muestra las características de los vanos evaluados

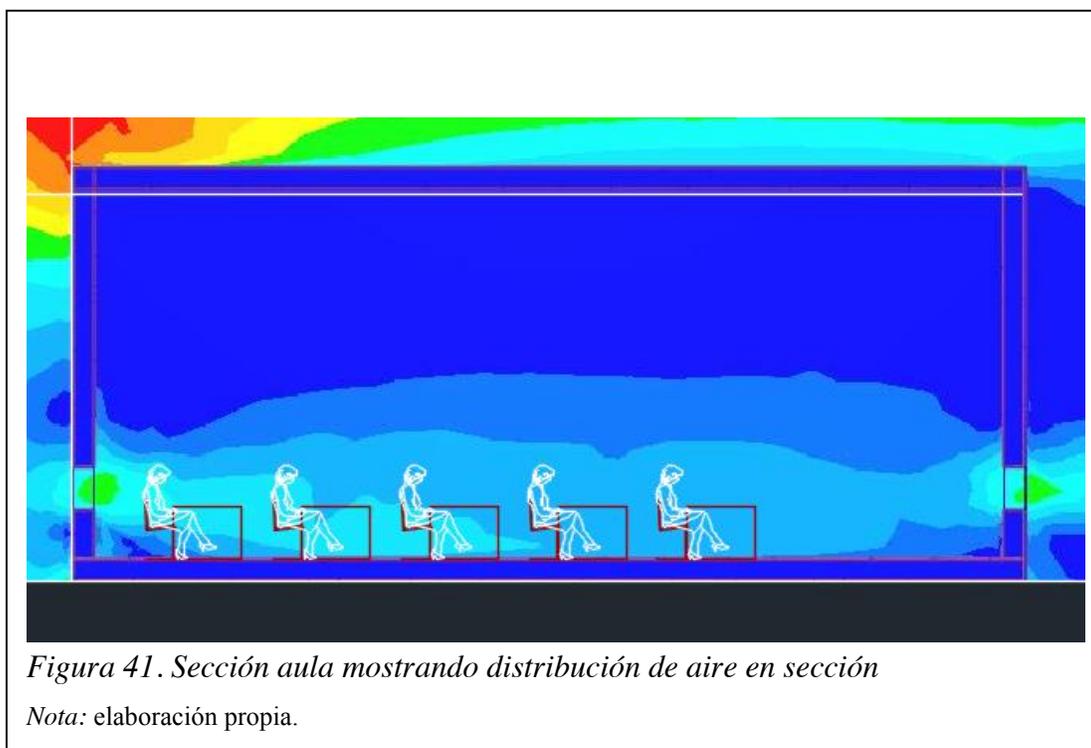
Nota: elaboración propia.

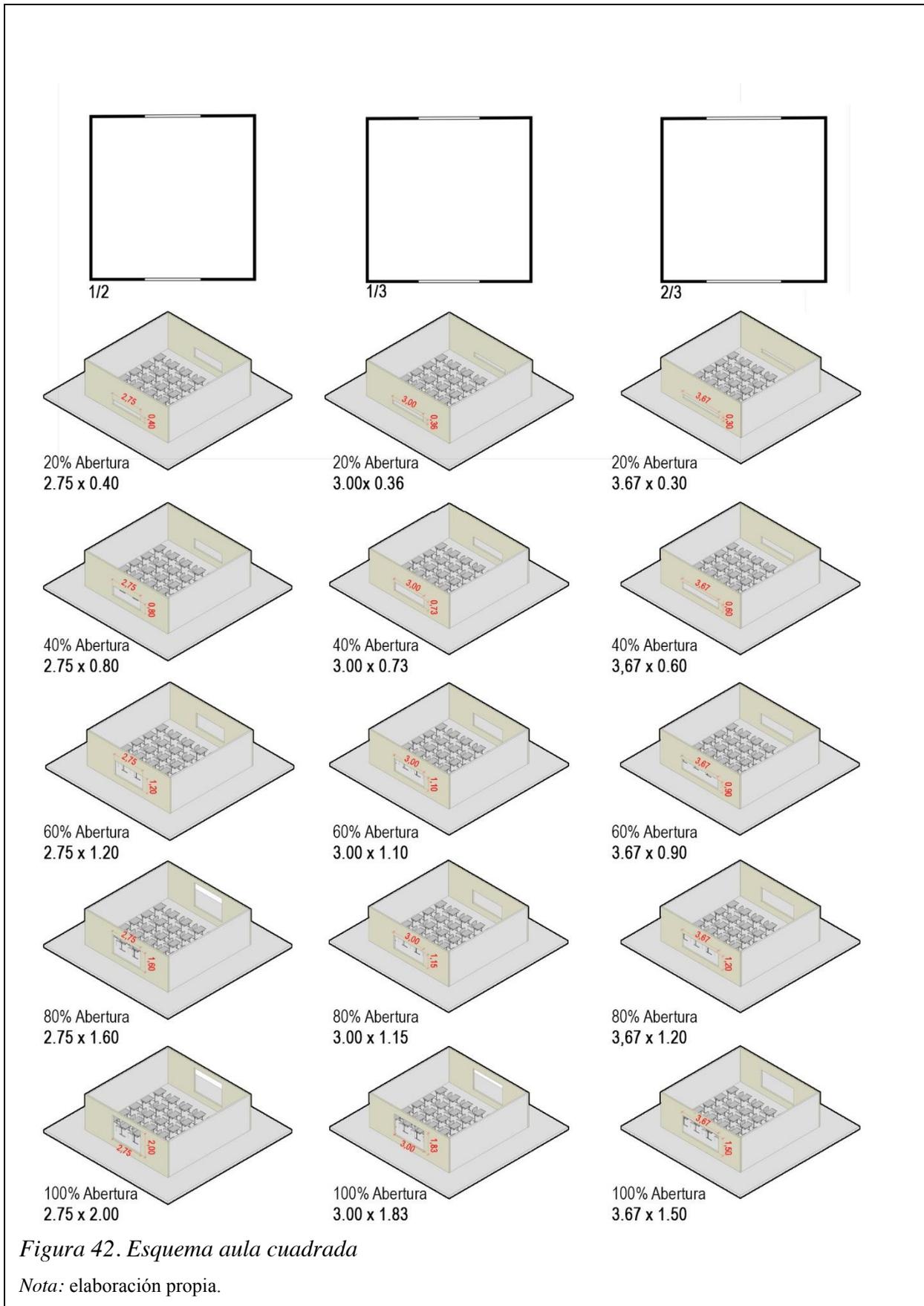
MEDIDA/VANO/2	20% ABERTURA	ÁREA/VANO	40% ABERTURA	ÁREA/VANO	60% ABERTURA	ÁREA/VANO	80% ABERTURA	ÁREA/VANO	100% ABERTURA	ÁREA/VANO
(2,75*2,00)	(2,75*0,40)	1,1M <sup>2</sup>	(2,75*0,80)	2,2M <sup>2</sup>	(2,75*1,2)	3,3M <sup>2</sup>	(2,75*1,6)	4,4M <sup>2</sup>	(2,75*2,0)	5,5M <sup>2</sup>
MEDIDA/VANO/3	20% ABERTURA	ÁREA/VANO	40% ABERTURA	ÁREA/VANO	60% ABERTURA	ÁREA/VANO	80% ABERTURA	ÁREA/VANO	100% ABERTURA	ÁREA/VANO
(3,00*1,83)	(3,00*0,36)	1,1M <sup>2</sup>	(3,00*0,73)	2,2M <sup>2</sup>	(3,00*1,1)	3,3M <sup>2</sup>	(3,00*1,5)	4,4M <sup>2</sup>	(3,00*1,83)	5,5M <sup>2</sup>
MEDIDA/VANO/3	20% ABERTURA	ÁREA/VANO	40% ABERTURA	ÁREA/VANO	60% ABERTURA	ÁREA/VANO	80% ABERTURA	ÁREA/VANO	100% ABERTURA	ÁREA/VANO
(3,67*1,50)	(3,67*0,30)	1,1M <sup>2</sup>	(3,67*0,60)	2,2M <sup>2</sup>	(3,67*0,90)	3,3M <sup>2</sup>	(3,67*1,2)	4,4M <sup>2</sup>	(3,67*1,50)	5,5M <sup>2</sup>

*Figura 40. Resumen de áreas y vanos evaluados*

*Nota: elaboración propia.*

El sillar del vano se ubica en el promedio de las medianas de las alturas antropométricas de los niños entre edades de 6 a 8 años, este dato es extraído de estadísticas de las medidas de población Latinoamericana (percentil 50), dando un promedio de 0,67 cm de altura a un niño sentado, desde el codo hasta el piso (Jung, 2005; Roselia, León, Luz, & Muñoz, 2007). Este es el nivel donde se hacen las vistas laterales de las simulaciones





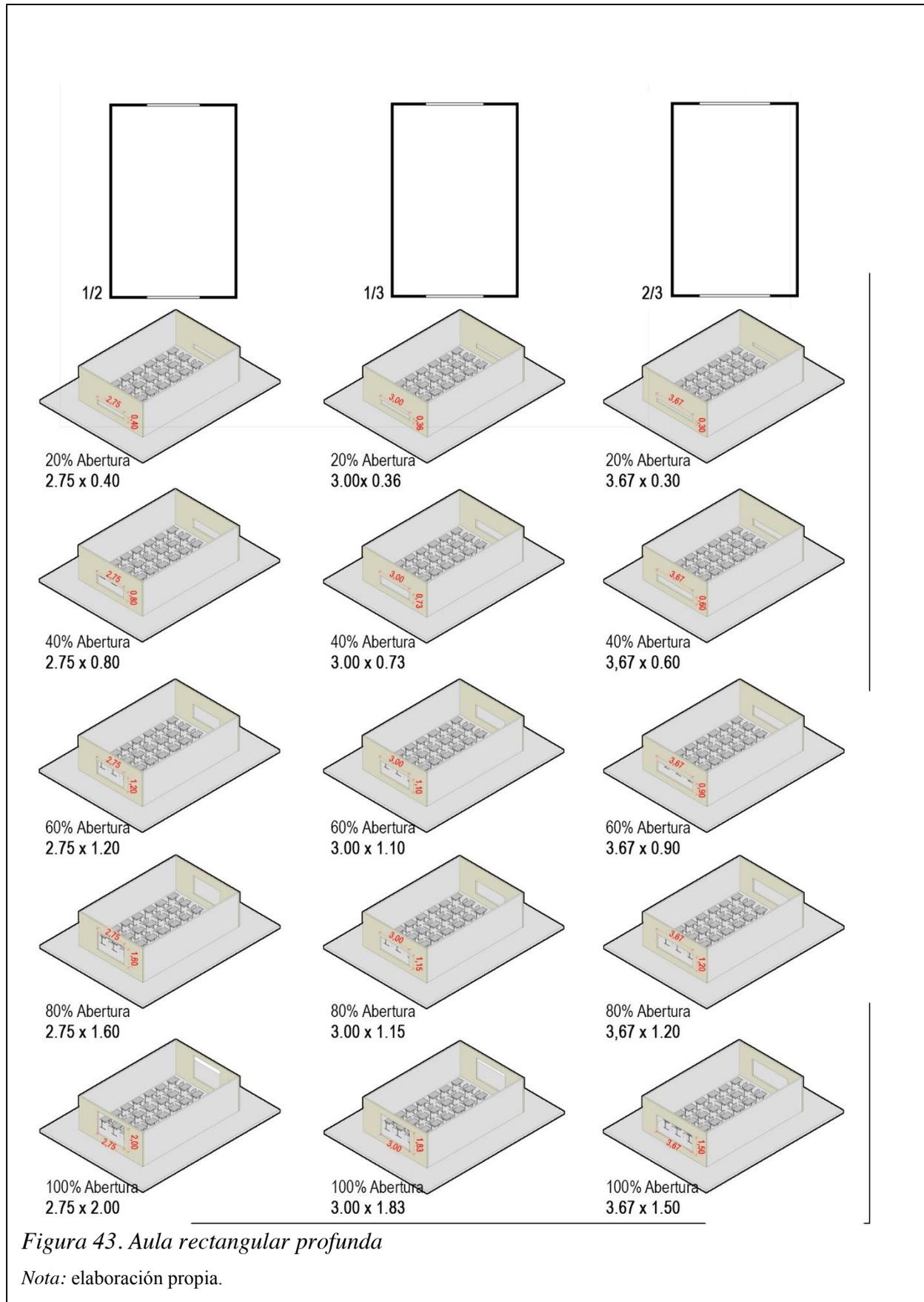


Figura 43. Aula rectangular profunda

Nota: elaboración propia.

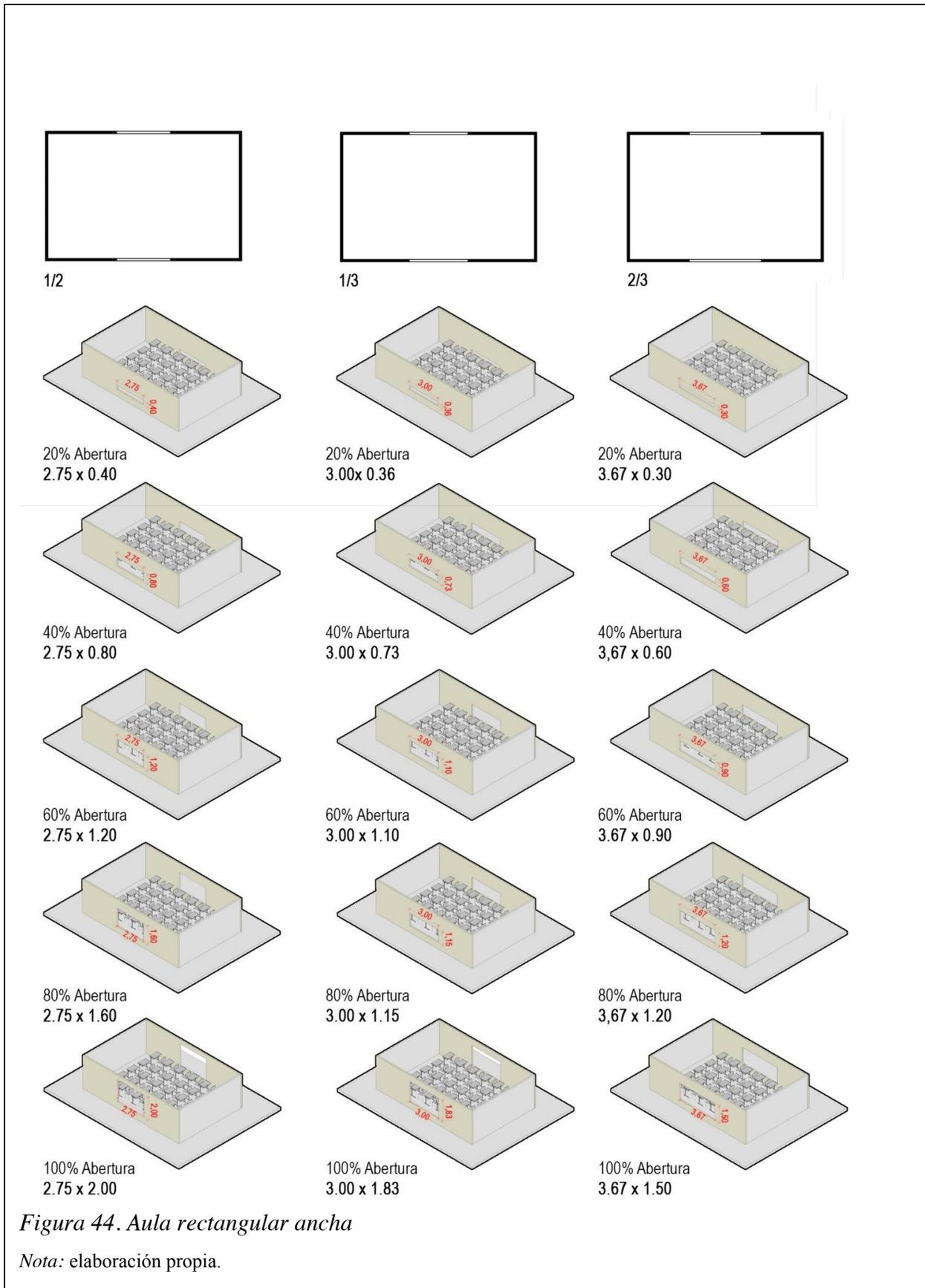


Figura 44. Aula rectangular ancha

Nota: elaboración propia.

#### 4.2 Definición de los parámetros de ventilación

Para los cálculos de área ventilada fue utilizado el programa de simulación CFD de *Autodesk*; los datos de entrada de las velocidades ascendente y descendente, son tomados de la estación meteorológica a 1800 msnm, con velocidades de 4 m/s en flujo ascendente y 2,8 m/s en flujo descendente. Fueron aplicadas correcciones a las velocidades considerando el ángulo de incidencia del viento, la localización, la rugosidad del entorno, y la localización de la ventana.

Para calcular las correcciones de la velocidad del viento, fue utilizada la fórmula empírica presentada en la ecuación 1, basada en el método del *Florida Solar Energy I*, donde se asume la entrada de aire igual a la salida y se desprecia el efecto de la temperatura. Se calcula con la siguiente expresión:

$$TOA = \frac{1,16 \cdot 10^3 \cdot V_{ach}}{W \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4} \quad (3)$$

Donde  $F_1$  corresponde al factor de corrección del ángulo de incidencia del viento, que en este caso es perpendicular a la fachada, es decir, su ángulo de incidencia es igual a 0, y su factor se toma de la figura 45:

ANGULO DE INCIDENCIA DEL VIENTO	F1
0-40	0,35
50	0,3
60	0,25
70	0,2
80	0,14
90	0,08

Figura 45. Corrección por ángulo de incidencia del viento  $f_1$

Nota: fuente, adaptación de (Yarke, 2005).

$F_2$  corresponde al terreno en función de la localización del edificio, que en este caso de estudio ubicado en las laderas, se considera como suburbano dando un factor que se muestra en la figura 46:

TIPO DE TERRENO	VENTILACIÓN 24 HORAS
Costa Cercana del Océano	1,3
Aeropuerto Terrenos planos con edificios separados por muros aislados rural	1,00
Suburbano Industrial	0,67
centro de una gran ciudad	0,47

Figura 46. Factor por corrección de terreno  $f_2$

Nota: fuente, adaptación de (Yarke, 2005).

$F_3$  Es el factor de corrección asociado al vecindario, y está en función de la altura (h) del edificio que obstaculiza la llegada del aire al objeto de estudio y la distancia entre ellos (g), para este caso  $h = a$ , 3 pisos como fue explicado en el marco teórico.

RELACIÓN g/h	F3
0	0,00
1	0,41
2	0,63
3	0,77
4	0,85
5	0,93
6	1,00

Figura 47. Factor de corrección por vecindario

Nota: fuente, adaptación de (Yarke, 2005).

$F_4$  es el factor de corrección. Debido a la altura de la ventana para el segundo piso, el factor es igual a 1,15 y en el primer piso el factor es igual a 1. En este caso, los salones de básica primaria se ubican en los primeros pisos.

Método I DEL FLORIDA SOLAR ENERGY CENTER	
TOA=1,16*[(10)]^(-3 )*V*ach/W*F1*F2*F3*F4	
VOLUMEN	198,0 C
	198,0 P
W	2,8
F1	0,35 ANGULO INCIDENCIA VIENTO
F2	0,67 SUBURBANO
F3	0,77 POR VECIDARIO
F4	1 UBICACIÓN DE LA VENTANA
ACH	15,8 NÚMERO DE RENOVACIONES
CORRECIÓN DE VELOCIDAD W*F1*F2*F3*F4	
7,18 AREA DE ABERTURA AC	CORRECIÓN DE LA VELOCIDAD
7,18 AREA DE ABERTURA AP	0,505582

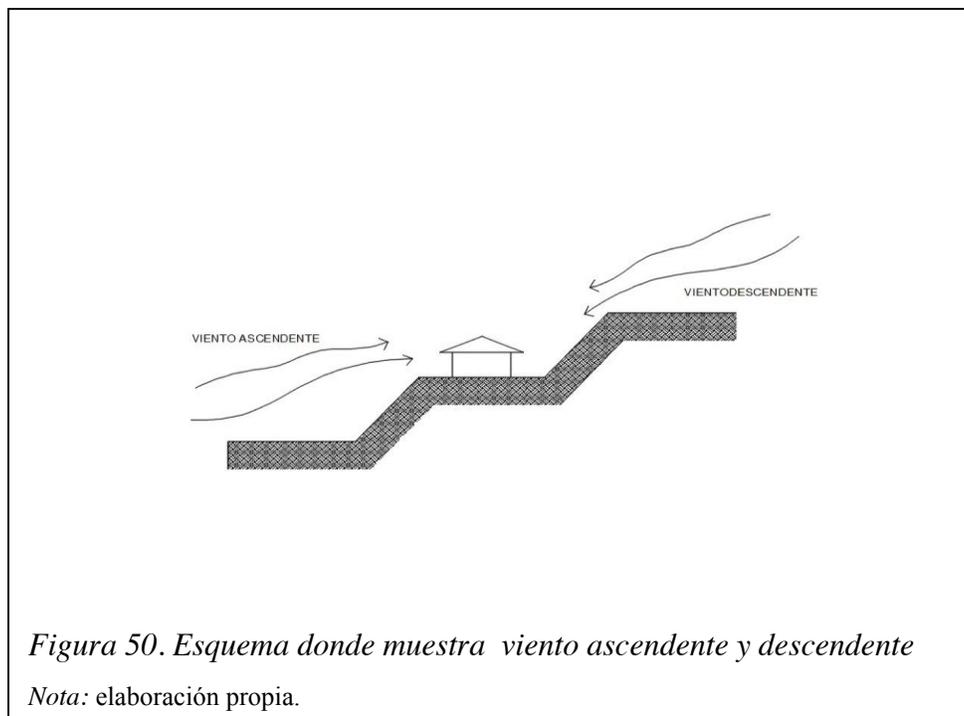
Figura 48. Cálculo de corrección del aire flujo descendente  
 Nota: elaboración propia.

Se toma de la formula la velocidad corregida del viento (0,5056 m/s), sin embargo, se aprecia que el área de la abertura es mucho mayor que propuesta por la NTC 4595 (cálculo de corrección para flujo ascendente, ver figura 49).

Método I DEL FLORIDA SOLAR ENERGY CENTER	
TOA=1,16*[(10)]^(-3 )*V*ach/W*F1*F2*F3*F4	
VOLUMEN	198,0 C
	198,0 P
W	4
F1	0,35 ANGULO INCIDENCIA VIENTO
F2	0,67 SUBURBANO
F3	0,77 POR VECIDARIO
F4	1 UBICACIÓN DE LA VENTANA
ACH	15,8 NÚMERO DE RENOVACIONES
CORRECIÓN DE VELOCIDAD W*F1*F2*F3*F4	
5,02 AREA DE ABERTURA AC	CORRECIÓN DE LA VELOCIDAD
5,02 AREA DE ABERTURA AP	0,72226

Figura 49. Cálculo de corrección del aire flujo ascendente  
 Nota: elaboración propia.

En la fórmula de la velocidad corregida del viento (0,7226 m/s), se aprecia que el área de la abertura, en este caso, es igual que la que sugiere la NTC 4595. Teniendo estos datos de corrección de la velocidad del viento de entrada, se hacen alrededor de 45 simulaciones, tanto en corriente ascendente como descendente en el software CFD de *Autodesk*, en total resultaron 90 simulaciones.



### 4.3 Definición de los parámetros de Acústicos (TL)

Al abrir cualquier vano dentro de un espacio, la atenuación es cero, sin embargo, dependiendo de su proporción y porcentaje de abertura se logra cambiar o reducir, en cierta medida, la atenuación dentro de los espacios, como se comprobó en el artículo publicado en el PLEA 2017 (Brotas et al., 2017), hecho durante la presente Maestría y explicado en el marco teórico. Para ello se usa la fórmula de pérdida por transmisión o reducción sonora, y se le hace comprobación por medio de cámara reverberante. La fórmula de pérdida por transmisión es la siguiente:

$$Re q = 10 \log_{10} \frac{S_{total}}{S_1 10^{\frac{R_1}{10}} + \dots + S_n 10^{\frac{R_n}{10}}} \quad (4)$$

Dónde, **S<sub>1</sub>**: área del elemento 1; **S<sub>n</sub>**: área del elemento n, **S<sub>total</sub>**: área total de la partición, **R<sub>1</sub>**: pérdida de transmisión del elemento y **R<sub>n</sub>**: Pérdida de transmisión del elemento n.

Para encontrar el índice de reducción equivalente o TL, combinado de cada material, se hicieron mediciones, durante la Maestría, en salones de la Universidad de San Buenaventura, que están contruidos con los mismos materiales que solicita la NTC 4595 de 2006, que para este caso, son hechos de bloque más revoque y puerta en madera, con los cuales se pudo extrapolar los TL al modelo experimental de los 3 tipos de aulas a evaluar.

La otra forma es comprobación experimental en cámara reverberante, construida para evaluar frecuencias en banda de 500 Hz que consta de dos dispositivos en los extremos, donde en uno se coloca la fuente sonora y en el otro el receptor la cámara que fue construida en madera aglomerada de 19 mm, forrada con poliestireno expandido de densidad media, con espesor de 50 mm (ver figura 52). Se usan modelos a escala 1:25 de los vanos de la fachada, con las diferentes aberturas de 20%, 40%, 60%, 80% y 100%, en razón del área del vano, priorizando la proporción horizontal (ver figura 51). Esos modelos, se colocan en la cámara reverberante y se mide la pérdida por transmisión para una señal de 500 Hz (frecuencia de la voz humana), bajo la norma UNE-EN ISO 354:2004, con un sonómetro marca Cesva calibrado. La fuente emisora de sonidos fue un sistema de amplificación de alta calidad “STAGE VISA” 140 light -140 Watts. Los modelos son contruidos en madera aglomerada forrados con polipropileno y espuma polietileno para absorber el sonido incidente y evitar rebotes de la señal que causen distorsión en la medición. Se hacen inicialmente mediciones con sonido rosa, para determinar el ruido de fondo y poder corregir los resultados de las mediciones. Por cada muestra se hacen 3 medidas y luego se suman y se obtiene el promedio de estos resultados, aplicando la siguiente fórmula:

$$dB_{Totales} = 10 \log_{10} \frac{10^{\frac{X_1}{10}} + 10^{\frac{X_2}{10}} + 10^{\frac{X_n}{10}}}{n}$$

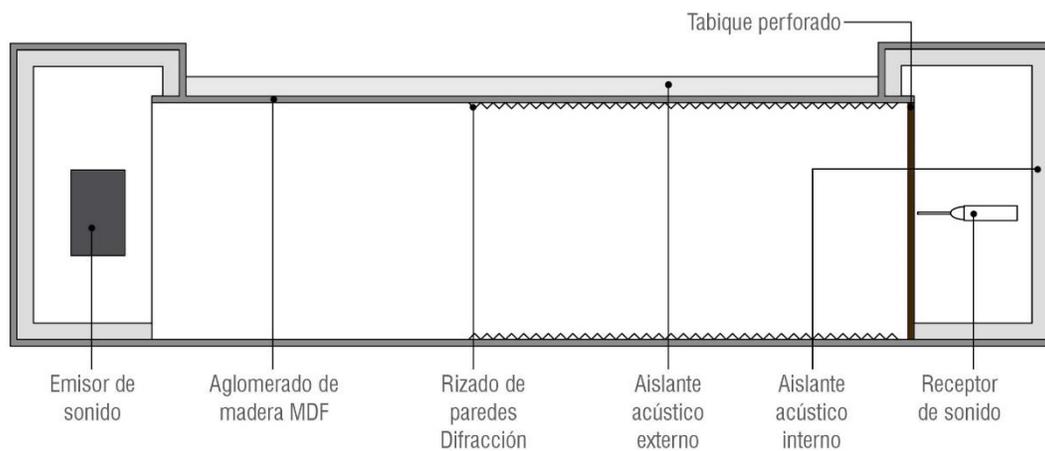
En la anterior ecuación, **X** es la medición en decibelios, y **n** el número de mediciones. Una vez obtenidos los datos de atenuación se le restan las mitigaciones por posición de la fuente,

explicadas en el marco teórico, y las mitigaciones por el entorno, dando como resultado la atenuación final esperada dentro de las aulas



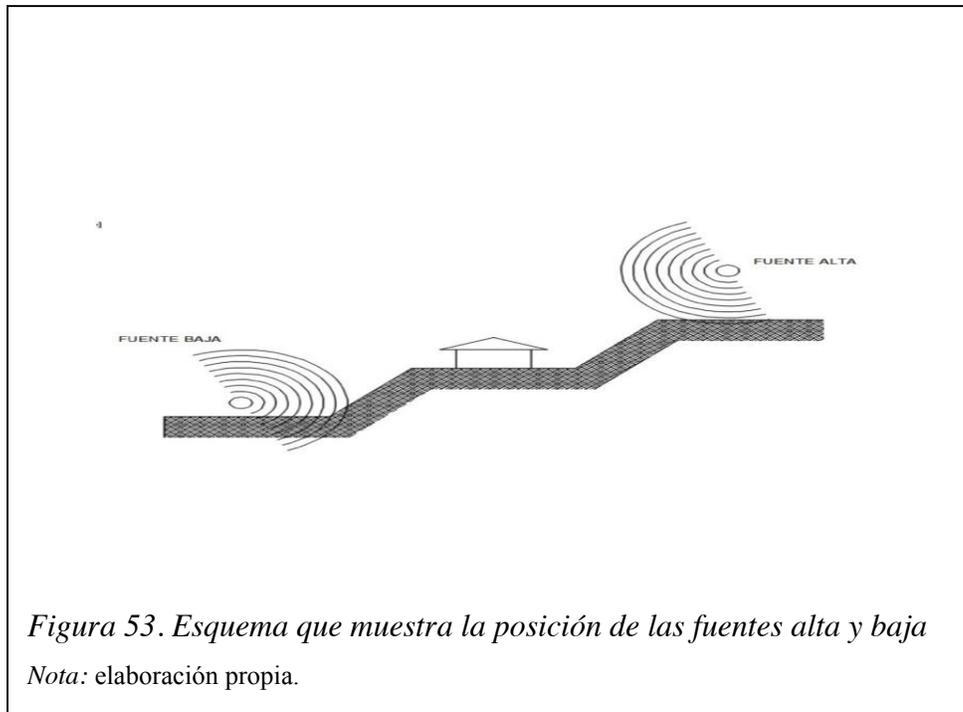
*Figura 51. Fotos paneles y cámara reverberante*

*Nota: elaboración propia.*



*Figura 52. Sección cámara reverberante*

*Nota: fuente: Grupo Emat Universidad Nacional sede Medellín. Es una cámara reverberante forrada con lana de roca en el exterior y al interior aislada con polipropileno.*



#### 4.4 Evaluación de modelos teóricos

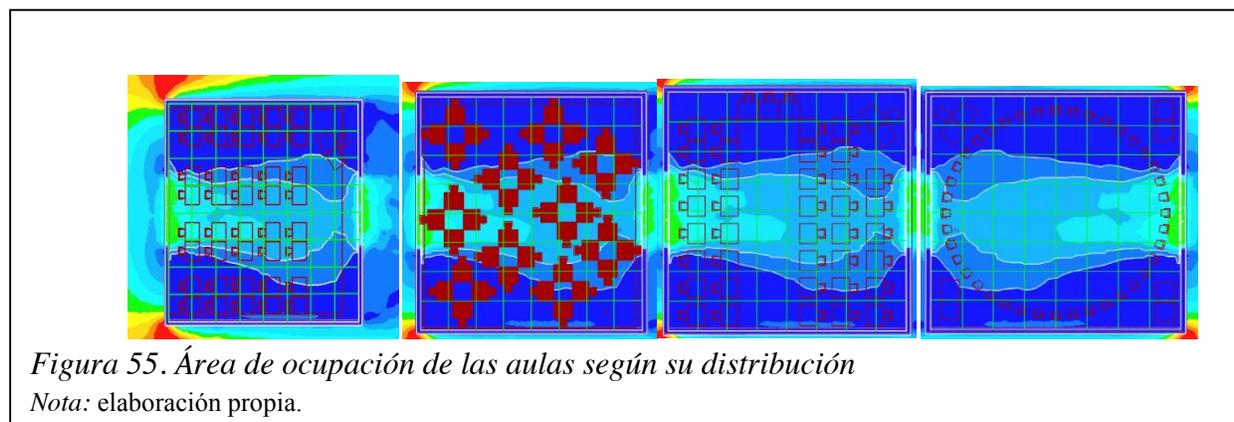
La figura 54, muestra los parámetros para evaluar los resultados obtenidos en la investigación. Los datos sobre la velocidad del viento interior para un comportamiento óptimo de los niños en edades entre 6 y 8 años, se extrae de una investigación hecha en Inglaterra (Natarajan, Rodriguez, & Vellei, 2015), donde las necesidades térmicas de los niños en estas edades son mucho más exigentes que para los adultos. Adicionalmente, el nivel de aislamiento de su ropa es muy alto, lo que aumenta las exigencias en ventilación interior. La ventilación adecuada es de 8 l/s por persona, con una velocidad mínima al interior del aula de 0,45 m/s, características que permiten confort neutro, según la norma ISO 7730 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2006).

Se toma esta clasificación que hace García (2017), ajustando el metabolismo MET y el vestuario CLO a las condiciones de niños de 4 y 5 años, para la ventilación interior de aulas infantiles. Así, velocidades de 0,45 m/s o mayores, propician el óptimo confort neutro (ISO 7730) (Natarajan et al., 2015); entre 0,31 m/s y 0,44 m/s se clasifica como aceptable (ligeramente caluroso según ISO 7730); y menor de 0,31 como deficiente (caluroso ISO 7730). El porcentaje de área ventilada se obtiene al cruzar los diferentes tipos de distribución del aula con su ocupación por los

alumnos, lo ideal es dividir el aula en cuadrantes de 1 m<sup>2</sup> y se hace el conteo del área ocupada por los alumnos y el profesor (tanto en aulas cuadradas como aulas rectangulares); adicionalmente se consulta con varios colegios de la ciudad acerca de los promedios de asistencia en los grados 1, 2 y 3 de primaria; la investigación arroja un porcentaje de asistencia del 70% que equivale a ventilar a 35 niños de la clase, por debajo de este porcentaje sería deficiente la ventilación.

PARAMETROS TÉCNICOS			
	Optimo	Aceptable	Deficiente
% Área ventilada con viento (0,31 m/s-0,45)	80%	60-70%	< 60%
Atenuación	25 dBA	19-24 dBA	19 dBA

*Figura 54. Parámetros técnicos de evaluación*  
 Nota: elaboración propia.



Por último, para obtener niveles de ruido de fondo de 50 dBA, que son los máximos permitidos para no perder la concentración, y teniendo en cuenta los estudios sobre las mediciones hechas en Medellín por el Grupo Emat, para jardines infantiles en áreas densamente pobladas, donde también se asientan los colegios de esta ciudad, se encontraron mediciones en promedio de 57,9 dBA (Marin-Restrepo, Morales-Maya, Guerrero-Teran, Garcia-Cardona, & Waldron-Toro, 2015). Así, se opta por clasificar como atenuaciones óptimas de 25 dBA y de 24-19 dBA como aceptable, y menor de 19 dBA como deficiente.

### 5. Resultados

Antes de iniciar este capítulo se presenta algunos planos cartesianos, que muestran gráficamente el comportamiento del área ventilada versus la atenuación lograda, ver figuras 56 a 62. Se muestran también de manera descriptiva los resultados más relevantes, donde los porcentajes de abertura están expresados por colores así: negro 20%, verde 40%, rojo 60%, amarillo 80% y cian 100%.

Posteriormente, se muestran esquemas de los análisis estadísticos, para comprender el desarrollo del análisis de los resultados que prosiguen.

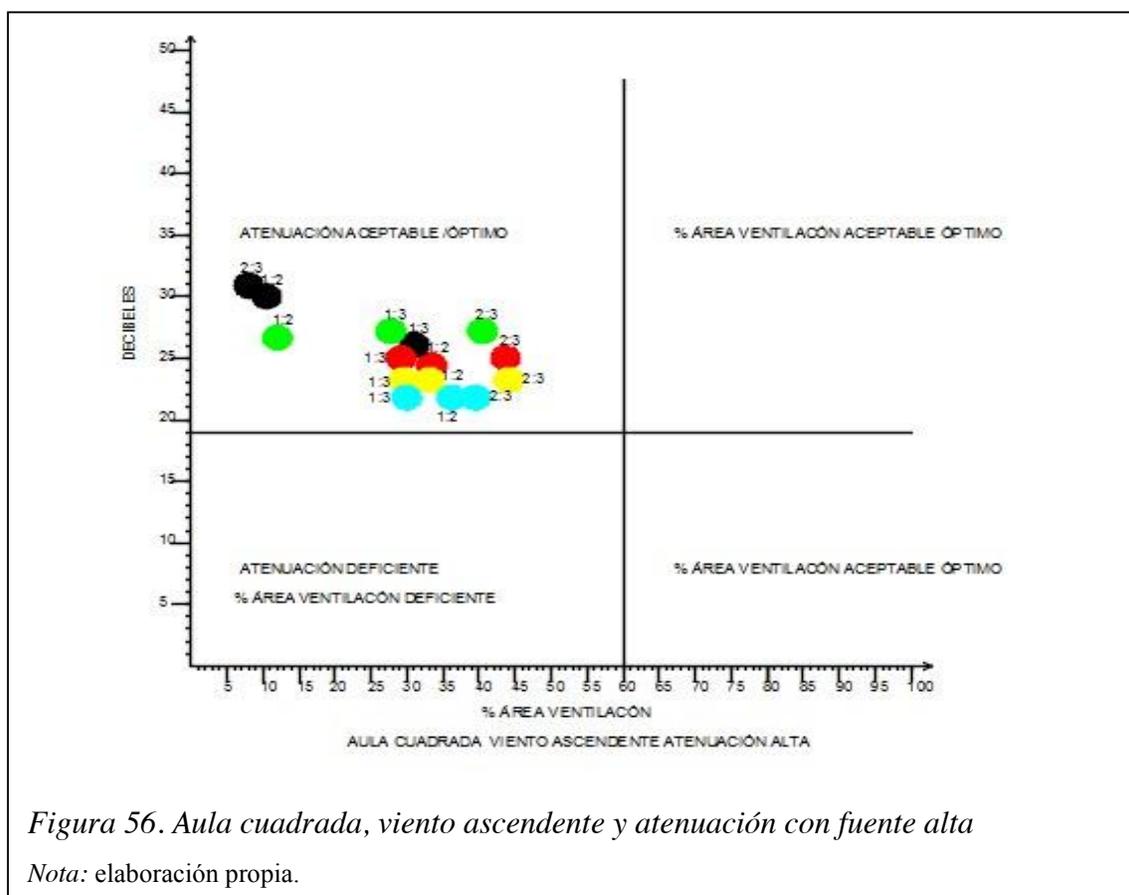
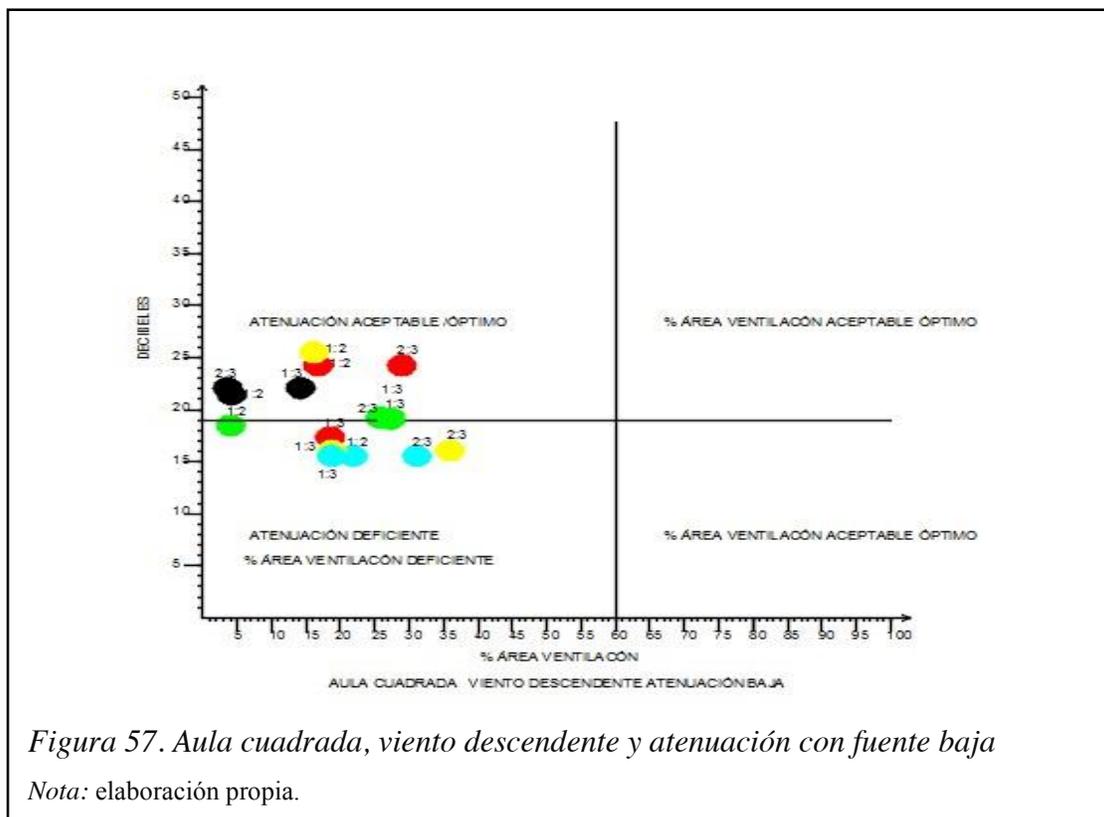
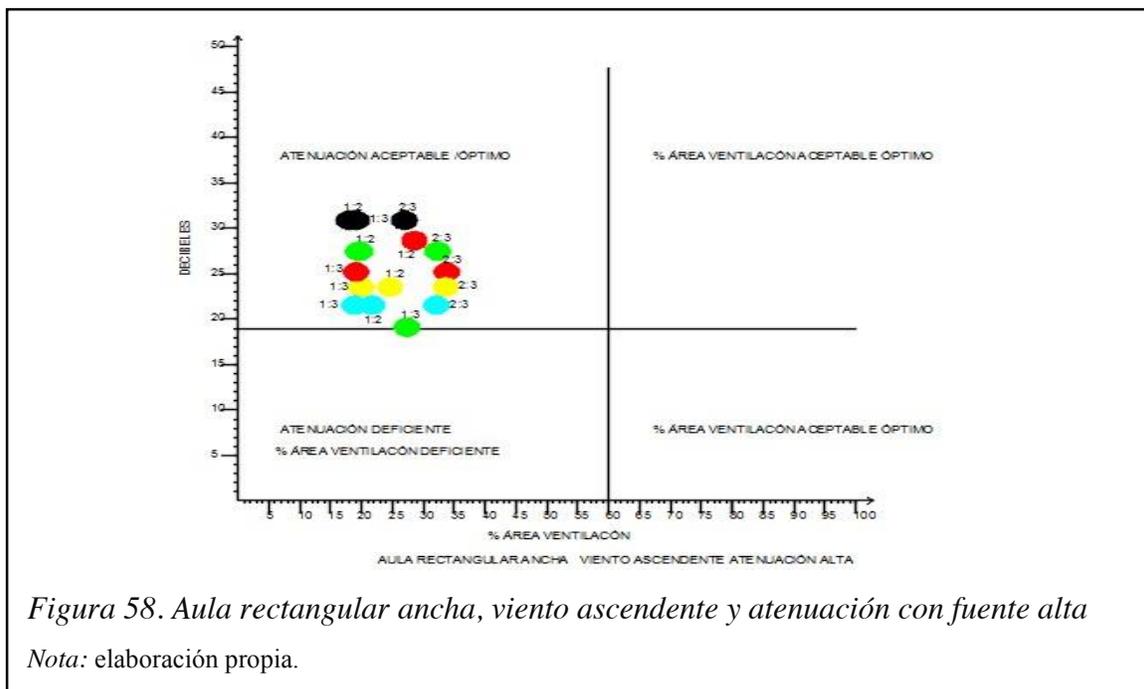


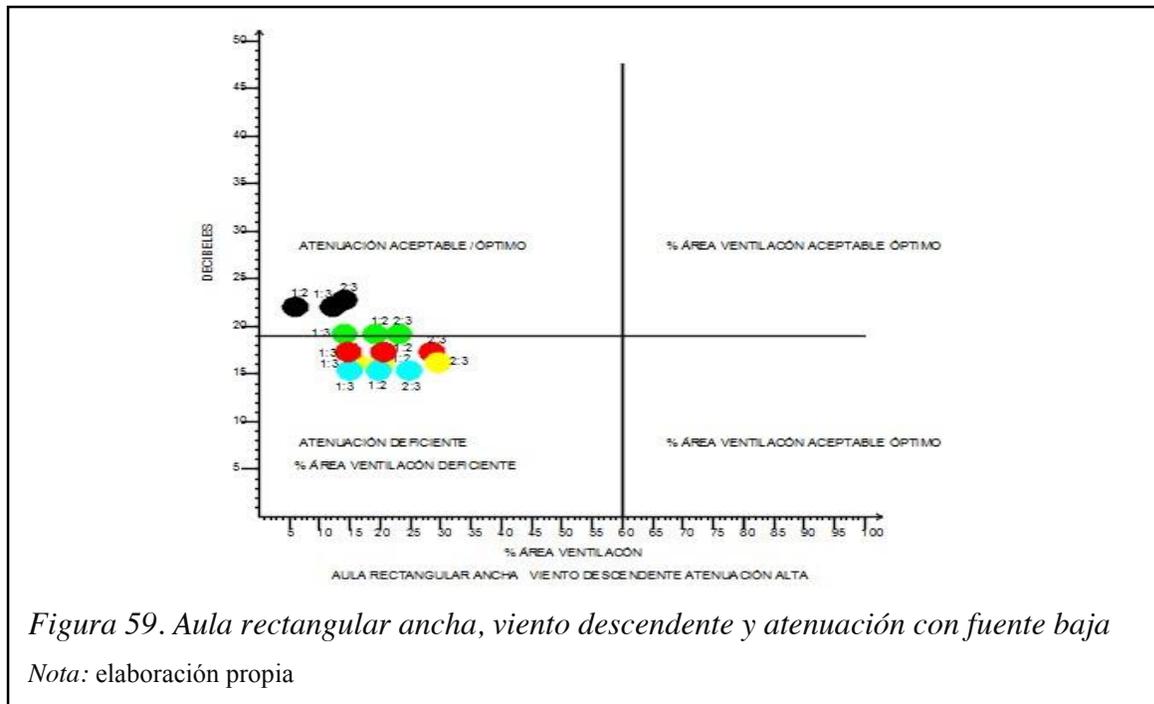
Figura 56. Aula cuadrada, viento ascendente y atenuación con fuente alta

Nota: elaboración propia.

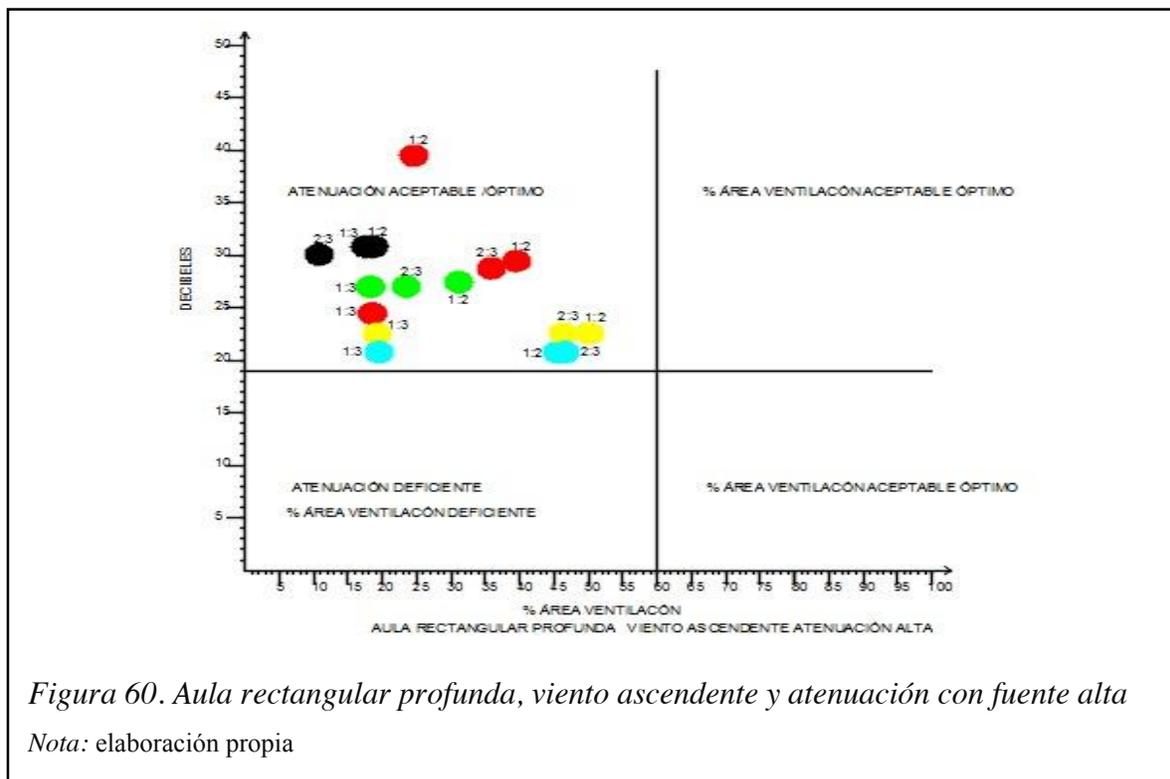


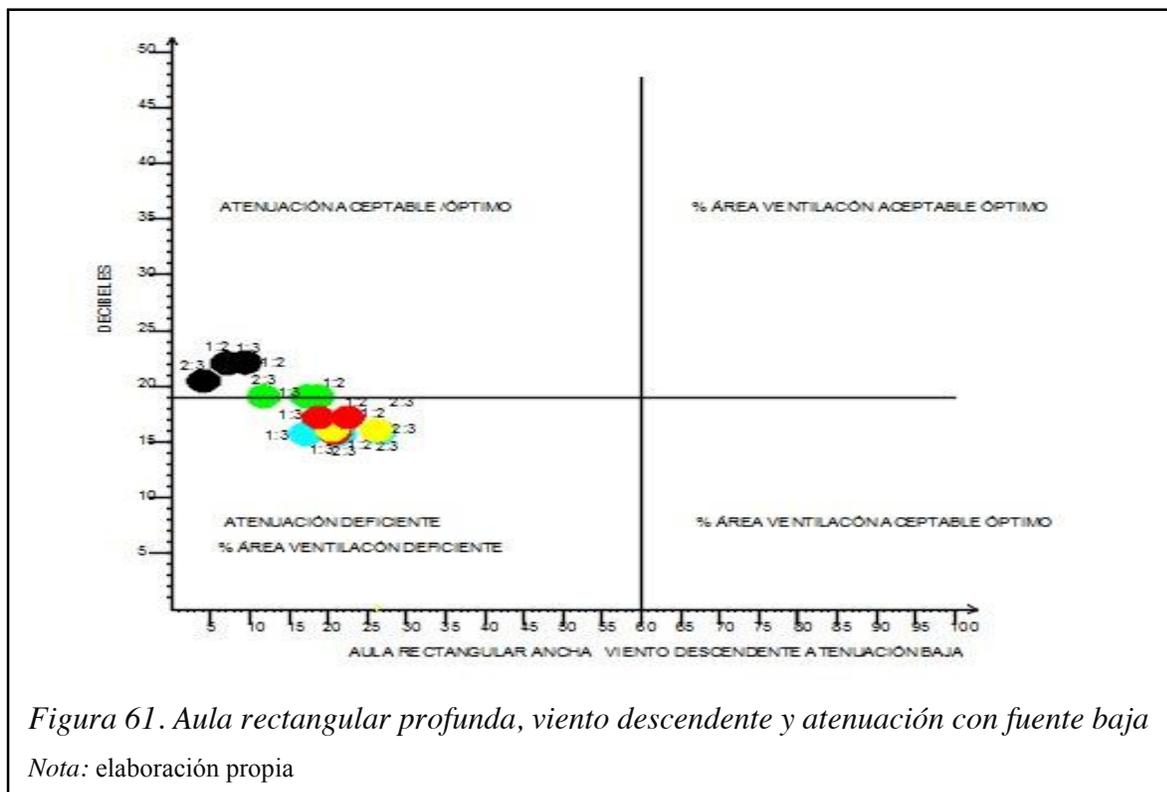
En el aula cuadrada se observa que los mejores comportamientos simultáneos están en la vanos 2:3 y los peores en los vanos 1:2, y que el mejor comportamiento en ventilación lo obtiene el vano 2:3 con 80%de abertura.





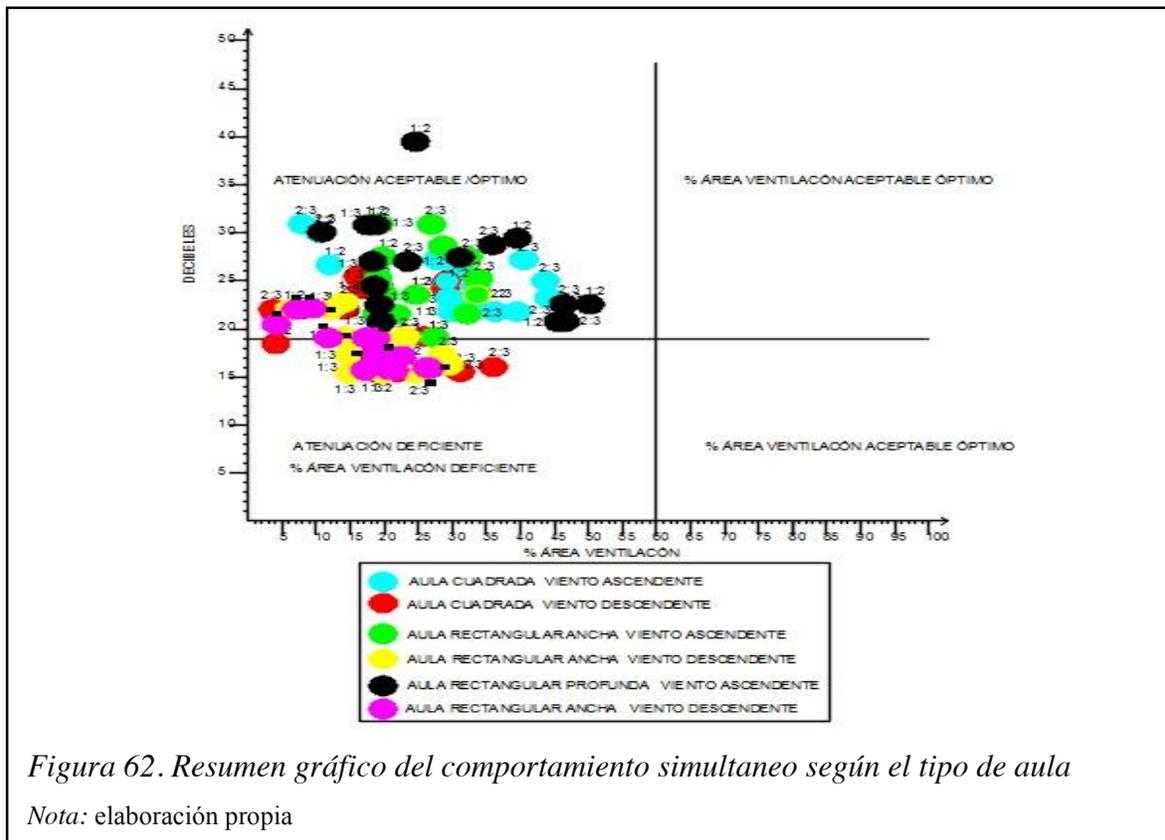
En el aula rectangular ancha, igualmente, los mejores comportamientos simultáneos se encuentran en vanos de 2:3, siguiéndoles los vanos de 1:3 y 1:2. Las mejores atenuaciones se aprecian con fuente alta, y las mejores áreas ventiladas con viento ascendente.





En el aula rectangular profunda, las mejores áreas ventiladas están en los vanos 2:3 y 1:2 con 80% de abertura, igualmente, los comportamientos de menor desempeño del área ventilada están en los vanos 2:3, con 20% de abertura. Las mejores atenuaciones se aprecian con fuente alta y las mejores áreas ventiladas con viento ascendente

Finalmente, se puede apreciar que los mejores comportamientos combinados los presenta el aula cuadrada, las mejores áreas ventiladas están en el aula rectangular profunda y el aula que presenta los comportamientos simultáneos más modestos, es también el aula rectangular profunda con viento descendente. Las menores atenuaciones logradas en los tres tipos de aula se encuentran con viento descendente y atenuación de fuente baja (ver resumen en figura 62).



En la figura 63 se puede ver el resumen del análisis estadístico tipo tabla, y en la figura 64 se puede apreciar de forma más gráfica:

OBJETIVO		VARIABLES	Tipo de Variable	Prueba usada
1	Verificar la relación de la forma de la aula con el área ventilada	Forma de la aula	Categorica (3 categoría)	kruskal-wallis
		Área ventilada/ascendente/descendente	Númerica (discreta)	
2	Verificar la relación de la forma de la aula con la atenuación	forma de la aula	Categorica (3 categoría)	Anova
		Atenuación F.alta/F.baja	Númerica (discreta)	
3	Verificar la relación del porcentaje de abertura con el área ventilada	Porcentaje de abertura	Categorica (5 categoría)	kruskal-wallis
		Área ventilada	Númerica (discreta)	
4	verificar la relación del porcentaje de abertura con la atenuación	Porcentaje de abertura	Categorica (5 categoría)	Anova
		Área ventilada	Númerica (discreta)	

*Figura 63. Resumen del análisis estadístico*  
 Nota: elaboración propia.

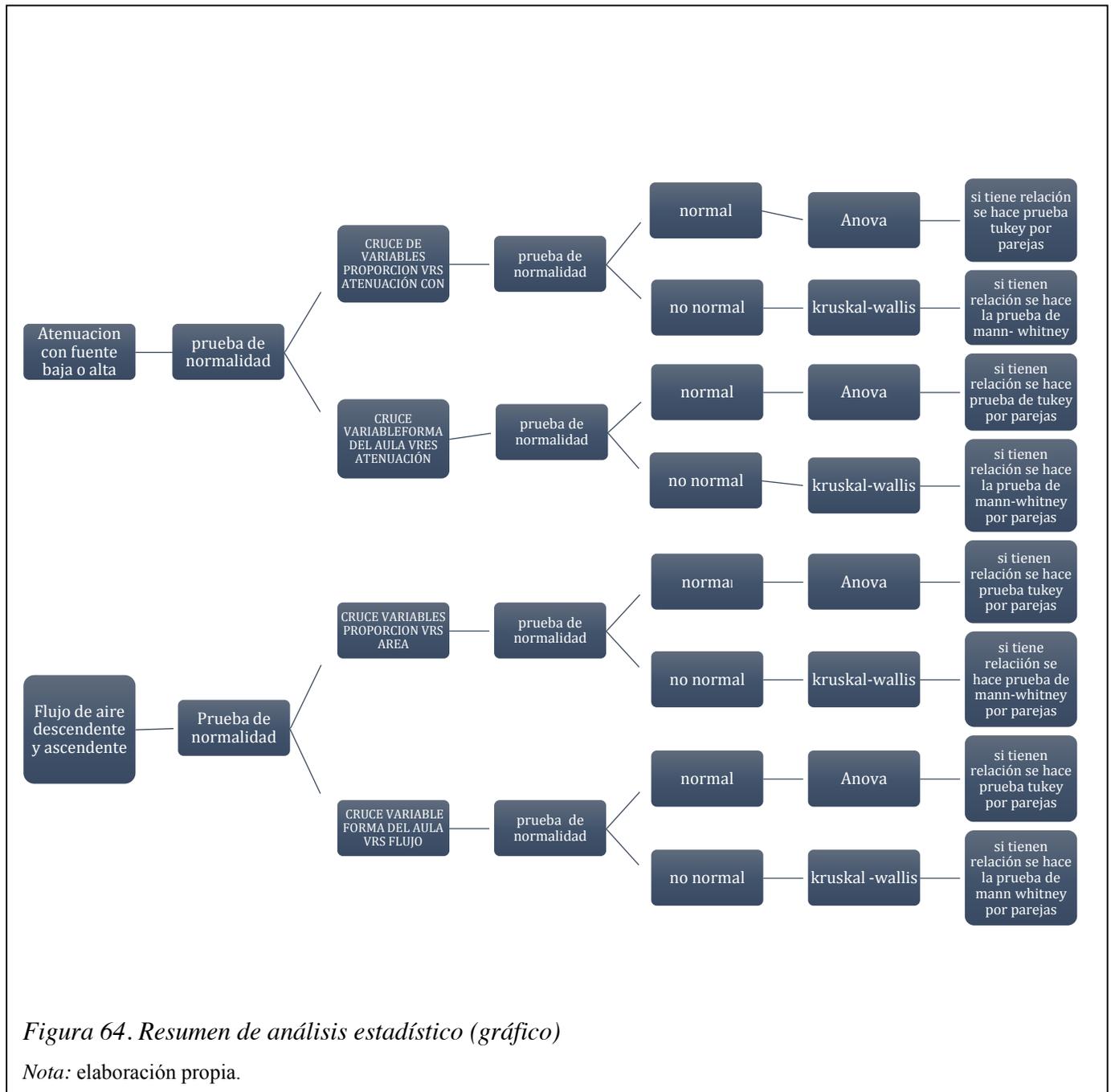


Figura 64. Resumen de análisis estadístico (gráfico)

Nota: elaboración propia.

Una vez obtenidos los datos de las áreas ventiladas, tanto los flujos descendentes como los ascendentes y de atenuaciones, con fuente baja y alta, se les aplican pruebas estadísticas de

Kolmogorov-Smirnov, para saber si los datos tienen una distribución normal (Tobergte & Curtis, 2013; Yun et al., 2014).

Tabla 5. Prueba de normalidad área viento ascendente

Pruebas de normalidad						
área ventilada ascendente	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
	0,151	45	0,012	0,957	45	0,097

Nota: elaboración propia usando el software SPSS.

El valor de significancia del test Kolmogorov-Smirnov fue menor a 0,05 ( $p=0,012$ ), lo cual indica que los datos no tienen distribución normal.

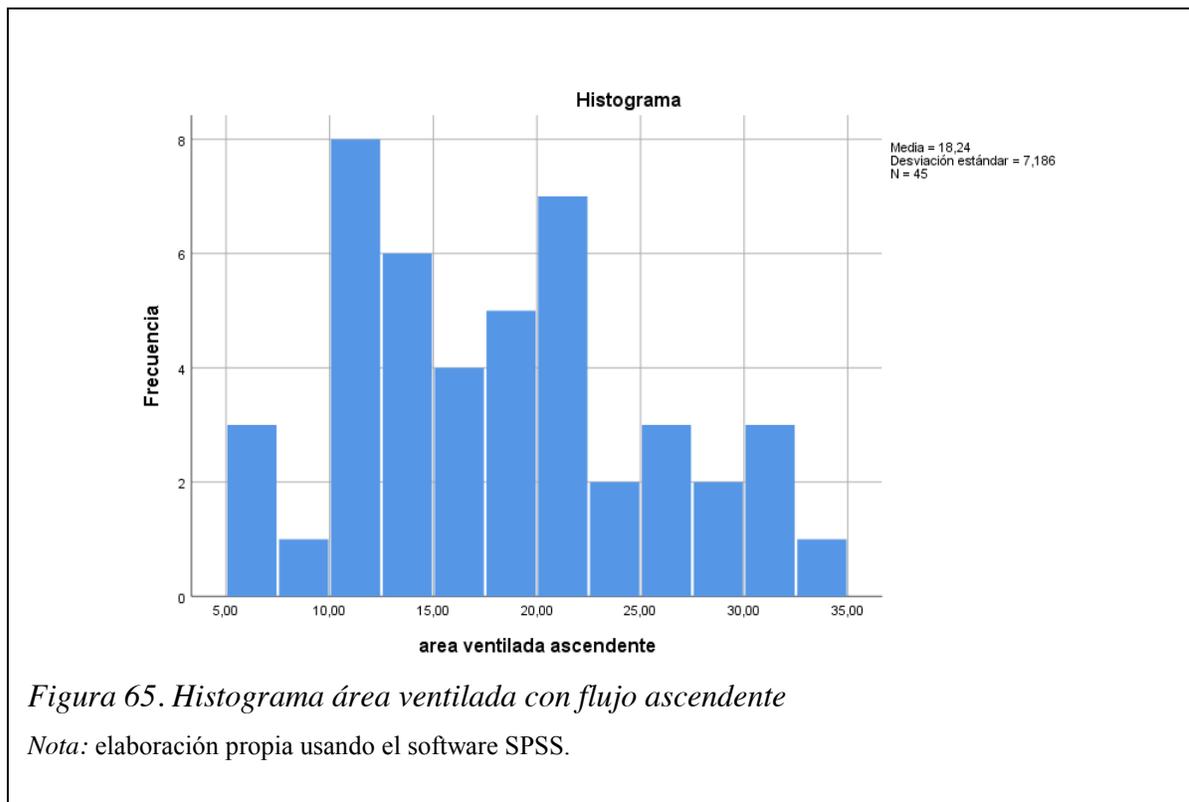


Figura 65. Histograma área ventilada con flujo ascendente

Nota: elaboración propia usando el software SPSS.

### 5.1.1 Análisis de distribución de los datos según forma del aula con flujo ascendente.

Los gráficos de frecuencias (ver grupo de anexos A), muestran que la distribución de los datos, considerando que las formas del aula, no son normales (el aula cuadrada es la que presenta una distribución próxima a la normal). Esto fue confirmado por el test de normalidad (ver siguiente tabla), en el que sólo para el aula cuadrada, el valor de significancia fue mayor que 0,05 ( $p=0,157$ ). Como en las aulas rectangulares los valores fueron inferiores a 0,05, las distribuciones no son normales y por lo tanto es necesario usar tests no paramétricos

Pruebas de normalidad							
FORMA AULA		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	Cuadrada	0,189	15	0,157	0,899	15	0,090
	Rectangular ancha	0,243	15	0,018	0,816	15	0,006
	Rectangular profunda	0,238	15	0,022	0,872	15	0,036
a. Corrección de significación de Lilliefors							

*Figura 66. Prueba de normalidad para área ventilada ascendente y forma del aula*  
 Nota: elaboración propia usando el software SPSS.

Se usa prueba de Kruskal-Wallis para poder saber si hay relación entre el área ventilada y la forma del aula.

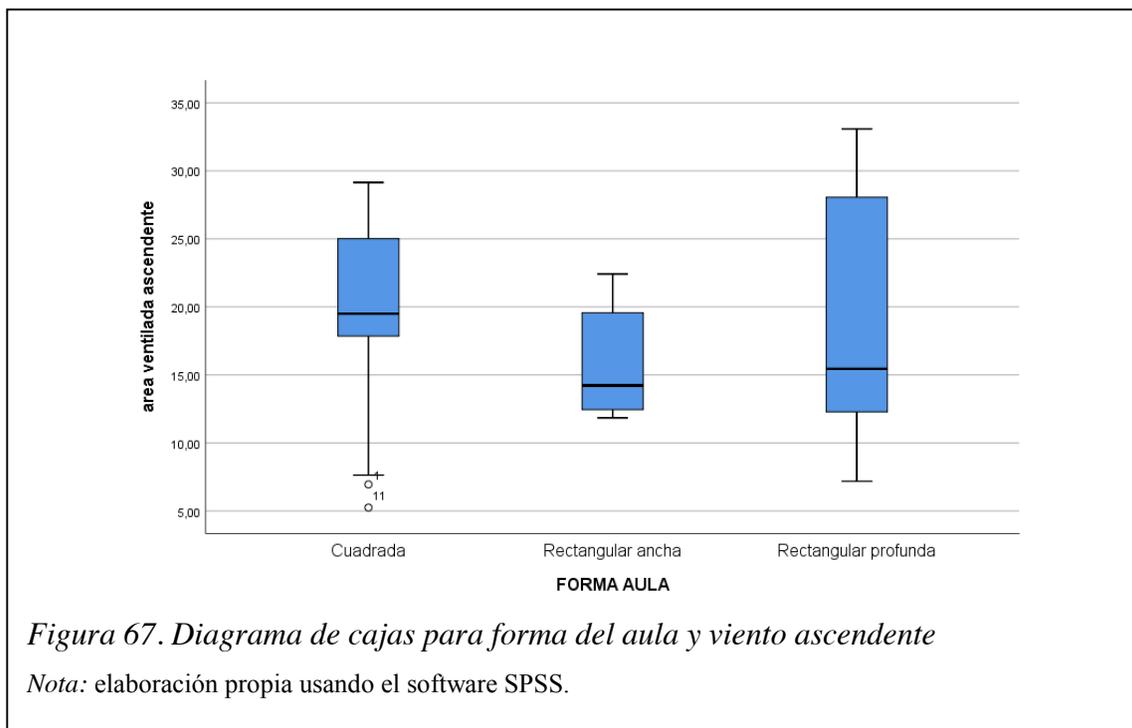
*Tabla 6. Prueba Kruskal-Wallis para forma del aula con viento ascendente*

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup>	
	Área ventilada ascendente
H de Kruskal-Wallis	2,218
Gl	2
Sig. Asintótica	0,330

Nota: elaboración propia usando el software SPSS.

Como el valor de significancia fue mayor que 0,05 (en la tabla anterior), el resultado del test indicó que los valores de área ventilada no fueron estadísticamente diferentes cuando varió la forma del aula. Es decir, la forma del aula no tiene relación con el área que fue ventilada cuando se dieron los vientos son ascendentes.

En el aula de planta cuadrada, las áreas ventiladas fueron mayores que en las aulas de planta rectangular (valor promedio de área ventilada = 19,48 m<sup>2</sup>). Por otro lado, cuando el aula fue rectangular profunda, el área ventilada tuvo mayor variación (promedio de área ventilada= 19,40 m<sup>2</sup>; valor de desvío estándar= 8,82 m<sup>2</sup>). En el aula rectangular ancha hubo menos variación en el tamaño del área ventilada, y el promedio de área ventilada fue igual a 15,84 m<sup>2</sup>).



### 5.1.2 Análisis de distribución de los datos según proporción de la vano con flujo ascendente.

La tabla 35 muestra Prueba de normalidad del área ventilada con flujo ascendente y proporción del vano:

PROPORCION VENTANA	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
area ventilada 1:2	,138	15	,200*	,960	15	,698
ascendente 1:3	,362	15	,000	,732	15	,001
2:3	,204	15	,093	,892	15	,071

\*. This is a lower bound of the true significance.  
 a. Lilliefors Significance Correction

*Figura 68. Prueba de normalidad del área ventilada con flujo ascendente y proporción del vano*  
 Nota: elaboración propia usando el software SPSS.

Debido a que en la proporción 1:3 se encuentra resultados anormales ( $p < 0,05$ ), se debe usar la prueba de Krukal –Wallys, para conocer si el área ventilada es igual para todas las proporciones de los vanos o al menos una de ellas es diferente.

			area ventilada ascendente
Chi-Square			8,768
df			2
Asymp. Sig.			,012
Monte Carlo Sig.			,011 <sup>a</sup>
Sig.	99% Confidence Interval	Lower Bound	,008
		Upper Bound	,013

a. Based on 10000 sampled tables with starting seed 299883525.  
 b. Kruskal Wallis Test  
 c. Grouping Variable: PROPORCION VENTANA

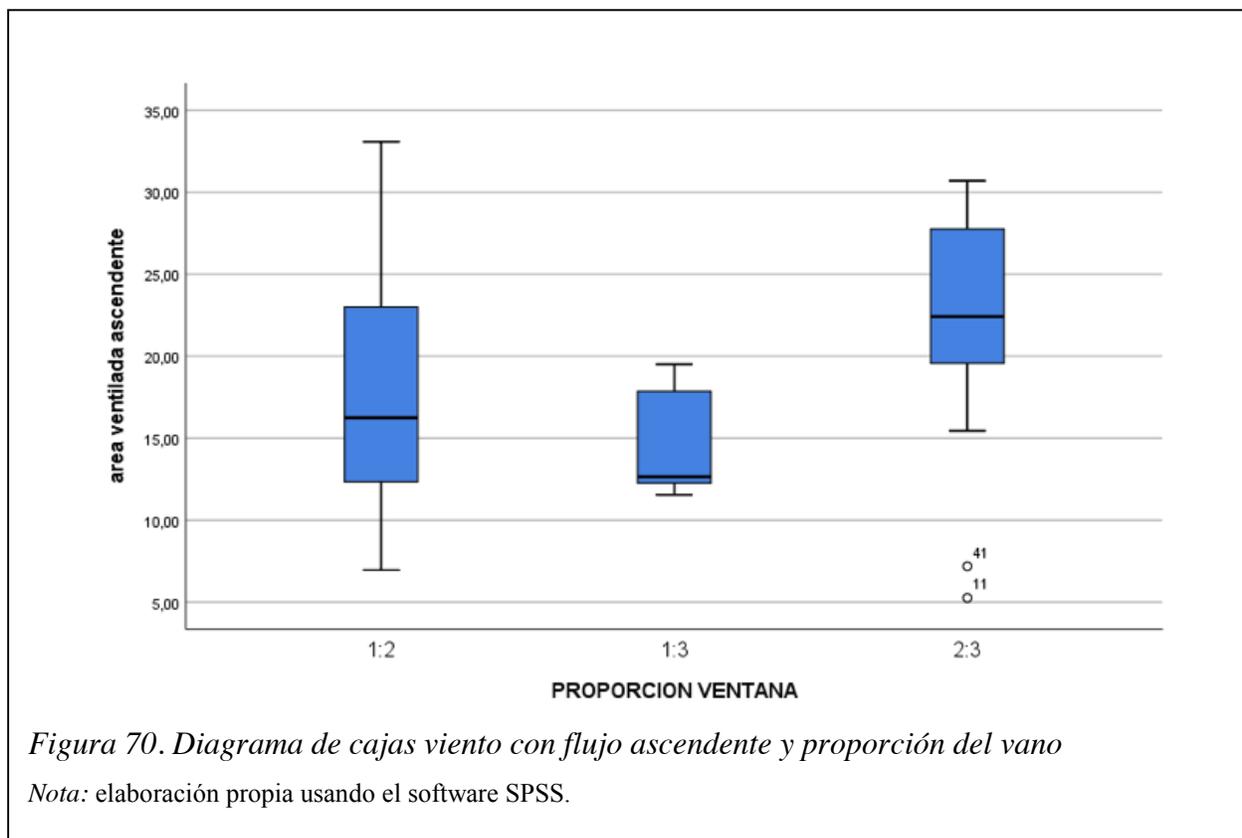
*Figura 69. Prueba de Kruskal-Wallis para proporción y viento ascendente*  
 Nota: elaboración propia usando el software SPSS.

Como el valor de significancia fue menor que 0,05 (en la tabla anterior: Asymp. Sig.= 0,012), esto indica que el área ventilada fue diferente según la proporción de la ventana. Es decir, la proporción de la ventana tiene relación con el área ventilada dentro de las aulas. Para saber qué

proporción marca la diferencia, se hace la prueba de Mann-Whitney por parejas (ver grupo de anexos B).

De los resultados obtenidos se concluye que:

No existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos proporciones de 1:2 y 1:3. La proporción de 1:2 y 2:3, no tienen diferencias significativas estadísticamente en el área ventilada. Las proporciones de 1:3 y 2:3 si tienen diferencias significativas, siendo esta ultima la proporción de mayor ventilación. Se puede entonces concluir que la proporción que genera mayor área ventilada es la de 2:3, con un promedio de 21,92 m<sup>2</sup>, y le siguen en su orden la de 1:2 y la de 1:3. La proporción que más variación tiene en sus áreas ventiladas es la de 1:2, con una desviación estándar de 7,86 m<sup>2</sup> y la que menos variaciones presenta es la proporción de 1:3 con una desviación estándar de 3,18 m<sup>2</sup> (ver figura 70).



### 5.2 Viento con flujo descendente

El valor de significancia del test Kolmogorov-Smirnov, fue mayor a 0,05 ( $p= 0,200$ ), lo cual indica que los datos tienen distribución normal.

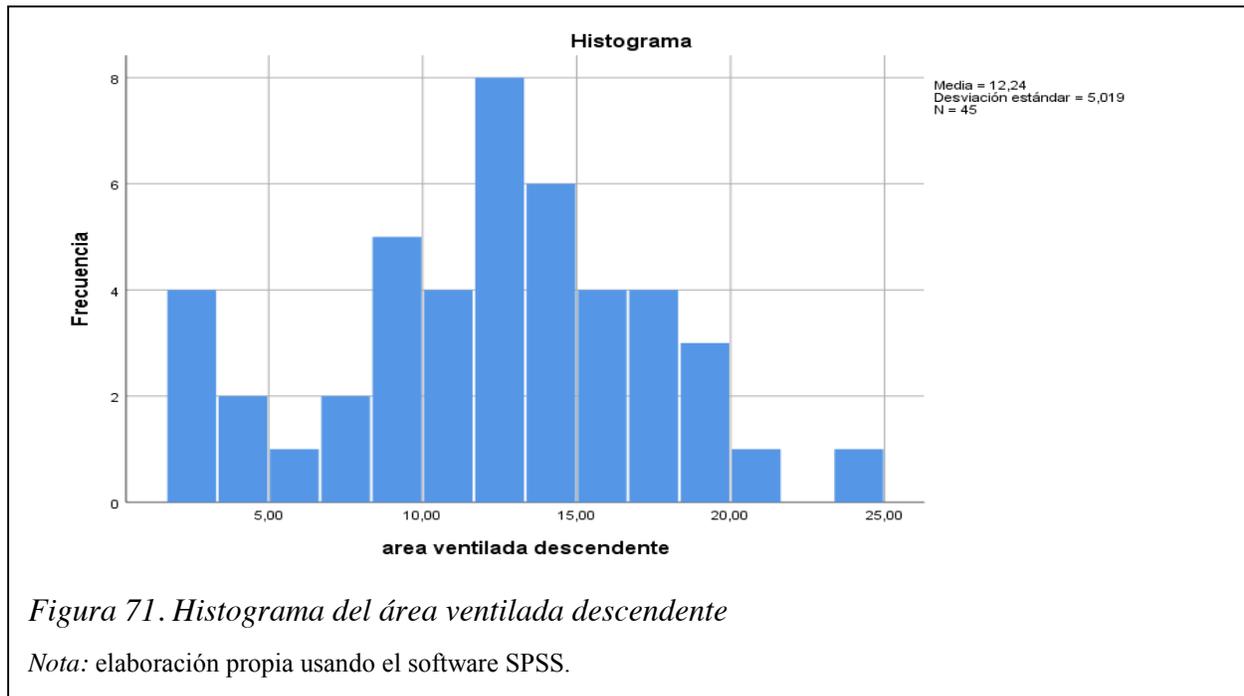


Tabla 7. Prueba de normalidad para flujo descendente

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Área ventilada descendente	0,101	45	0,200*	0,972	45	0,345

*Nota 1:* elaboración propia usando el software SPSS.

*Nota 2:* \* = límite inferior de la significación verdadera.

*Nota 3:* a = Corrección de significación de Lilliefors

### 5.2.1 Análisis de distribución de los datos según forma del aula con flujo descendente.

Se analizan las formas de las aulas con viento descendente y la única que no presenta un comportamiento normal es el aula profunda, donde  $p < 0,05$ . Las demás presentan un comportamiento normal, por esta razón se deben aplicar pruebas no paramétricas. Esto se puede apreciar en los histogramas siguientes:

Pruebas de normalidad							
FORMA AULA		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada descendente	Cuadrada	0,141	15	,200 <sup>*</sup>	0,935	15	0,324
	Rectangular ancha	0,125	15	,200 <sup>*</sup>	0,961	15	0,704
	Rectangular profunda	0,225	15	0,039	0,919	15	0,188

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.  
a. Corrección de significación de Lilliefors

*Figura 72. Prueba de normalidad para área ventilada descendente y forma del aula*  
*Nota: elaboración propia usando el software SPSS.*

En el aula de planta cuadrada, las áreas ventiladas fueron mayores que en las aulas de planta rectangular (Valor promedio de área ventilada =  $13,06 \text{ m}^2$ ). Así mismo, esta misma aula, fue la que tuvo el área ventilada con mayor variación (valor de desvío estándar =  $6,59 \text{ m}^2$ ). En el aula rectangular ancha hubo menos variación en el tamaño del área ventilada, y el promedio de área ventilada fue igual a  $12,16 \text{ m}^2$ . Estas diferencias son presentadas en el gráfico de cajas.

Los datos se comportaron normales en las aulas cuadradas, rectangular ancha y en la rectangular profunda. Estas tienen un comportamiento no paramétrico, por esta razón se aplican los test no paramétricos de Kruskal Wallis. Como el valor de significancia fue mayor que  $0,05$  (en la figura 72: Asymp. Sig. =  $0,53$ ), el resultado del test indicó que los valores de área ventilada no fueron estadísticamente diferentes cuando varió la forma del aula. Es decir, la forma del aula no tiene relación con el área que fue ventilada cuando los vientos son descendentes.

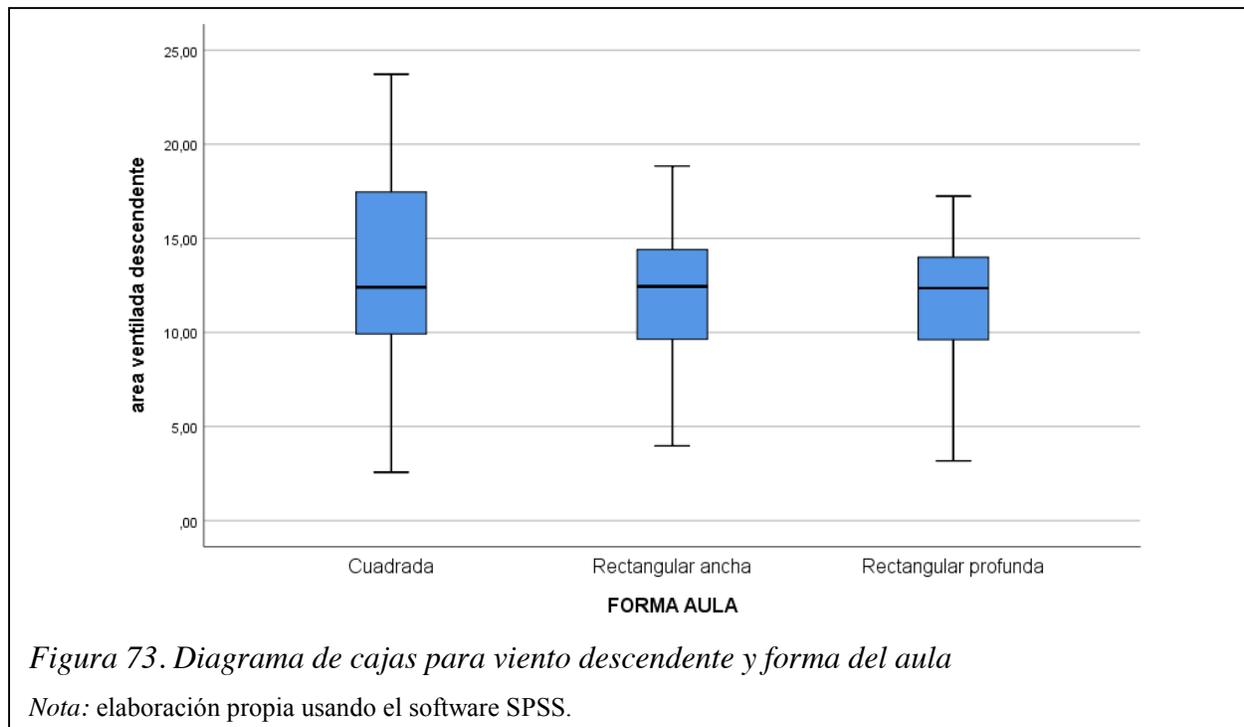


Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para forma del aula y viento descendente

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup>	
	Forma aula
H de Kruskal-Wallis	3,750
gl	1
Sig. asintótica	,053

Nota 1: elaboración propia usando el software SPSS.

Nota 2: a= prueba de Kruskal Wallis

Nota 3: b= variable de agrupación: área ventilada descendente

**5.2.2 Análisis de distribución de los datos según proporción de la vano con flujo descendente.**

Solo la proporción 1:3 presenta un valor mayor a 0,05 (0,200), el resto de las proporciones presentan un comportamiento no normal, por lo tanto se hacen las pruebas no paramétricas Kuskal Wallys, para saber si el área ventilada descendente es igual en todas la proporciones o al menos una de ellas es diferente.

Pruebas de normalidad							
PROPORCION VENTANA		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada descendente	1:2	0,301	15	0,001	0,835	15	0,011
	1:3	0,155	15	,200 <sup>*</sup>	0,895	15	0,081
	2:3	0,211	15	0,071	0,899	15	0,091
* Esto es un límite inferior de la significación verdadera.							
a. Corrección de significación de Lilliefors							

*Figura 74. Prueba de normalidad para flujo de aire descendente y proporción del vano*

*Nota:* elaboración propia usando el software SPSS.

Como el valor de significancia fue menor que 0,05 (en la tabla siguiente: Asymp. Sig.= 0,015), indica que el área ventilada fue diferente al menos una proporción. Es decir, la proporción de la ventana tiene relación con el área ventilada dentro de las aulas, para saber cuál proporción presenta las diferencias, se hace el test Mann Whitney por parejas, es decir, proporción 1:2 con 1:3, 1:2 con 2:3 y 1:3 con 2:3.

Se aplica la corrección de Bonferroni dividiendo el valor de la significancia (0,05) entre el número de comparaciones, que en este caso son 3 ( $0,05/3 = 0,017$ ). La significancia asintótica es de 0,049, siendo mayor que 0,017, lo cual quiere decir que no hay diferencias significativas en el área ventilada entre las proporciones 1:2 y 2:3.

Aplicando la corrección de Bonferroni, no hay diferencias significativas en el área ventilada de las proporciones 1:2 y 1:3, pues la operación  $0,044 > 0,017$ , no presenta una diferencia significativa, sin embargo, se puede decir que la proporción de 2:3 es la que mejor área ventilada genera al interior del espacio, con un promedio de  $14,68 \text{ m}^2$ , y tiene la mayor variación en sus áreas ventiladas con una desviación de  $6,22 \text{ m}^2$ , seguida con la de 1:2 y por último la proporción de 1:3, que tiene la menor variación en las áreas ventiladas con una desviación de  $1,83 \text{ m}^2$ . Esto se puede apreciar en el diagrama de cajas.

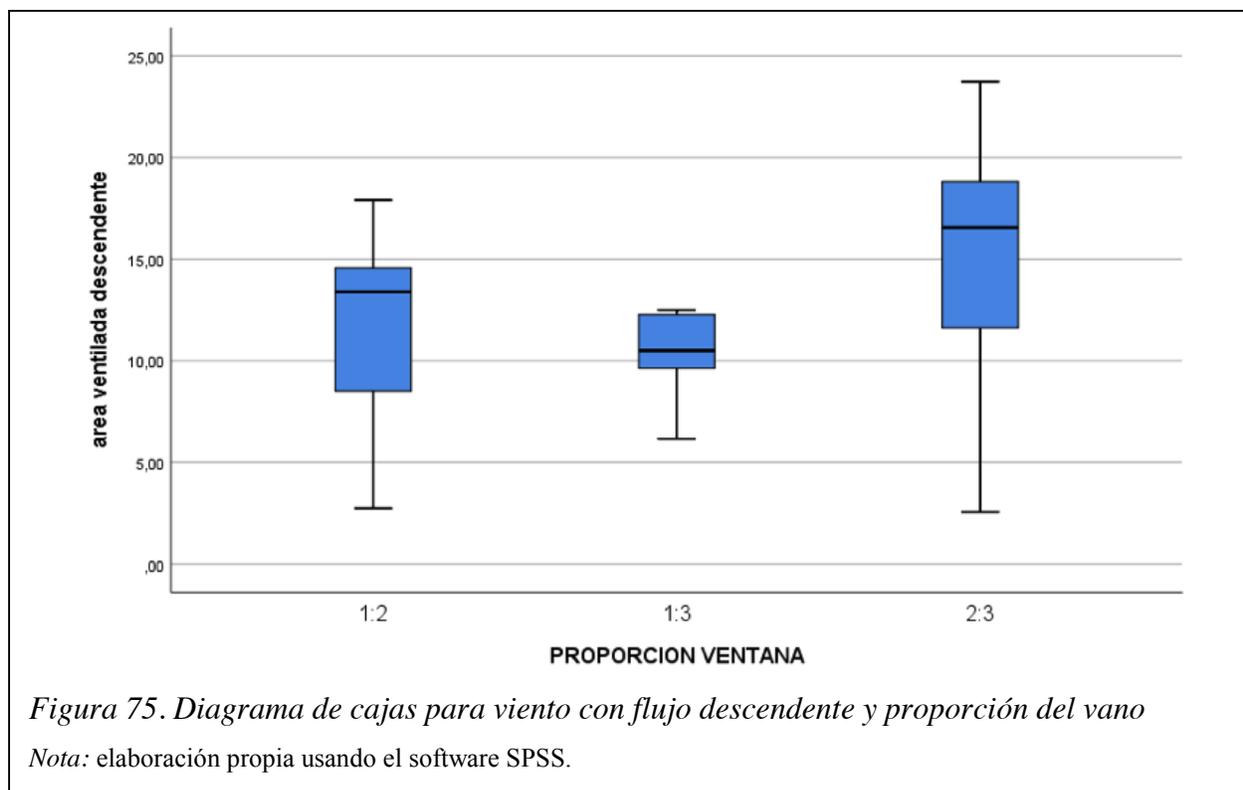
*Tabla 9. Prueba Kruskal-Wallis para viento descendente y proporción vano*

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup>	
H de Kruskal-Wallis	8,443
Gl	2
Sig. Asintótica	,015

*Nota 1:* elaboración propia usando el software SPSS.

*Nota 2:* a= prueba de Kruskal Wallis

*Nota 3:* a= Variable de agrupación



*Figura 75. Diagrama de cajas para viento con flujo descendente y proporción del vano*

*Nota:* elaboración propia usando el software SPSS.

### 5.3 Variable atenuación con fuente alta

Tabla 10 Prueba de normalidad para atenuación con fuente alta

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
atenuación con fuente alta	0,125	45	0,076	0,909	45	0,002

Nota 1: elaboración propia usando el software SPSS.

Nota 2: a= corrección de significación de Lilliefors

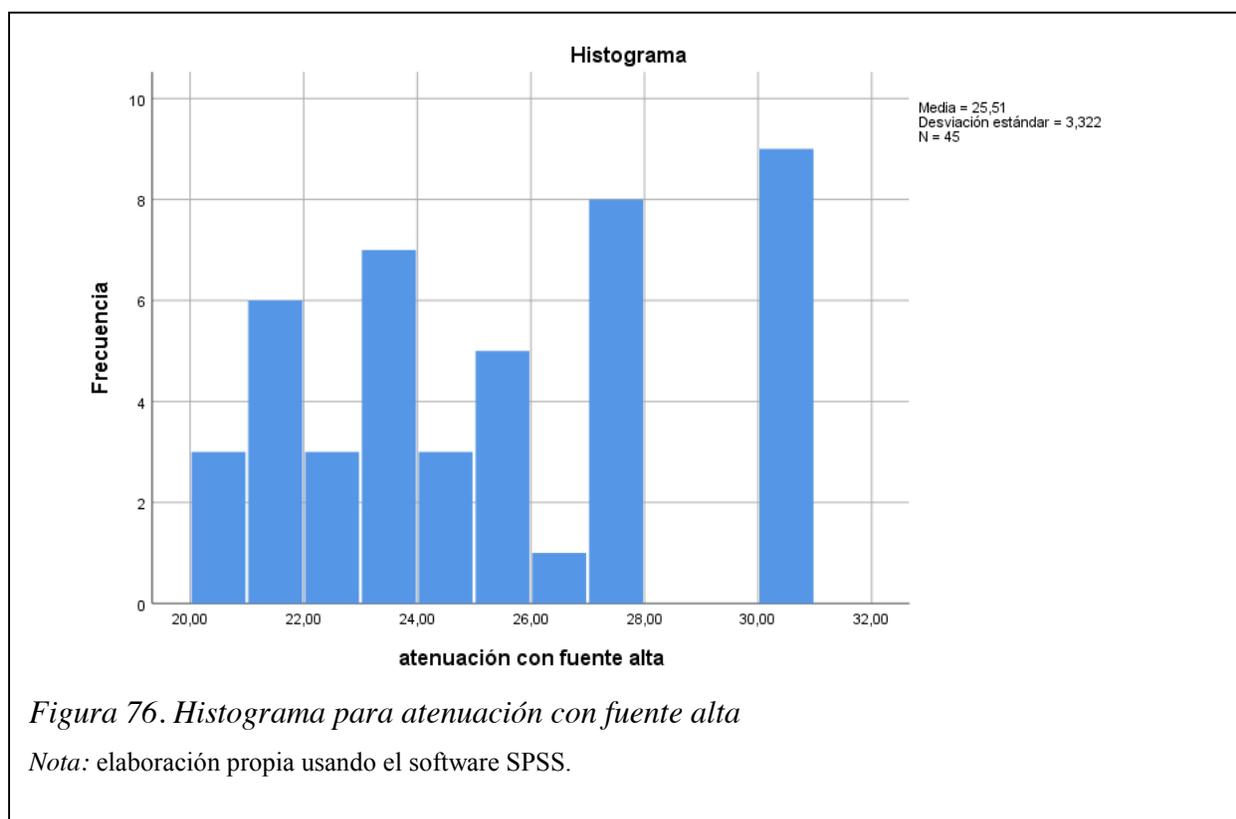


Figura 76. Histograma para atenuación con fuente alta

Nota: elaboración propia usando el software SPSS.

La atenuación con fuente alta, tiene un comportamiento normal, ya que su nivel de significancia es  $> 0,05$ .

### 5.3.1 Análisis de distribución de los datos según forma del aula con atenuación con fuente alta.

	FORMA AULA	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
atenuación con fuente alta	Cuadrada	0,153	15	,200*	0,917	15	0,17
	Rectangular ancha	0,16	15	,200*	0,895	15	0,08
	Rectangular profunda	0,167	15	,200*	0,895	15	0,08
* Esto es un límite inferior de la significación verdadera.							
a Corrección de significación de Lilliefors							

*Figura 77. Prueba de normalidad para atenuación fuente alta y forma del aula*

*Nota:* elaboración propia usando el software SPSS.

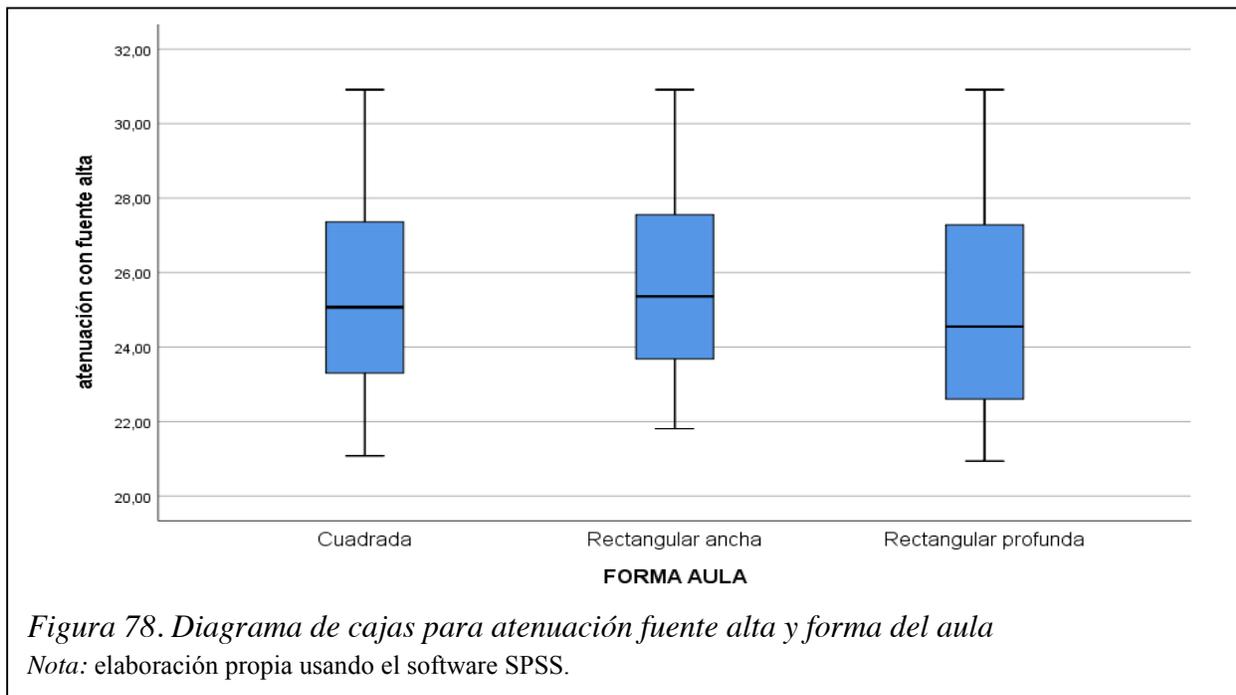
Todas las formas del aula tienen un comportamiento normal, se aplicó la Anova para saber si la atenuación es igual en todas diferentes formas de las aulas o al menos una de ellas es diferente. Su nivel de significancia es  $0,850 > \alpha 0,05$  (tabla 34), lo que indica que no tienen diferencias significativas en la forma del salón, con respecto a la atenuación con fuente alta

Las tres formas del aula tienen un comportamiento muy similar pero las mayores atenuaciones se logran con el aula “rectangular ancha” con promedio de 25,86 dBA. Por otro lado, el aula rectangular profunda es la que presenta mayores variaciones en la atenuación con un promedio de 25,16dBA y una desviación estandar de 3,59 dBA, esto se muestra en la ilustración de diagrama de cajas.

*Tabla 11. Prueba Anova para forma del aula con atenuación fuente alta*

ANOVA					
atenuación con fuente alta					
	Suma de		Media		
	cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3,732	2	1,866	0,163	0,850
Dentro de grupos	481,918	42	11,474		
<b>Total</b>	<b>485,650</b>	<b>44</b>			

*Nota:* elaboración propia usando el software SPSS.



**5.3.2 Análisis de distribución de los datos según proporción del vano con atenuación fuente alta.**

Pruebas de normalidad							
PROPORCION VENTANA		Kolmogorov-Smimov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
atenuación con fuente alta	1:2	0,144	15	,200 <sup>*</sup>	0,922	15	0,208
	1:3	0,140	15	,200 <sup>*</sup>	0,914	15	0,158
	2:3	0,138	15	,200 <sup>*</sup>	0,925	15	0,226

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.  
 a. Corrección de significación de Lilliefors

**Figura 79. Prueba de normalidad para atenuación fuente alta y proporción vano**  
 Nota: elaboración propia usando el software SPSS

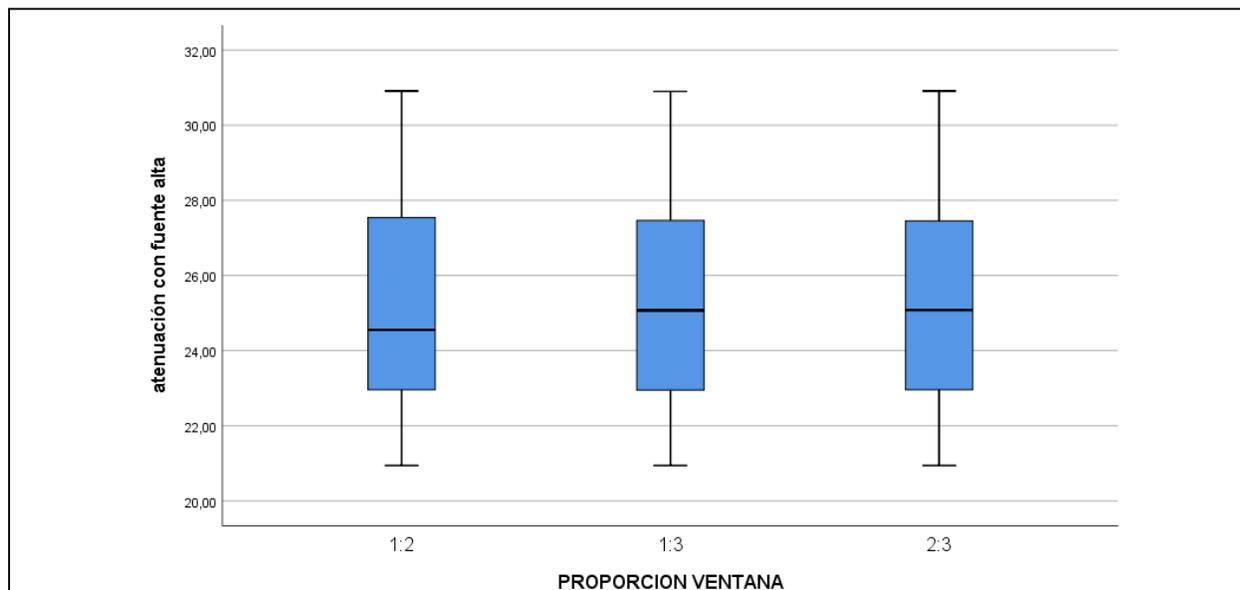
Los datos tienen un comportamiento normal. Se aplicó la prueba Anova para saber si todas las proporciones tienen atenuaciones iguales o si al menos algunas de ellas son diferentes. La significancia es  $0,994 > \alpha 0,05$ . Por lo tanto, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de atenuación según cambie la proporción del vano.

Las tres proporciones presentan un comportamiento muy similar, sin embargo, se puede decir que las mayores atenuaciones se encuentran en la proporción 1:3, con un promedio de atenuación de 25,59 Dba, y presentan la variación más alta con una desviación estándar de 3,41 dBA, seguida de la proporción 2:3, con un promedio de atenuación de 25,51 dBA y una desviación estándar de 3,37dBA, esto puede apreciar en el diagrama de cajas.

*Tabla 12. Prueba Anova para atenuación fuente alta y proporción vano*

ANOVA					
atenuación con fuente alta					
	Suma de		Media		
	cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
<b>Entre grupos</b>	0,128	2	0,064	0,006	0,994
<b>Dentro de grupos</b>	485,522	42	11,560		
<b>Total</b>	485,650	44			

*Nota:* elaboración propia usando el software SPSS



*Figura 80. Diagrama de cajas de fuente alta y proporción del vano*

*Nota:* elaboración propia usando el software SPSS

**5.4 Variable atenuación con fuente baja**

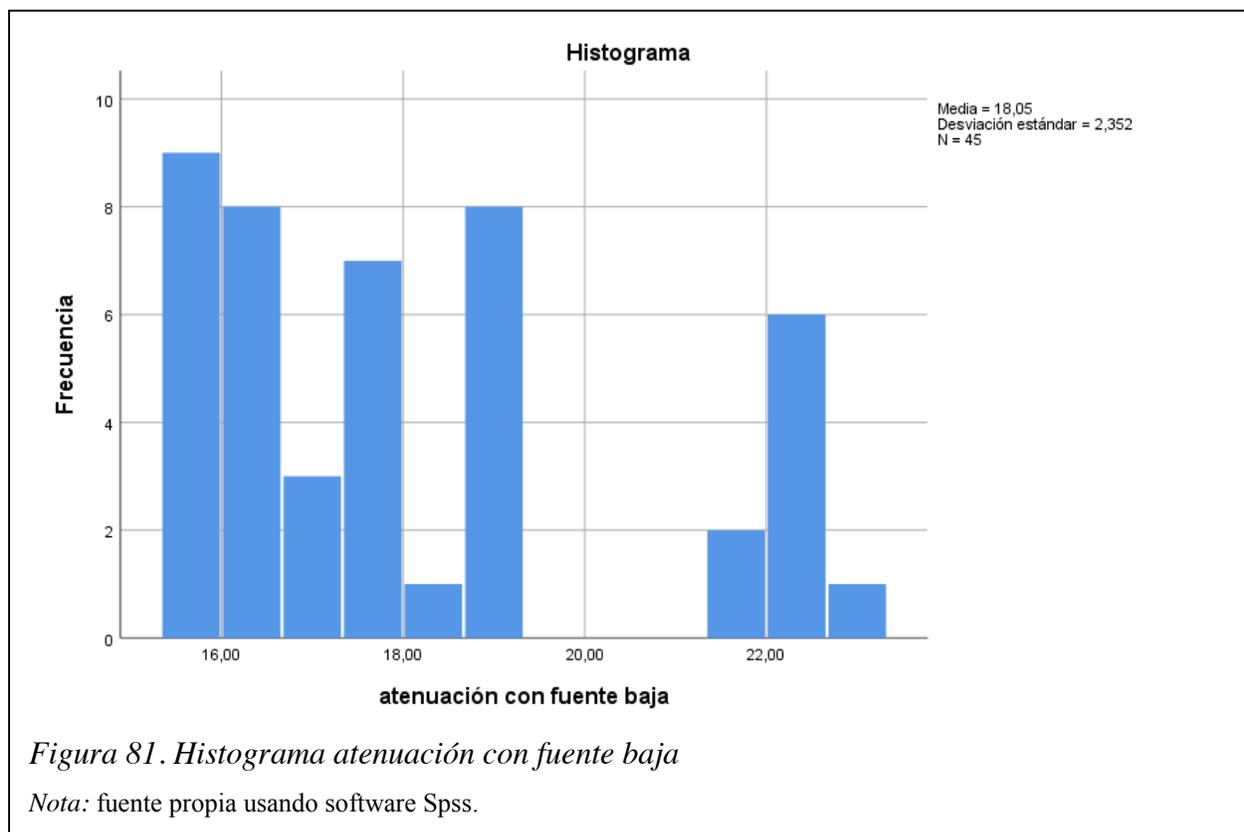
*Tabla 13 Prueba de normalidad para atenuación con fuente baja*

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Atenuación con fuente baja	0,211	45	0,000	0,849	45	0,000

Nota 1: elaboración propia usando el software SPSS.

Nota 2: a= corrección de significación de Lilliefors

La significancia es  $0,00 < \alpha < 0,05$  es decir, no tiene un comportamiento normal la distribución de los datos.



**5.4.1 Análisis de distribución de los datos según forma del aula con atenuación con fuente baja.**

Pruebas de normalidad							
		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
FORMA AULA		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
atenuación con fuente baja	Cuadrada	0,196	15	0,124	0,845	15	0,015
	Rectangular ancha	0,212	15	0,067	0,855	15	0,021
	Rectangular profunda	0,220	15	0,049	0,840	15	0,013
a. Corrección de significación de Lilliefors							

*Figura 82. Prueba de normalidad de atenuación con fuente baja y forma del aula*

*Nota:* fuente propia usando software Spss.

Como el aula rectangular profunda, muestra una distribución no normal, se adoptan para los análisis de los 3 casos, pruebas no paramétricas. A continuación se hace la prueba Kruskal-Wallis para saber si todas las aulas de atenuación con fuente baja, son las mismas o saber, si al menos, una de ellas se comporta diferente. La significancia es de  $0,97 > 0,05$ , lo que significa que la atenuación con fuente baja es estadísticamente igual para las tres formas de las aulas.

Las tres formas de aula tienen un comportamiento muy similar, pero se puede decir que las mayores atenuaciones están en aula rectangular ancha, con promedios de 25,86 dBA y con una desviación estándar de 3,26 dBA. Por otro lado, el aula que presenta mayor variación en sus atenuaciones es el aula rectangular profunda con una desviación estándar de 3,59 dBA, esto se puede apreciar en el diagrama de cajas.

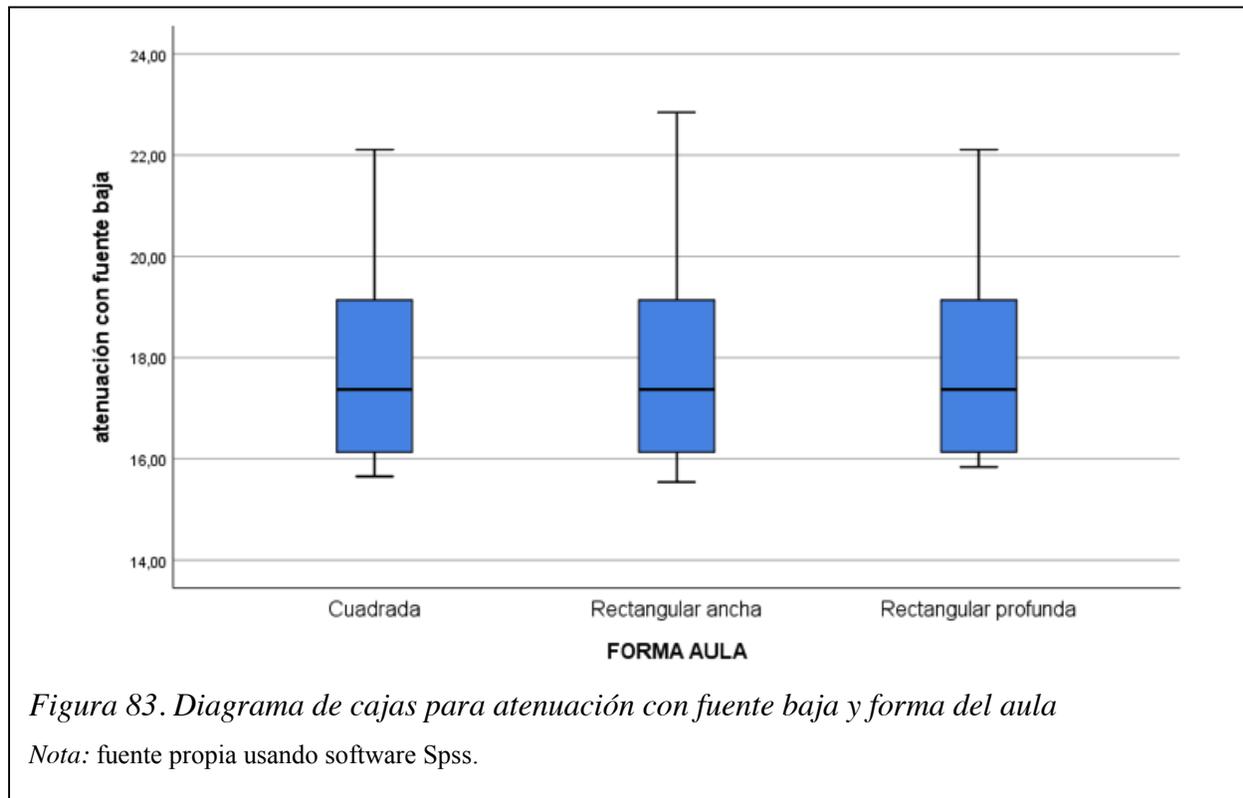
*Tabla 14. Prueba de Kruskal-Wallis para forma del aula y atenuación con fuente baja*

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup>	
atenuación con fuente baja	
H de Kruskal-Wallis	0,061
gl	2
Sig. asintótica	0,970

*Nota 1:* elaboración propia usando el software SPSS.

*Nota 2:* a= prueba de Kruskal Wallis

*Nota 3:* b= Variable de agrupación: forma aula



**5.4.2 Análisis de distribución de los datos según proporción de la vano con atenuación fuente baja.**

Pruebas de normalidad							
PROPORCION VENTANA	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>				Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
atenuación con fuente baja	1:2	0,207	15	0,084	0,860	15	0,024
	1:3	0,216	15	0,058	0,841	15	0,013
	2:3	0,208	15	0,081	0,860	15	0,024
a. Corrección de significación de Lilliefors							

*Figura 84. Prueba de normalidad para proporción del vano y atenuación con fuente baja*  
 Nota: fuente propia usando software Spss.

Los datos tienen un comportamiento normal ya que la significancia en las 3 proporciones es  $0,97 > \alpha 0,05$ . Se aplica la prueba Anova para saber si las atenuaciones con fuente baja son iguales para las 3 proporciones, o al menos una de ellas tiene diferencias en la atenuación con fuente baja. El nivel de significancia es de  $0,996 > 0,05$  (ver tabla siguiente), lo que significa que

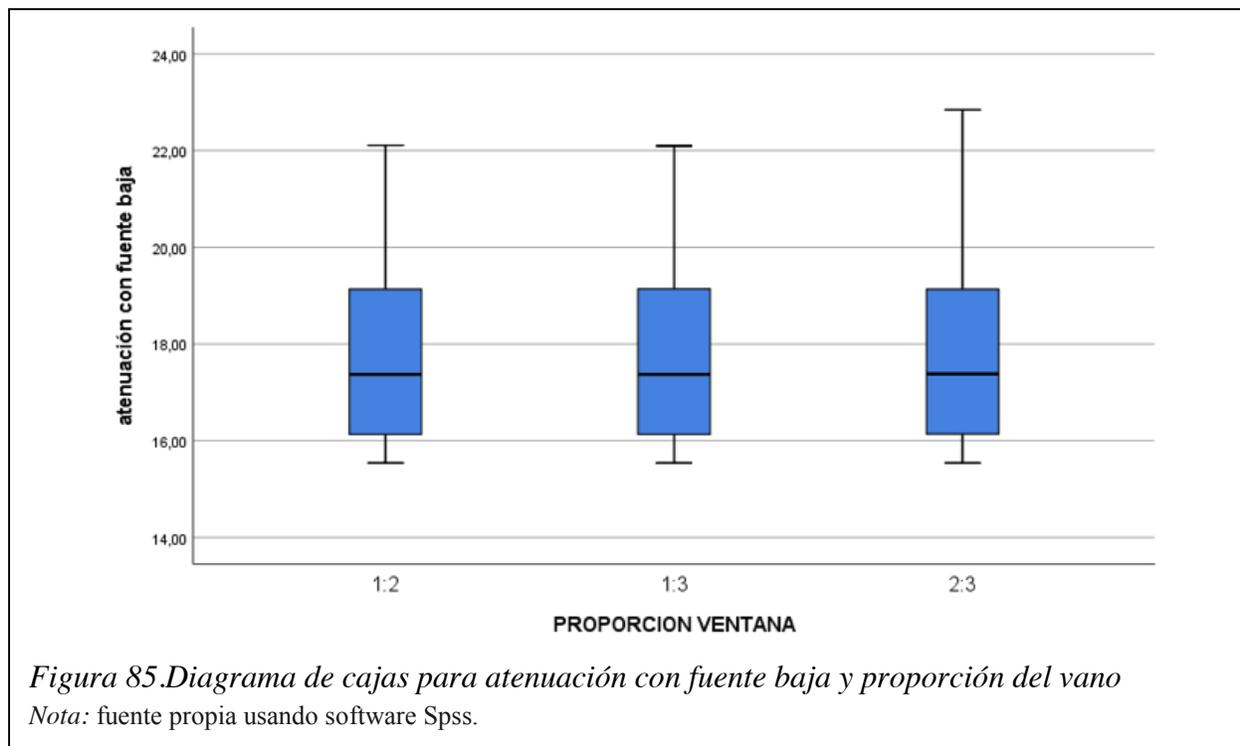
los niveles de atenuación con fuente baja no tienen diferencias estadísticamente significativas en las 3 proporciones.

Las tres proporciones de vano tienen un comportamiento muy similar, pero se puede decir que las mayores atenuaciones están en las proporciones de 1:3 y 2:3, con promedios de 18,08 dBA y 18,05 dBA respectivamente, y con una desviación estándar de 2,42 dBA para 1:3 y de 2,47 dBA para 2:3.

Tabla 15. Prueba Anova para proporción del vano y atenuación con fuente baja

ANOVA					
atenuación con fuente baja					
	Suma de	gl	Media	F	Sig.
	cuadrados		cuadrática		
Entre grupos	0,053	2	0,026	0,005	0,995
Dentro de grupos	243,452	42	5,796		
Total	243,504	44			

Nota: fuente propia usando software Spss.



Después de haber elaborado estas pruebas estadísticas se puede concluir con una certeza del 95% lo siguiente: la forma del aula en cuanto al área ventilada tanto en flujo de aire descendente como ascendente no tienen relación, es decir no influye que sea cuadrada o rectangular con respecto al área ventilada dentro del aula. Las proporciones de los vanos (1:2, 1:3, 2:3) tienen relación con el área ventilada dentro del aula cuando el flujo del aire es ascendente; y la proporción que genera mayor área ventilada es la 2:3, seguida por la proporción de 1:2. No se tiene relación entre la forma del aula y el nivel de atenuación de la misma, y no hay relación entre las diferentes proporciones del vano (1:2, 1:3, 2:3) y los niveles de atenuación.

**5.5 Análisis de correlaciones entre las variables**

Buscando responder los objetivos de esta investigación fueron realizados los siguientes análisis de relación entre variables:

- Atenuación versus área ventilada,
- Porcentaje de abertura vs. el área ventilada,
- Porcentaje de abertura vs. atenuación.

Todos estos análisis se aplicaron a 3 tipos de aulas y a los diferentes porcentajes de abertura del vano. Se confrontan con los parámetros técnicos definidos dentro de la metodología, para poder clasificarlos.

PARAMETROS TÉCNICOS			
	Optimo	Aceptable	Deficiente
% Área ventilada con $V_i$ entre $(0,31 \text{ m/s} - 0,45)$	80%	60-70%	<60%
Atenuación	25dBA	19-24 dBA	19dBA

*Figura 86. Parámetros técnicos*

### **5.5.1. Atenuación vs sentido del flujo.**

#### ***5.5.1.1 Aula cuadrada 1:2; 1:3; 2:3.***

Se hace el análisis de normalidad para poder saber cuál prueba de correlación se podía aplicar. Como el nivel de significación es mayor de 0,05, en todas las variables donde esto ocurra se aplicó el coeficiente de Pearson, y tan solo el área ventilada ascendente 2:3, tiene un comportamiento no normal, a esta se le aplicará coeficiente de Spearman en todas sus relaciones con las demás variables.

En este cruce de variables podemos decir que la correlación entre viento ascendente, la atenuación alta y la atenuación baja, es entre muy fuerte y moderada, con un coeficiente de determinación igualmente alto y moderado, con niveles de significancia menor a 0,05. Por lo tanto, la ecuación lineal es estadísticamente válida para predecir el comportamiento del flujo con respecto a la atenuación, siendo una relación inversa a mayor área ventilada menor atenuación.

Por otra parte, comparando los resultados del aula cuadrada con respecto a los parámetros técnicos se puede decir que el mejor comportamiento en atenuación y ventilación con flujo ascendente lo registra la proporción de 2:3. Esta proporción con 80% de abertura genera una atenuación con fuente alta de 23,30 dBA (aceptable), y con fuente baja de 16,14 dBA (deficiente) y un área ventilada de 29,15 m<sup>2</sup> que corresponde a un 44,17% (deficiente) del área del aula. Si se quiere cumplir con la atenuación, tanto en fuente baja como alta, la proporción que cumple con ello es la de 2:3 con 40% de abertura, obteniendo 26,67 m<sup>2</sup> de área ventilada, que corresponde a un 40,44% (deficiente) del área total del aula y una atenuación con fuente alta de 27,36 dBA (óptima), y una atenuación con fuente baja de 19,13 dBA (aceptable).

En cuanto al flujo de aire descendente, se puede decir que la mejor proporción en el aula cuadrada es la de 2:3 con abertura de 80%, logrando una atenuación con fuente alta de 23,30 dBA (aceptable) y con fuente baja una atenuación de 16,14 dBA (deficiente); y un área ventilada de 23,72 m<sup>2</sup>, que corresponden al 35,30% del área total del aula (deficiente). Para lograr que se cumplan los parámetros técnicos, tanto en fuente baja como en la alta, la proporción que lo logra es la de 2:3, con 40% de abertura del vano, dando atenuación en fuente alta de 27,36 dBA (óptima) y con fuente baja de 19,13 dBA (aceptable) y una área ventilada de 16,15 m<sup>2</sup>, que corresponde a 24,47% de área del aula (deficiente).

Se puede afirmar que en el aula cuadrada, con ventana de proporción 2:3 y con un 40% de abertura, logra una atenuación con fuente alta óptima y con fuente baja aceptable; el área ventilada con flujo ascendente y descendente es deficiente.

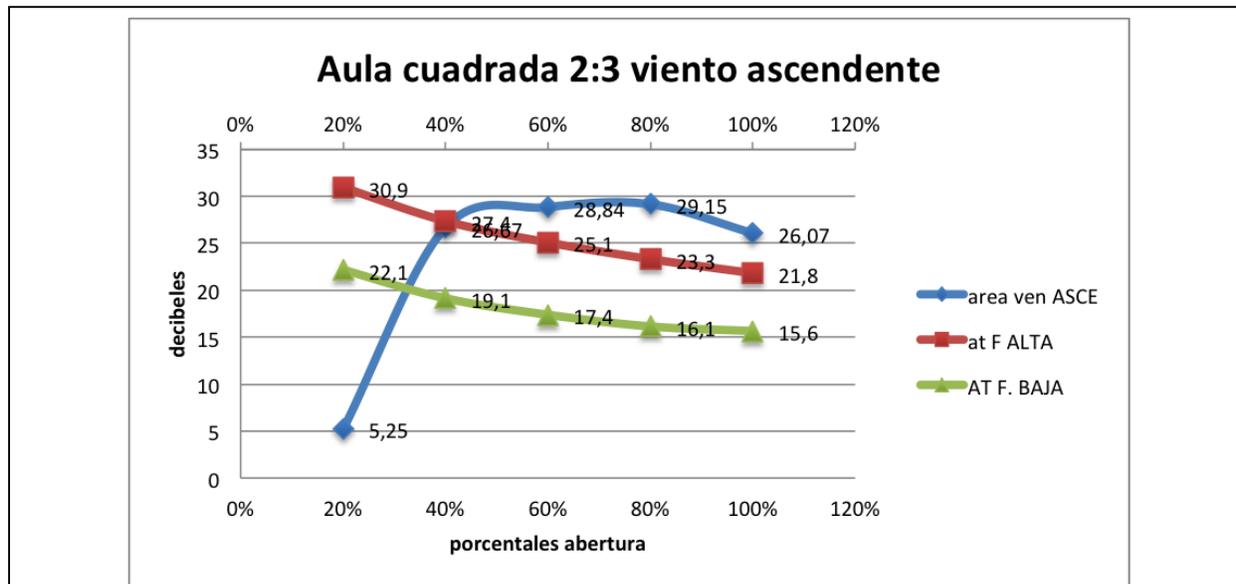


Figura 87. Aula cuadrada con proporción de vano 2:3, viento ascendente vs atenuaciones alta y baja

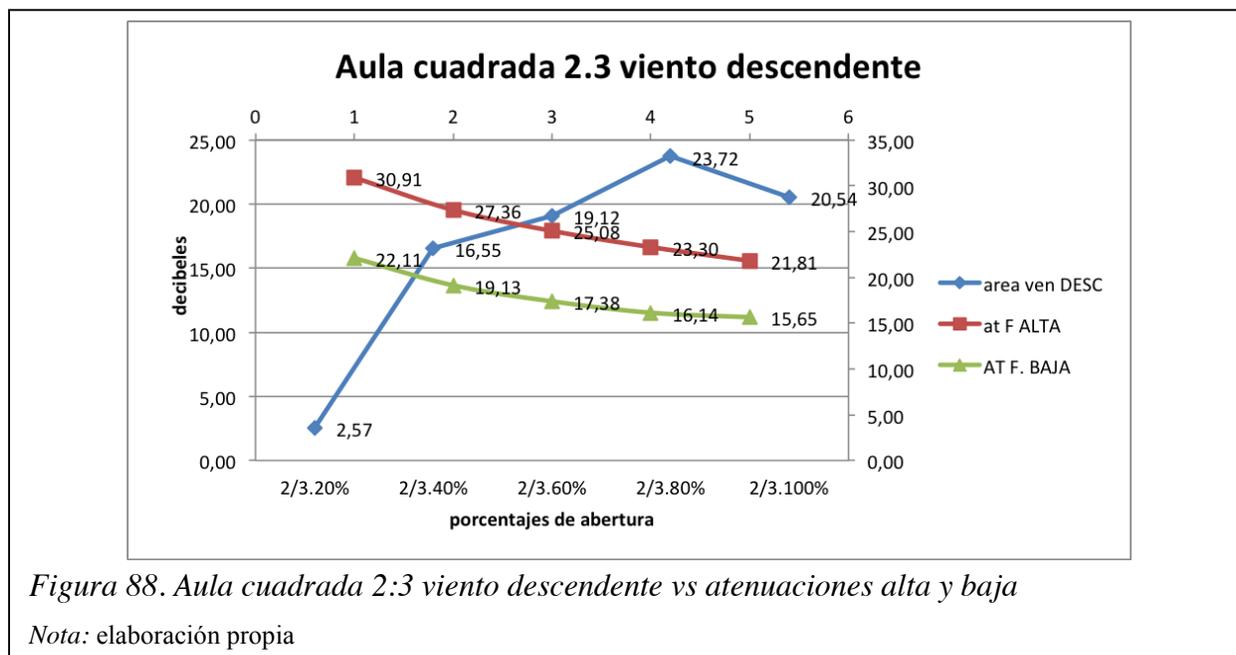


Figura 88. Aula cuadrada 2:3 viento descendente vs atenuaciones alta y baja

Nota: elaboración propia

### ***5.5.1.2 Aula rectangular ancha.***

En este cruce de variables se puede afirmar con un nivel de confianza del 95%, que para esta aula, las únicas variables que tienen relación son: área ventilada con flujo descendente con fuente baja y alta con un nivel de correlación fuerte, estadísticamente significativo. Las demás correlaciones son moderadas y débiles no siendo estadísticamente significativas. La significancia baja con correlaciones fuertes en estos casos, se puede deber al poco número de muestras, ya que al hacer las correlaciones usando los 45 datos sin discriminar por proporción y la forma del aula, las pruebas tienen resultados estadísticamente significativos con correlaciones entre moderadas y fuertes.

Por otra parte, comparando los resultados de esta aula, el mejor comportamiento en ventilación ascendente inclusive por encima del 100% de abertura del vano, es la proporción de 2:3 con abertura de 60%, con un área ventilada de 22,42 m<sup>2</sup>, que equivale al 33,97% del área del aula (deficiente), y con una atenuación con fuente alta de 25,37 dBA (óptima), y en fuente baja de 17,38 dBA (deficiente). La proporción que cumple con los parámetros técnicos en atenuación de fuente alta y baja es la de 2/3 con abertura de 40%, logrando un área ventilación de 21,36 m<sup>2</sup>, que corresponde al 32,36% del área del aula (deficiente), y una atenuación en fuente alta de 27,55 dBA (óptima) y una atenuación en fuente baja de 19,13 dBA (aceptable).

En el caso de ventilación con flujo descendente, la mejor proporción de 2:3, con 60% de abertura, teniendo área ventilada de 18,84 m<sup>2</sup>, que equivale al 28,54% del área ventilada del aula (deficiente), en cuanto atenuación se logra tener, con fuente alta, 25,37 dBA (óptima) y con fuente baja 17,38 dBA (deficiente). La proporción que alcanzan a tener ambas atenuaciones bien calificadas es la proporción de 2/3 con 40% de abertura de vano, obteniendo un área ventilada de 15,37 m<sup>2</sup>, que corresponden a 23,28% del área del aula (deficiente), y atenuaciones con fuente alta y baja de 27,55 dBA y 19,13 dBA, respectivamente.

Se puede afirmar que el aula rectangular ancha, con ventana de proporción 2:3 y con un 40% de abertura, logra una atenuación con fuente alta óptima y con fuente baja aceptable.

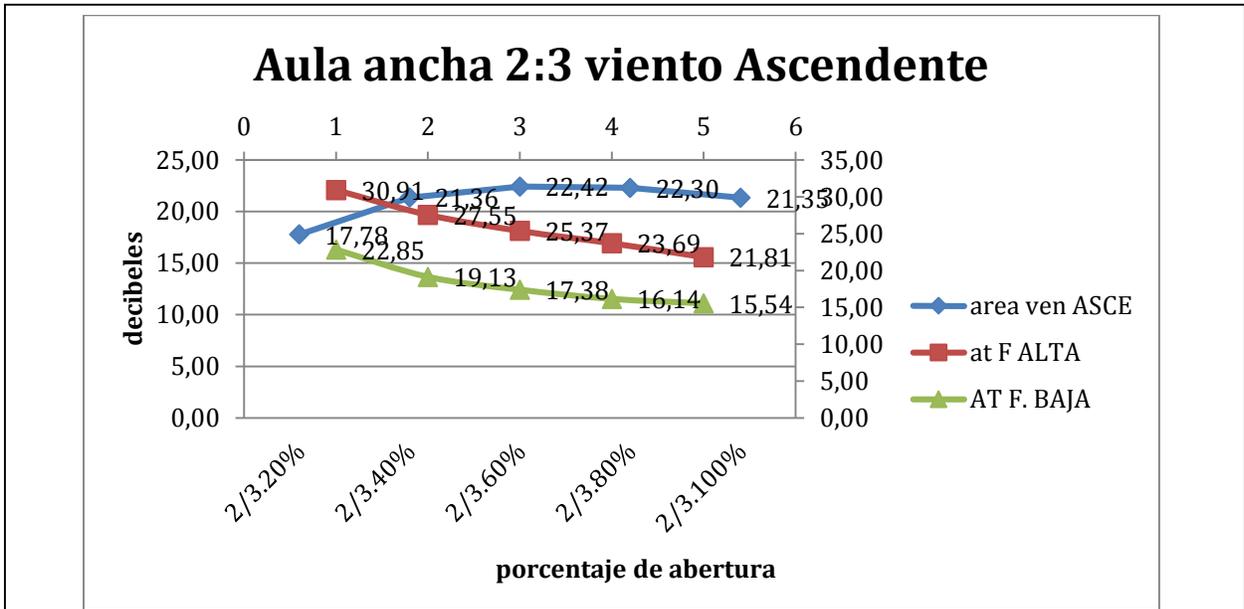


Figura 90. Aula ancha 2:3 viento ascendente vs atenuaciones alta y baja

Nota: elaboración propia

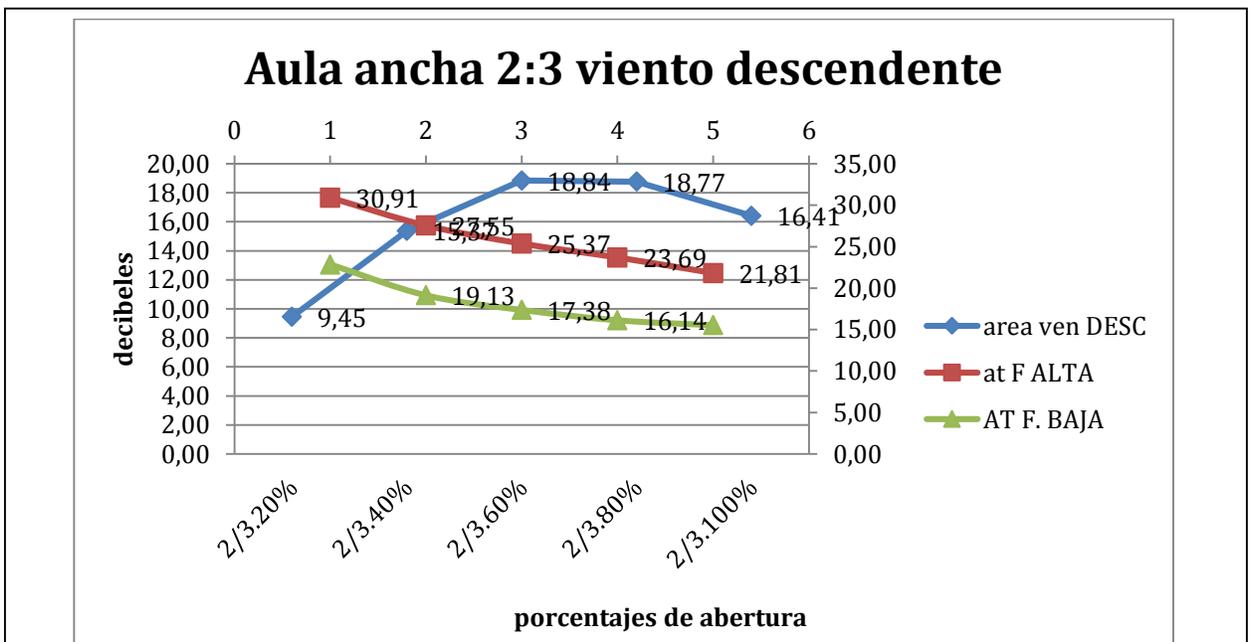


Figura 89. Aula ancha 2:3 viento descendente vs atenuaciones alta y baja

Nota: elaboración propia

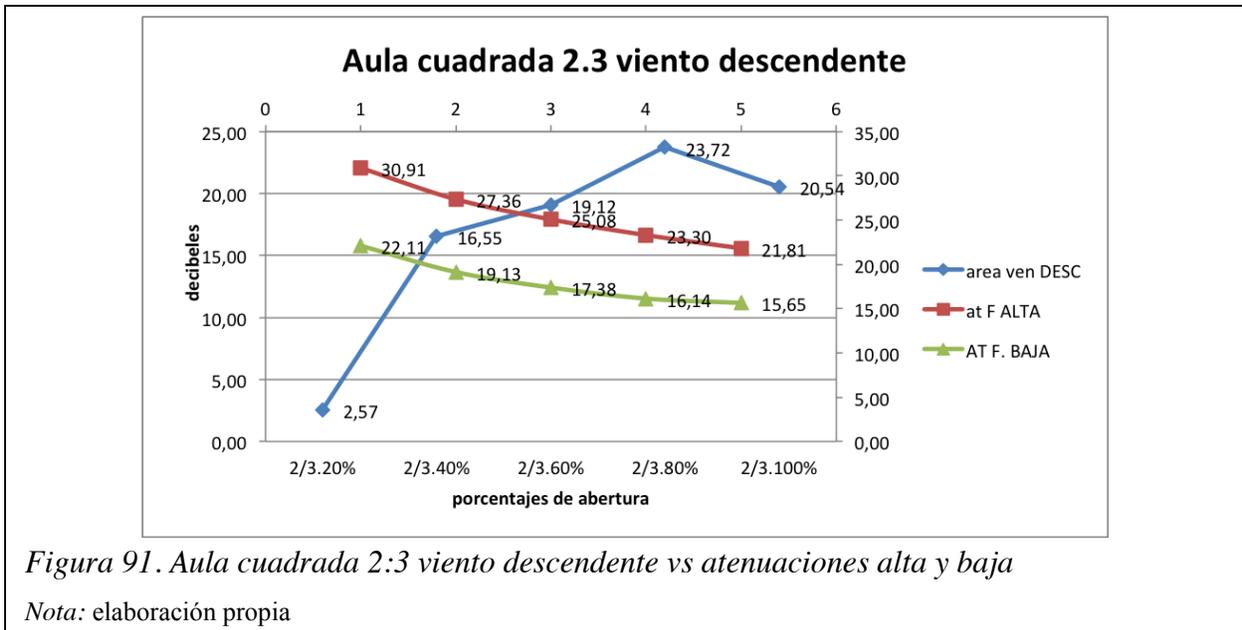
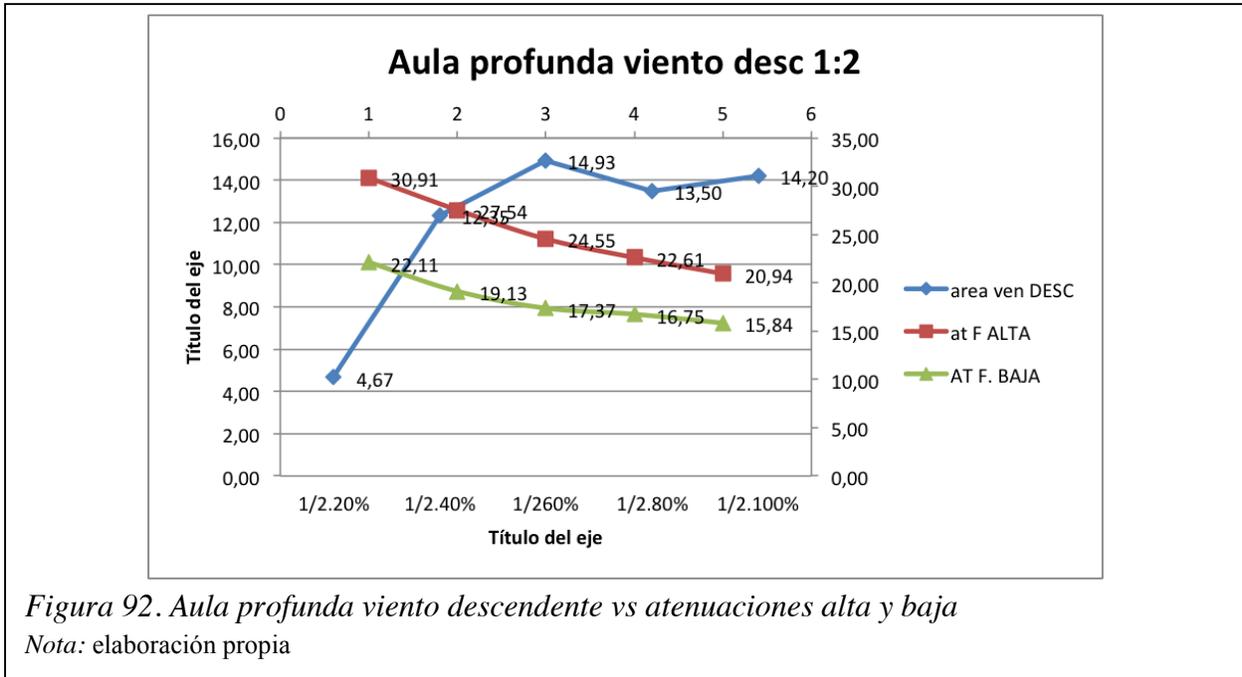
### ***57.5.1.3 Aula rectangular profunda.***

1:2; 1:3; 2:3 Se hace el análisis de normalidad para saber cuál prueba de correlación poder aplicar. En este cruce de variables se puede afirmar que para esta aula, las únicas variables que no tienen relación son: el área ventilada con flujo descendente con fuente baja y alta tienen un nivel de correlación débil, en las demás variables, sus niveles de correlación son muy fuertes y moderados con un nivel de significancia estadístico del 95%.

Por otra parte, comparando los resultados del aula rectangular profunda, el mejor comportamiento en ventilación ascendente, inclusive por encima del 100% de abertura del vano, es la proporción de 1:2 con abertura de 80%, con un área ventilada de 33,08 m<sup>2</sup>, que equivale al 50,12% del área del aula (deficiente), y con una atenuación con fuente alta de 22,61 dBA (aceptable) y en fuente baja de 16,75 dBA (deficiente). La proporción que cumple con los parámetros técnicos en atenuación de fuente alta y baja es la de 1:2, con una abertura de 40%, logrando un área de ventilación de 20,58 m<sup>2</sup>, que corresponde al 31,18% del área del aula (deficiente), y una atenuación en fuente alta de 27,54 dBA (óptima) y una atenuación en fuente baja de 19,13dBA (aceptable).

En el caso de ventilación con flujo descendente, la mejor proporción es ventana de 2:3 con 80% de abertura, teniendo área ventilada de 17,24 M2 que equivale al 28,73% del área ventilada del aula (deficiente), superior inclusive la abertura al 100%, en cuanto atenuación se logra tener con fuente alta 22,61dBA(aceptable) y con fuente baja 16, 14 dBA (deficiente), la proporción que alcanza a tener ambas atenuaciones bien calificadas es la proporción de 1/2 con 40% de abertura de vano; obteniendo un área ventilada de 12,35M2 que corresponde al 18,71% del área del aula (deficiente), y atenuaciones con fuente alta y baja de 27,54dBA (óptima) y 19,13dBA (aceptable) respectivamente.

Con lo cual se puede afirmar que en esta aula con ventana de proporción 1:2 y con un 40% de abertura, se logra una atenuación con fuente alta óptima y con fuente baja aceptable; con el área ventilada con flujo ascendente y descendente es deficiente y que con la proporción 1:2 con 80% de abertura se logra la mayor área ventilada del estudio mediante una atenuación aceptable solo con fuente alta.



AULA CUADRADA	ÁREA VENTILADA FLUJO ASC			ATENUACIÓN ALTA			ATENUACIÓN BAJA		
PROPORCIÓN	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 80%			44,17%		23,30dBA				16,14dBA
2/3 ABERTURA 0%			40,44%	27,36dBA				19,13dBA	

AULA CUADRADA	ÁREA VENTILADA FLUJO DESC			ATENUACIÓN ALTA			ATENUACIÓN BAJA		
PROPORCIÓN	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 80%			35,30%		23,30dBA				16,14dBA
2/3 ABERTURA 0%			24,47%	27,36dBA				19,13dBA	

AULA LANCHA	ÁREA VENTILADA FLUJO ASC			ATENUACIÓN ALTA			ATENUACIÓN BAJA		
PROPORCIÓN	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 60%			33,97%	25,37%					17,38dBA
2/3 ABERTURA 0%			32,36%	27,55				19,13dBA	

AULA LANCHA	ÁREA VENTILADA FLUJO DESC			ATENUACIÓN ALTA			ATENUACIÓN BAJA		
PROPORCIÓN	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 60%			28,54%	25,37dBA					17,38dBA
2/3 ABERTURA 0%			23,28%	27,55dBA				19,13dBA	

AULA PROFUNDA	ÁREA VENTILADA FLUJO ASC			ATENUACIÓN ALTA			ATENUACIÓN BAJA		
PROPORCIÓN	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
1/2 ABERTURA 80%			50,12%		22,61dBA				16,75dBA
1/2 ABERTURA 0%			31,18%	27,54dBA				19,13dBA	

AULA PROFUNDA	ÁREA VENTILADA FLUJO DESC			ATENUACIÓN ALTA			ATENUACIÓN BAJA		
PROPORCIÓN	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 80%			28,73%		22,61dBA				16,14dBA
1/2 ABERTURA 0%			18,71%	27,54dBA				19,13dBA	

*Figura 93. Resumen mejores áreas ventiladas y atenuaciones acústicas*  
 Nota: elaboración propia

### 5.5.2 Tamaño vs sentido del flujo.

En el cruce de estas dos variables, el tamaño de la abertura del vano versus el sentido del flujo, la correlación de las mismas en los tres tipos de aula y con los tres tipos de proporción del vano, son entre muy fuerte, fuerte y moderado, pues permiten establecer una ecuación lineal que puede predecir el comportamiento del área ventilada, con respecto al tamaño de la abertura del vano.

#### 5.5.2.1 Aula cuadrada.

En esta aula con vano de proporción 2:3(3,67\*1,50), el tamaño de abertura que mayor área ventilada ofrece, en flujo ascendente y descendente, es el vano abierto al 80% de su capacidad. Este tamaño de abertura tiene mayor área ventilada, inclusive que el vano al 100%, suministrando un área ventilada en flujo ascendente de 29,15 m<sup>2</sup> y en flujo descendente de 23,72 m<sup>2</sup>, que son deficientes si se comparan con los parámetros técnicos establecidos, ya que el área ventilada aceptable está entre un 60% y 70% del área total, que en este caso sería entre 39,6 m<sup>2</sup> y 45,29 m<sup>2</sup>.

Ya que las correlaciones de las variables tamaño de la abertura y el área ventilada, son estadísticamente fiables, se puede predecir el comportamiento esperado, tanto del tamaño del vano como el área esperada a ventilar. Se presentan los gráficos con las dos ecuaciones tanto para viento descendente como para viento ascendente

AULA CUADRADA	AREA VENTILADA FLUJO DESC			ATENUACION F.ALTA			ATENUACION F.BAJA		
	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 0%			35,30%		23,30dBA				16,14dBA
2/3 ABERTURA 100%			24,47%	27,36dBA				19,13dBA	

Figura 95. Resumen comportamiento aula cuadrada

Nota: elaboración propia

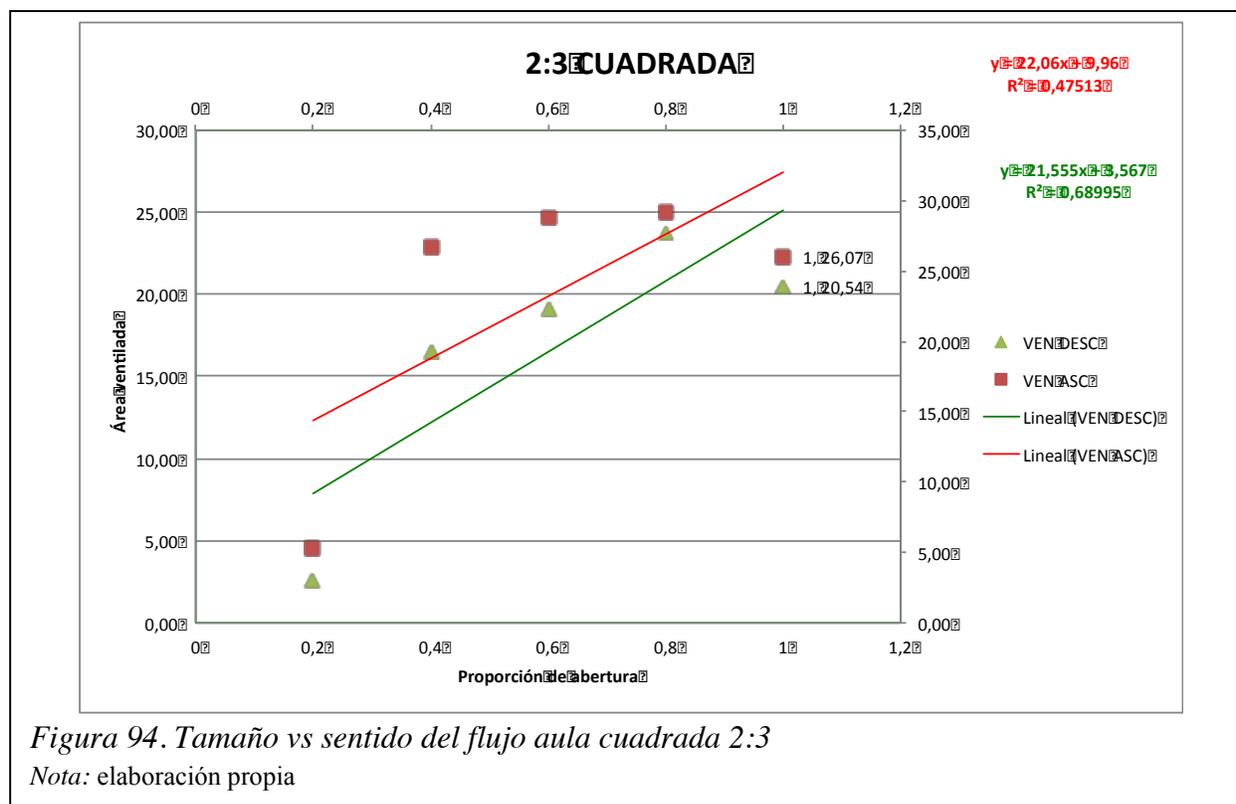


Figura 94. Tamaño vs sentido del flujo aula cuadrada 2:3

Nota: elaboración propia

### 5.5.2.2 Aula rectangular ancha.

En esta aula con vano de proporción 2:3(3,67\*1,50), el tamaño de abertura que mayor área ventilada proporciona en flujo ascendente y descendente es el vano abierto al 60% de su capacidad, este tamaño de abertura tiene mayor área ventilada, inclusive que el vano al 100% de abertura, suministrando un área ventilada en flujo ascendente de 22,42 m<sup>2</sup> y en flujo descendente de 18,84 m<sup>2</sup>, que son deficientes si se comparan con los parámetros técnicos establecidos, ya que el área

ventilada aceptable está entre un 60% y 70% del área del aula que, en este caso sería entre 39,6 y 45,29 m<sup>2</sup>.

Las correlaciones de las variables tamaño de la abertura y el área ventilada, son una correlación moderada, y frágil en el caso de flujo aire ascendente. Y no muestran una relación, pero

AULA RECTANGULAR ANCHA	ÁREA VENTILADA FLUJO ASC			ATENUACIÓN F. ALTA			ATENUACIÓN F. BAJA		
	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 60%			33,97%	25,37%					17,38dBA
2/3 ABERTURA 70%			32,36%	27,55				19,13dBA	

Figura 96. Resumen comportamiento aula rectangular ancha

Nota: elaboración propia

se aclara que por el bajo número de muestras arroja este error ya que si se hacen las pruebas con los 45 datos, sin discriminar forma de aula y proporción, se obtiene una significancia entre moderada y fuerte., con base en esto se puede predecir el comportamiento esperado, tanto del tamaño del vano como del área ventilada, en el caso de flujo descendente con una probabilidad de certeza del 71% y en caso de flujo del aire ascendente con una probabilidad de 30%. Se presentan los gráficos con las dos ecuaciones tanto para viento descendente como para viento ascendente.

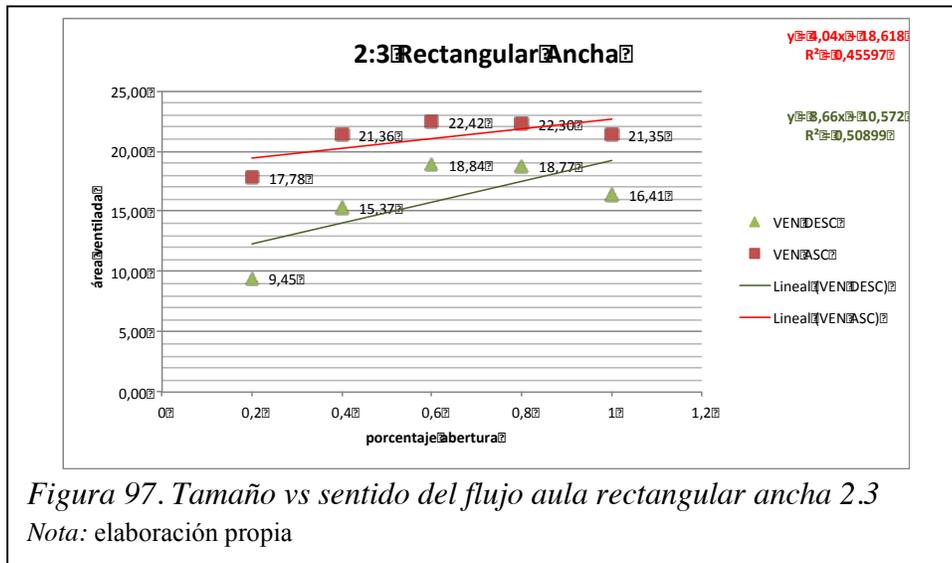


Figura 97. Tamaño vs sentido del flujo aula rectangular ancha 2.3

Nota: elaboración propia

**5.5.2.3 Aula rectangular profunda.**

En esta aula el vano de proporción 1:2(2,75\*2), con viento ascendente y abertura del 80%, proporciona, la mayor área ventilada de un orden de 33,08 m<sup>2</sup> y en flujo descendente la mejor proporción es la de 2:3 (3,67\*1,50), suministrando un área ventilada de 17,24 m<sup>2</sup>, ambas áreas son deficientes comparadas con los parámetros técnicos, ya que el área ventilada aceptable está entre un 60% y 70% del área del aula que en este caso sería entre 39,6 y 45,29 m<sup>2</sup>.

Las correlaciones de las variables tamaño de la abertura y el área ventilada, son estadísticamente fiables con una correlación entre fuerte y moderada, se puede predecir el comportamiento esperado, tanto del tamaño del vano como el área ventilada. Se presentan los gráficos con las dos ecuaciones, tanto para viento descendente como para viento ascendente, en cuanto la significancia es la misma explicación del caso anterior en cuanto al viento descendente proporción 1:2.

AULA RECTANGULAR PROFUNDA	ÁREA VENTILADA FLUJO DESC			ATENUACION F. ALTA			ATENUACION F. BAJA		
	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
2/3 ABERTURA 80%			28,73%		22,61dBA				16,14dBA
1/2 ABERTURA 80%			18,71%	27,54dBA				19,13dBA	

AULA RECTANGULAR PROFUNDA	ÁREA VENTILADA FLUJO ASC			ATENUACION F. ALTA			ATENUACION F. BAJA		
	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE	OPTIMO	ACPTABLE	DEFICIENTE
1/2 ABERTURA 80%			50,12%		22,61dBA				16,75dBA
1/2 ABERTURA 80%			31,18%	27,54dBA				19,13dBA	

Figura 98. Resumen comportamiento aula rectangular profunda

Nota: elaboración propia

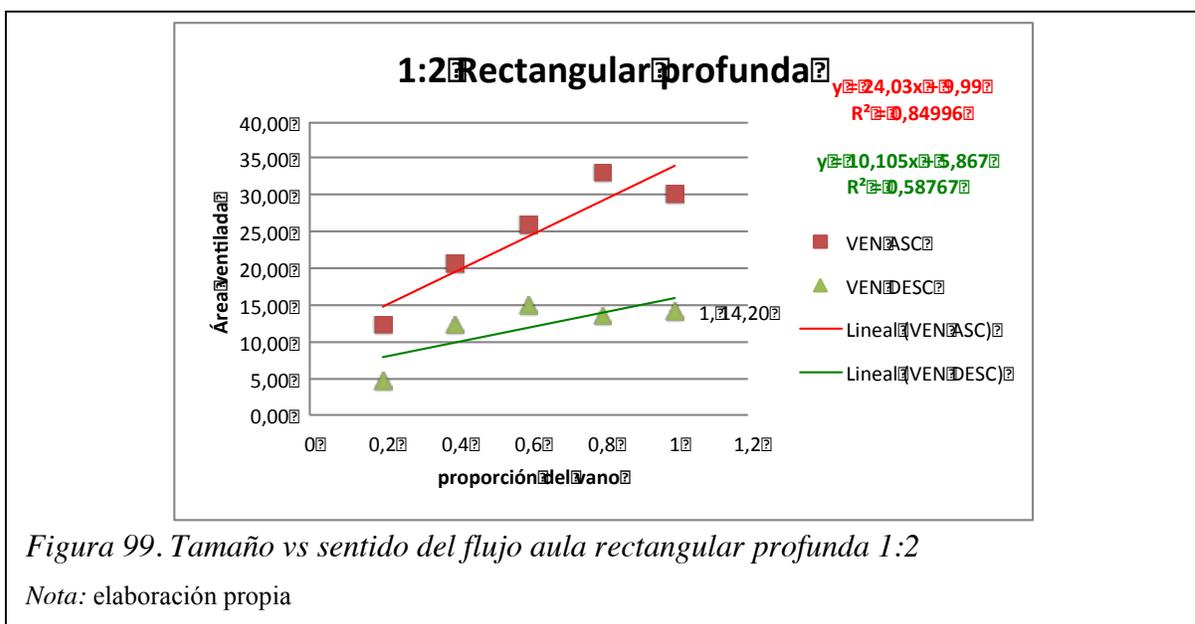


Figura 99. Tamaño vs sentido del flujo aula rectangular profunda 1:2

Nota: elaboración propia

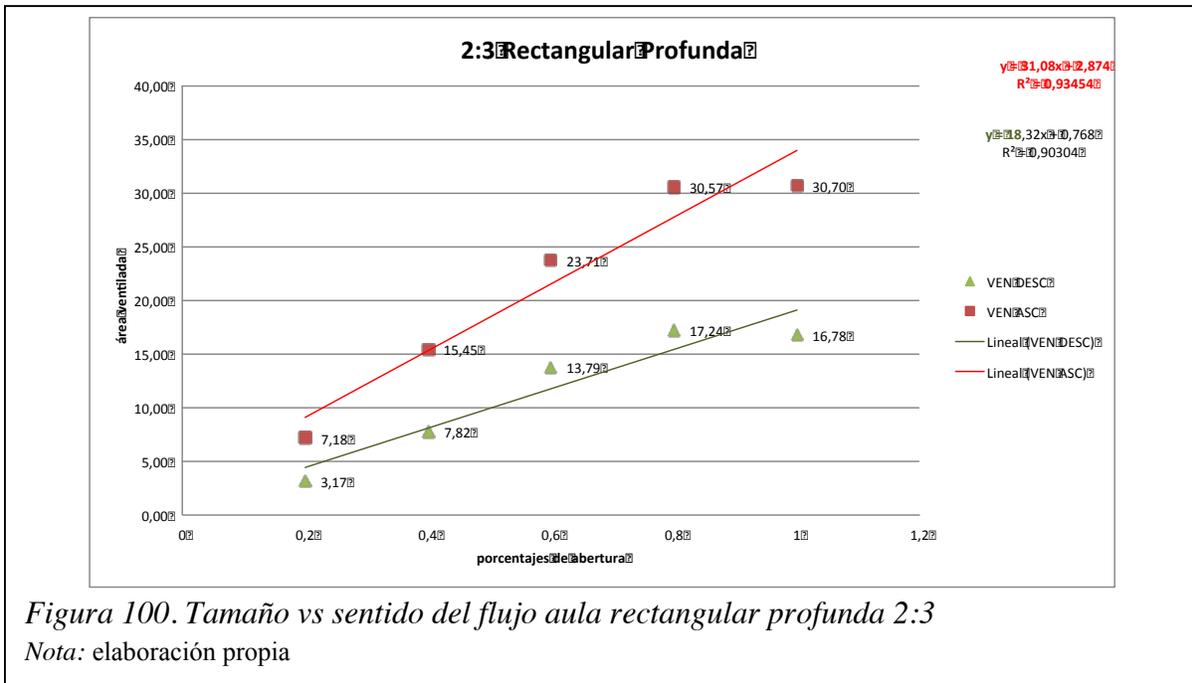


Figura 100. Tamaño vs sentido del flujo aula rectangular profunda 2:3

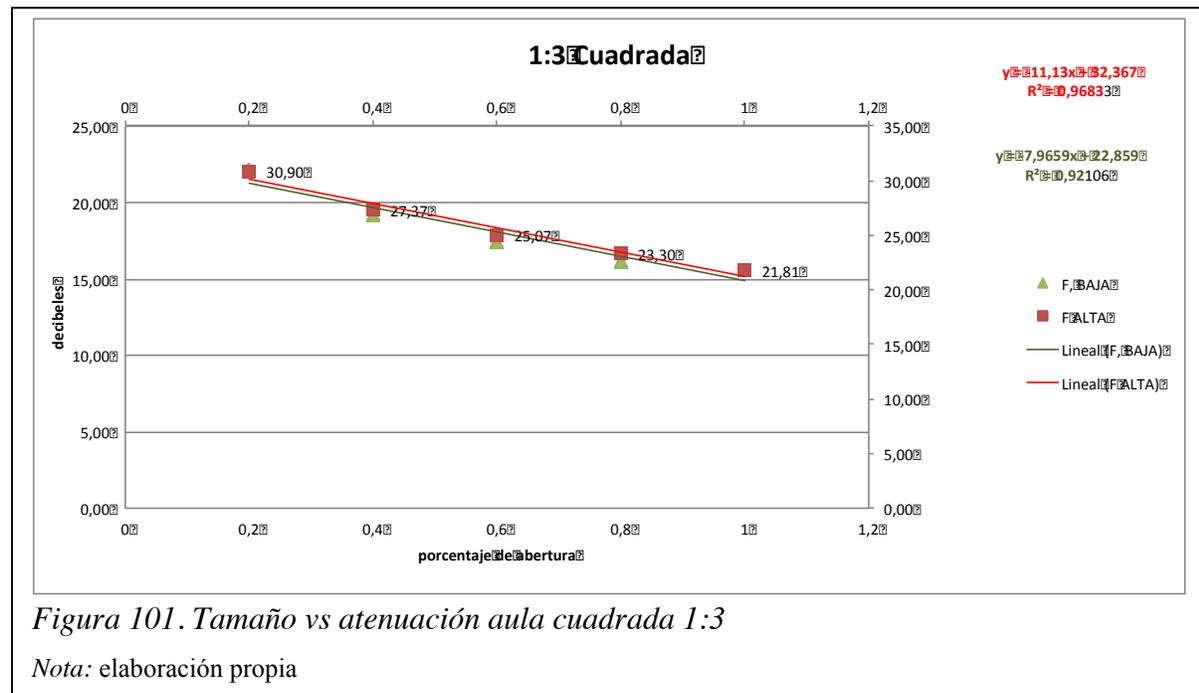
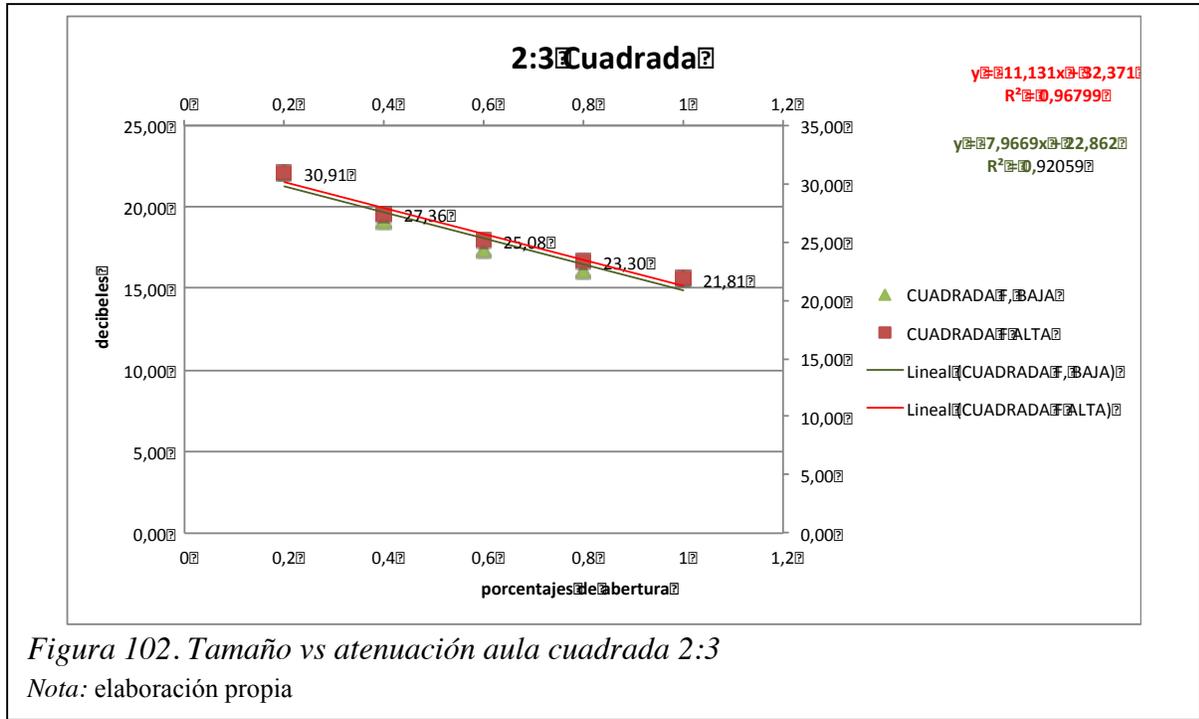
Nota: elaboración propia

### 5.5.3 Tamaño vs. atenuación.

En el cruce de estas dos variables, y en el tamaño de la abertura del vano vs. el sentido del flujo, la correlación de las variables en los tres tipos de aula y con los tres tipos de proporción del vano es muy fuerte, lo que permite establecer una ecuación lineal que puede predecir el comportamiento de la atenuación, con respecto al tamaño de la abertura del vano.

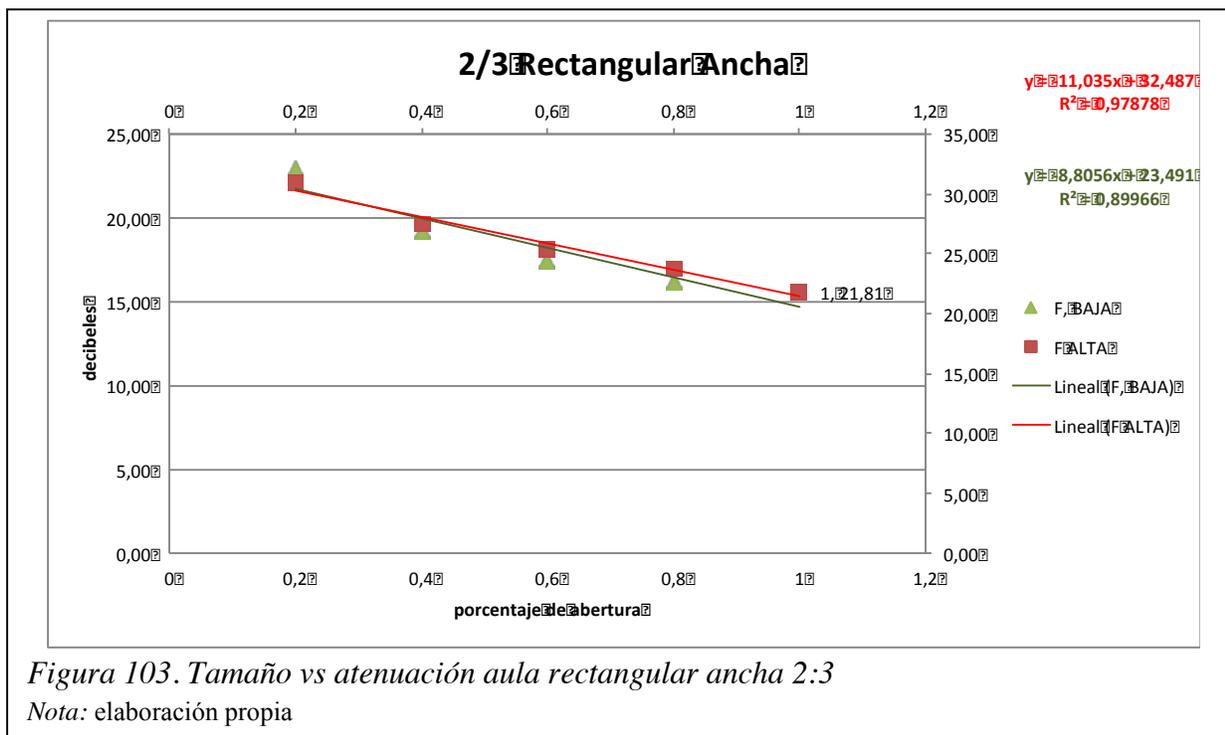
#### 5.5.3.1 Aula cuadrada.

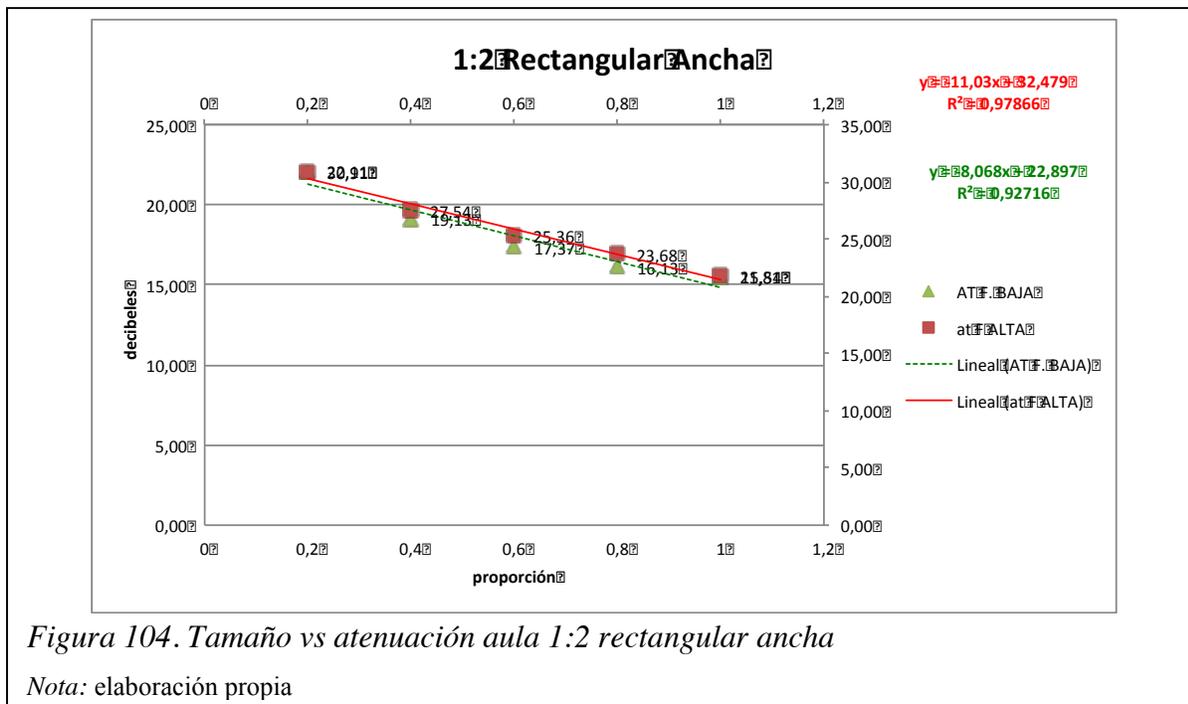
En esta aula, los vanos de proporciones 2:3 (3,67\*1,50) y 1:3 (3\*1,83), con abertura del 40%, logran una atenuación para fuente alta, que se clasifica según los parámetros técnicos como óptima, mayor de 25 dBA, y para fuente baja como aceptable con atenuaciones mayores de 19 dBA. Ya que las correlaciones de las variables por el tamaño de la abertura y atenuación, son estadísticamente fiables con una correlación muy fuerte, se puede predecir el comportamiento esperado, tanto del tamaño del vano como el de los decibelios de atenuación. A continuación se presentan los gráficos con las dos ecuaciones tanto para fuente alta como para el viento de fuente baja.



**5.5.3.2 Aula rectangular ancha.**

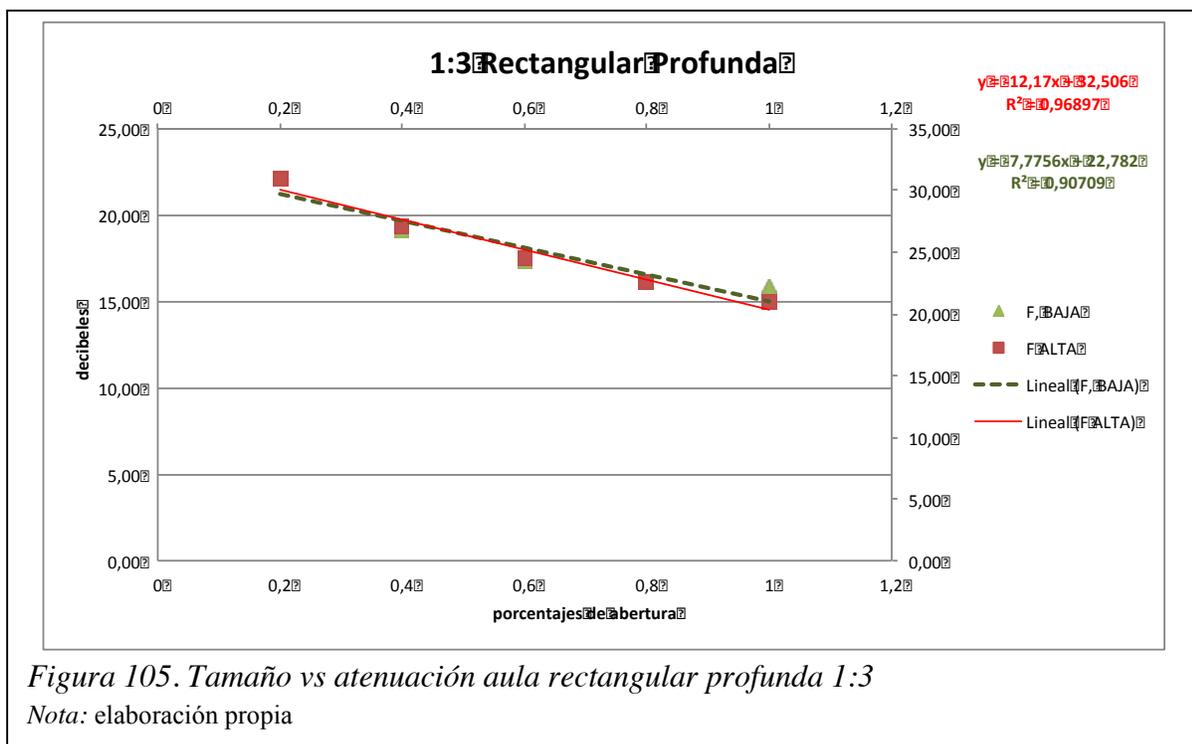
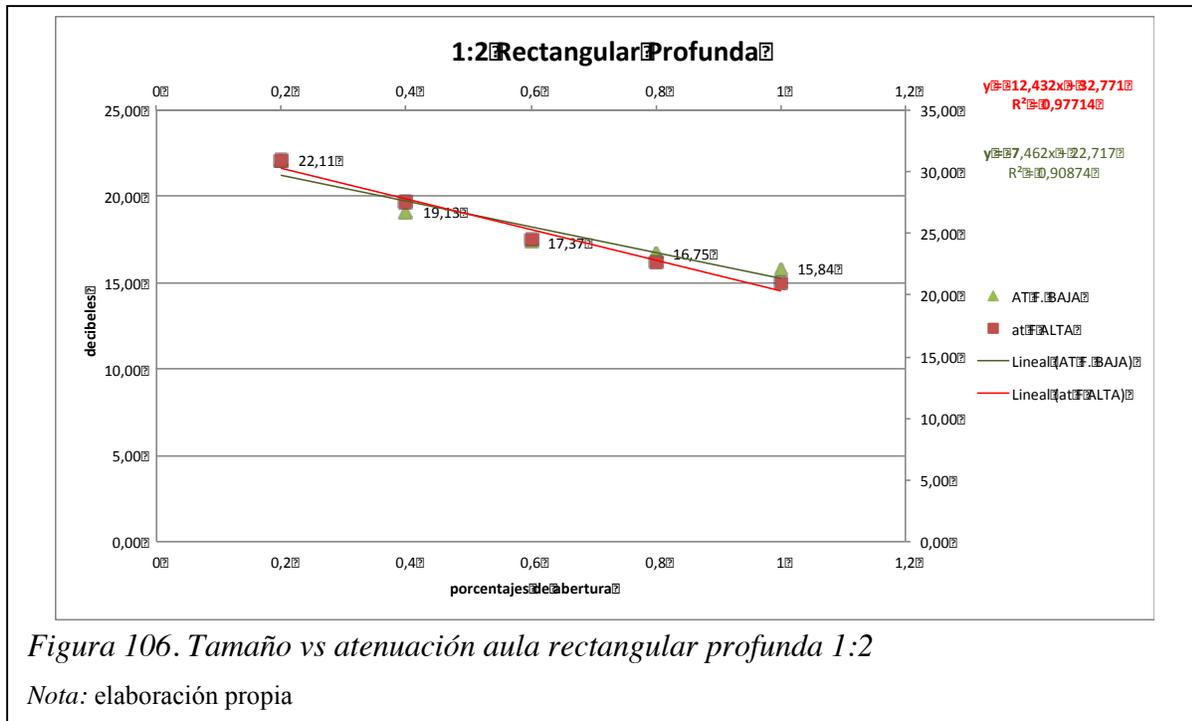
En está aula, los vanos de proporciones 2:3 (3,67\*1,50) y 1:2(2,75\*2), con abertura del 40%, logran una atenuación para fuente alta, que se clasifica según los parámetros técnicos como óptima, cuando es mayor de 25dBA, y para fuente baja como aceptable con atenuaciones mayores de 19 dBA. Ya que las correlaciones de las variables tamaño de la abertura y atenuación, son estadísticamente fiables con una correlación muy fuerte, se puede predecir el comportamiento esperado, tanto del tamaño del vano como el de los decibelios de atenuación. Se presentan los gráficos con las dos ecuaciones, tanto para fuente alta como para viento de fuente baja.





**5.5.3.3 Aula rectangular profunda.**

En está aula, los vanos de proporciones 1/2 (2,75\*2,00) y 1/3(3,00\*1,83), con abertura del 40%, logran una atenuación para fuente alta, que se clasifica según los parámetros técnicos como óptima, cuando es mayor de 25 dBA, y para fuente baja como aceptable, con atenuaciones mayores de 19 dBA. Ya que las correlaciones de las variables tamaño de la abertura y atenuación, son estadísticamente fiables, con una correlación muy fuerte, puede predecirse el comportamiento esperado, tanto del tamaño del vano como el de los decibelios de atenuación. Se presentan los gráficos con las dos ecuaciones tanto para fuente alta como para viento de fuente baja.



**5.6 Revisión de la NTC 4595 de 2015, contra la los resultados obtenidos con la NTC 4595 2006**

La NTC 4595 del 2015 cambió el área necesaria para entrada y salida de aire a 1/12 del área en planta del aula. Bajo las condiciones de la norma actualizada el clima de Medellín no encaja en la categoría de templado por el rango de temperaturas de 18 a 24 °C, y tampoco cuadra con la categoría de cálido-húmedo por los rangos de humedad que están por encima de 75%. Sin embargo, estas condiciones se resolvieron al usar el área sugerida para ventilar, de acuerdo a la NTC 4595 del 2006, en su categoría cálido-húmedo, que es 1/6 entre el área de venta y el área en planta que está mucho más ajustado al comportamiento del clima de la ciudad, que va desde 17 a 28 °C.

Se escogió el aula cuadrada para hacer las simulaciones con la norma actualizada, debido a que esta presentó las mayores áreas ventiladas. Al hacer las simulaciones con el aula cuadrada colocando el área de los vanos de 1/12, y haciéndole las modificaciones en el porcentaje de abertura, se ve así:

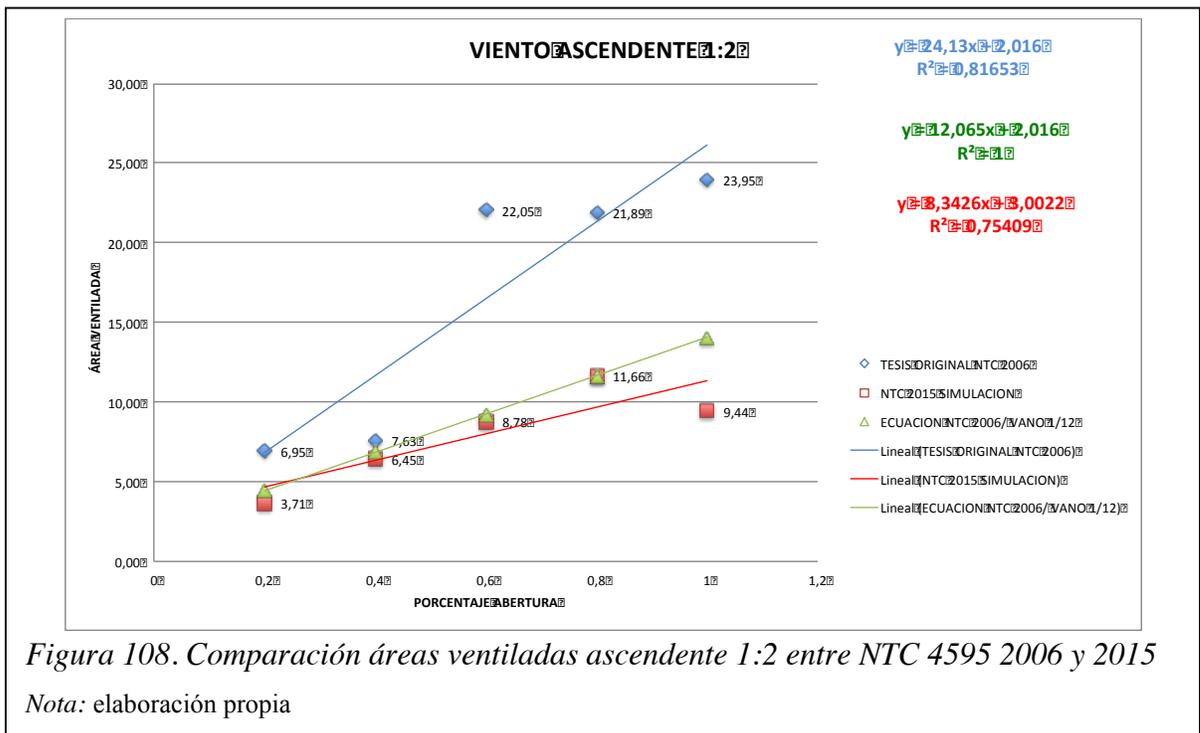
MEDIDA/VANO 1:2 (1,99*1,375)	20% ABERTURA (1,99*0,28)	ÁREA/VANO 0,55M <sup>2</sup>	40% ABERTURA (1,99* ,55)	ÁREA/VANO 1,1M <sup>2</sup>	60% ABERTURA (1,99*0,82)	ÁREA/VANO 1,65M <sup>2</sup>	80% ABERTURA (1,99*1,11)	ÁREA/VANO 2,2M <sup>2</sup>	100% ABERTURA (1,99*1,375)	ÁREA/VANO 2,75M <sup>2</sup>
MEDIDA/VANO 1:3 (3,00*0,92)	20% ABERTURA (3,00*0,183)	ÁREA/VANO 0,55M <sup>2</sup>	40% ABERTURA (3,00*0,367)	ÁREA/VANO 1,1M <sup>2</sup>	60% ABERTURA (3,00*0,55)	ÁREA/VANO 1,65M <sup>2</sup>	80% ABERTURA (3,00*0,73)	ÁREA/VANO 2,2M <sup>2</sup>	100% ABERTURA (3,00*0,92)	ÁREA/VANO 2,75M <sup>2</sup>
MEDIDA/VANO 2:3 (1,83*1,50)	20% ABERTURA (1,83*0,30)	ÁREA/VANO 0,55M <sup>2</sup>	40% ABERTURA (1,83*0,60)	ÁREA/VANO 1,1M <sup>2</sup>	60% ABERTURA (1,83*0,90)	ÁREA/VANO 1,65M <sup>2</sup>	80% ABERTURA (1,83*1,20)	ÁREA/VANO 2,2M <sup>2</sup>	100% ABERTURA (1,83*1,50)	ÁREA/VANO 2,75M <sup>2</sup>

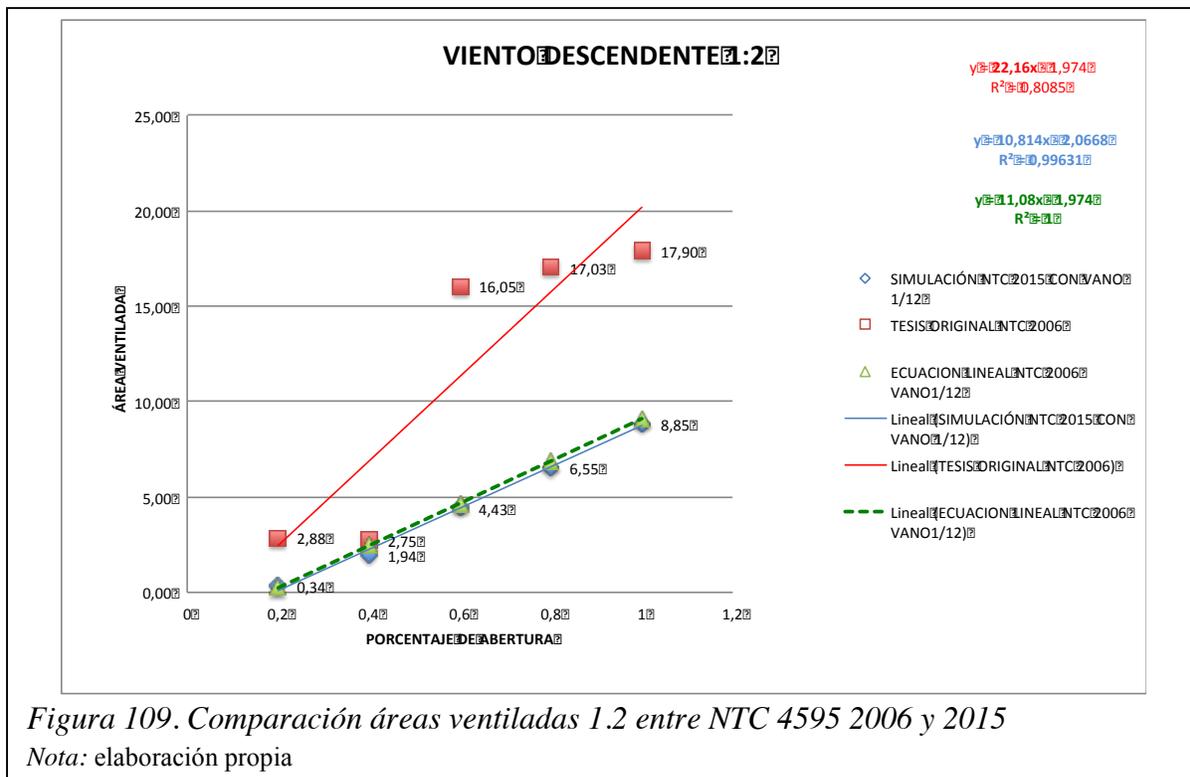
*Figura 107. Medida vanos aplicando la norma NTC 4595 2015*

Se obtienen los siguientes resultados, donde se compara el comportamiento de las áreas ventiladas aplicando la NTC 4595 2006 con las áreas ventiladas aplicando la NTC 4595 2015. Adicionalmente, se obtienen las áreas ventiladas, a partir de aplicar la fórmula de la ecuación lineal y hacer una validación estadística. Estas ecuaciones lineales se obtienen de los datos arrojados de las áreas ventiladas, a partir de las simulaciones, representados en una gráfica de dispersión, donde resultan las ecuaciones de la recta, que sirven para poder proyectar si se cambia el área de ingreso de air y como afecta el área ventilada el interior.

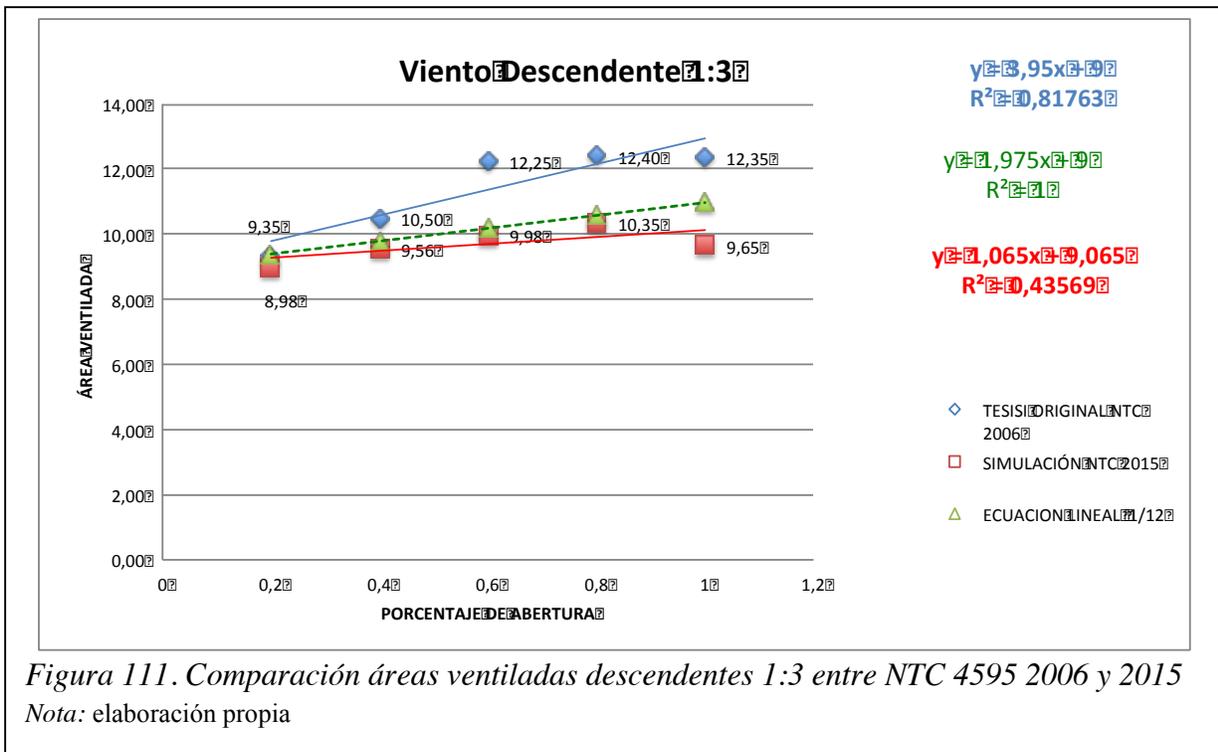
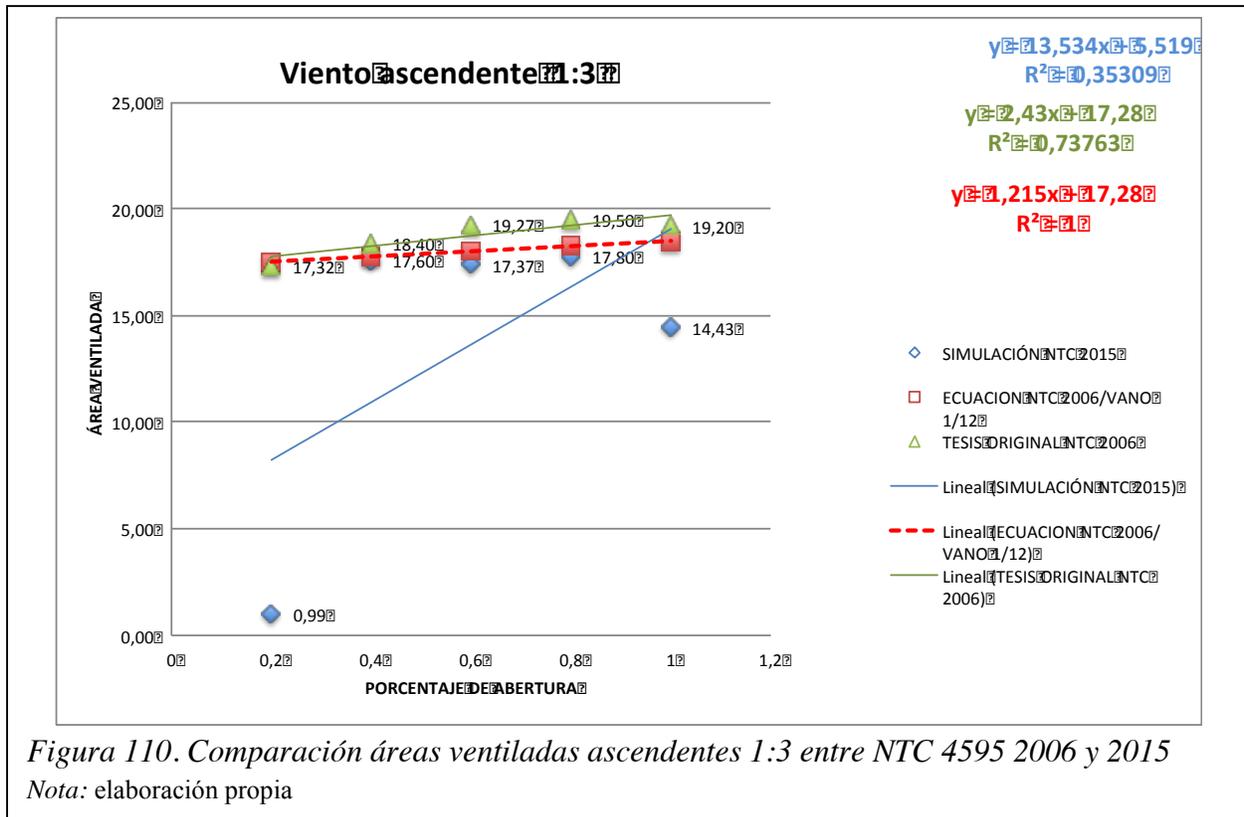
Para la proporción de 1:2 con ventilación ascendente, se puede decir que es claro que la NTC 2015 se aleja de la NTC 2006 proporcionalmente a medida que el vano crece. Cuando la abertura es de 0,2, el área ventilada es de 47% (3,71/6,95), mayor que la NTC 2015, y cuando el área es 0,8, esa diferencia es aproximadamente del 47% (11,7/21,9) (ver grupo de anexos O), es decir, que la diferencia entre las dos normas es que cuando el área se duplica, se incrementa la

ventilación en promedio un 47%, duplicando el área ventilada. En cuanto la aplicación de la ecuación lineal, los datos presentan un desviación estándar de 0,2, sin contar el comportamiento cuando la abertura es del 100%, cuya desviación estándar llega al 2,32, lo que significa que la ecuación lineal obtenida en este trabajo tiene una confiabilidad fuerte en las aberturas de 20%, 40% 60% y 80% y una confiabilidad aceptable en aberturas del 100% (figura 108). En cuanto a viento descendente ocurre algo similar al comportamiento en viento ascendente, con la particularidad de que el promedio de la reducción del área ventilada entre la NTC 2006 y la NTC 2015 es de un 60%, es decir, que mientras se duplica área de abertura se multiplica, aproximadamente por seis, el área ventilada. En cuanto la aplicación de la ecuación lineal, los datos presentan una desviación estándar de 0,20, es decir, el comportamiento de la ecuación lineal confiable en todas las aberturas.





Para la proporción 1:3, con flujo de viento ascendente, se puede decir que al duplicar el área de entrada de aire en la NTC 2006, con respecto a la NTC 2015, el incremento en promedio es de 12% sin contar con el comportamiento cuando la abertura es del 0,2 ya que el incremento es de casi el 100% del área ventilada. En cuanto la ecuación los datos, se presenta una desviación estándar promedio de 0,6, sin contar el comportamiento cuando la abertura es del 100%, cuya desviación es de 9, es decir, que en caso de la abertura de 0,2 la ecuación no es confiable, sin embargo, en el resto del comportamiento de las aberturas, la confiabilidad de la ecuación es aceptable (figura 111). En cuanto a viento descendente, es claro que la NTC 2015 se aleja de la NTC 2006 proporcionalmente, a medida que el vano crece; cuando la abertura es de 0,2, el área ventilada, según tesis original, es 9% mayor que la NTC 2015, y cuando el área es 0,8 esa diferencia es aproximadamente del 17% (ver anexos). En cuanto a la ecuación lineal, esta se comporta muy bien, considerando una desviación estándar promedio de 0,21, lo que significa que los datos que arroja la ecuación son bastante confiables.



Para proporción una de 2:3, con flujo de viento ascendente, se puede decir que la NTC 4595 de 2015, se aleja proporcionalmente de la NTC 4595 de 2006 con una reducción del área ventilada promedio del 46%, es decir, cuando se duplica el área se incrementa la ventilación en un 46% aproximadamente. En cuanto la ecuación lineal, su comportamiento es correcto en las aberturas entre 40% y el 80%, con una desviación estándar en promedio de 0,36; los extremos tienen un comportamiento diferente que se aleja de los resultados encontrados en la simulación (ver siguiente gráfica). En cuanto al flujo descendente se puede decir que la NTC 4595 de 2015 se aleja proporcionalmente de la NTC 4595 de 2006, con un incremento del área ventilada promedio del 60%, es decir, cuando se duplica el área del vano se incrementa la ventilación en un 60% aproximadamente; en cuanto a la ecuación lineal, tiene un comportamiento fiable con las aberturas entre 40% y 100%, con una desviación estándar en promedio de 0,24, siendo la abertura de 0,2 menos confiable con una desviación de 1,47.

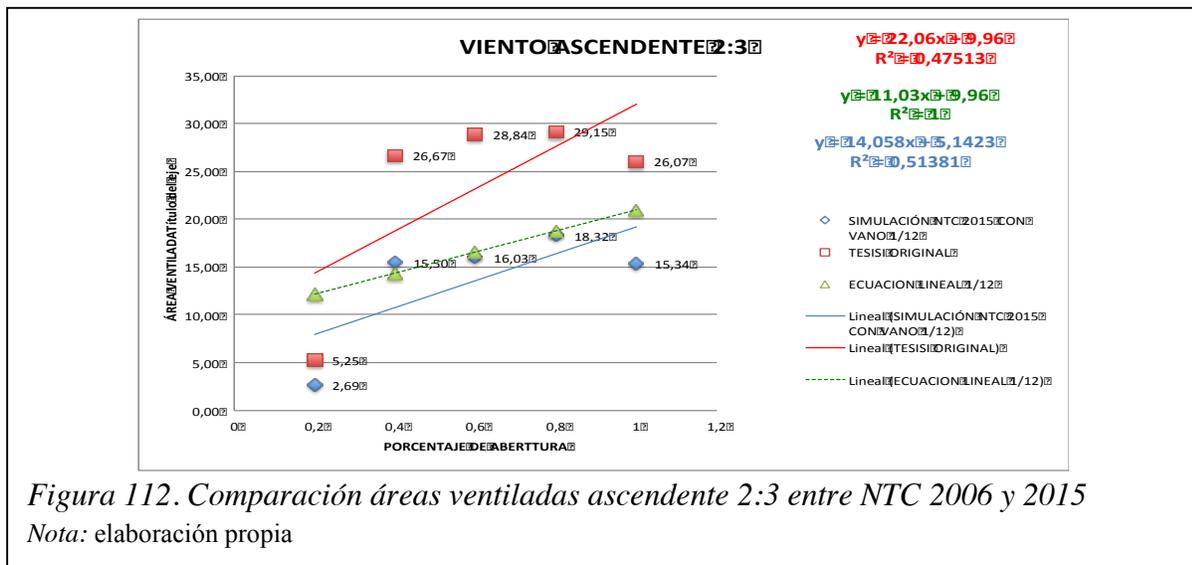
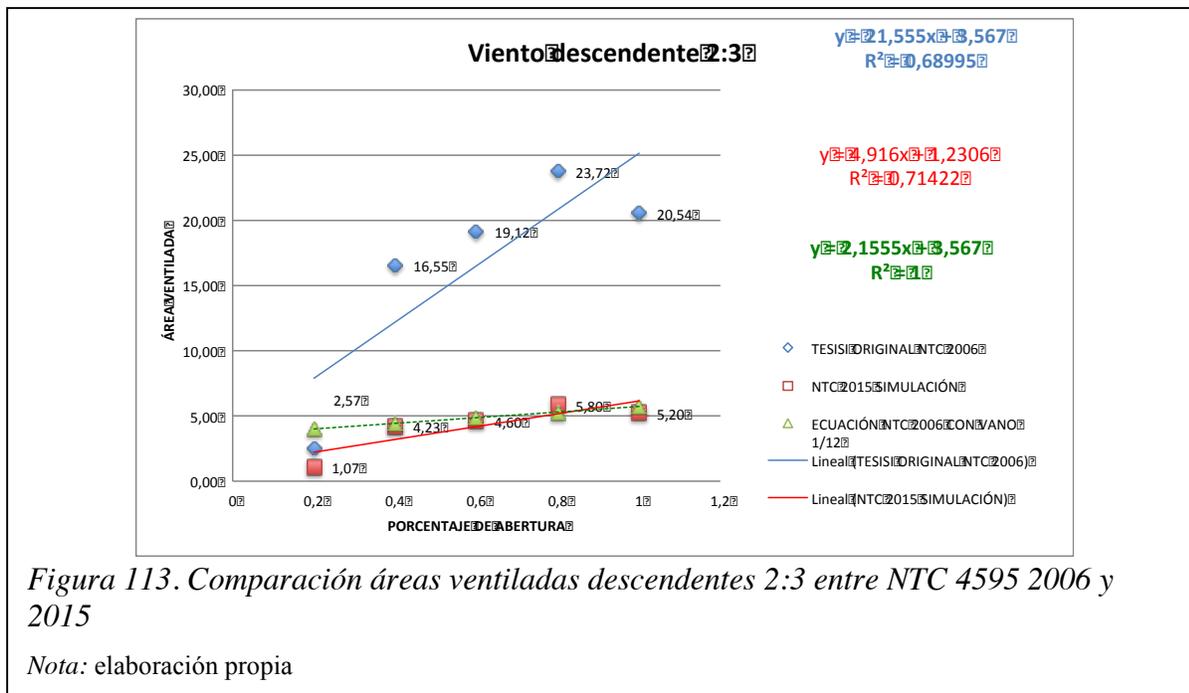


Figura 112. Comparación áreas ventiladas ascendente 2:3 entre NTC 2006 y 2015

Nota: elaboración propia



Se presenta un cuadro resumen, donde se muestra la diferencia del aumento del porcentaje de ventilación entre una norma y la otra y la tendencia de este aumento según la proporción (ver figuras 114 y 115).

VANO	VIENTO ASCENDENTE NTC2006	VIENTO ASCENDENTE NTC 2015	AUMENTO EN %	MEDIA DEL AUMENTO
1:2.20%	6,95	3,71	47%	46%
1:2.40%	7,63	6,45	15%	
1:2.60%	22,05	8,78	60%	
1:2.80%	21,89	11,65	47%	
1:2.100%	23,95	9,44	61%	
1:3.20%	17,32	0,99	94%	28%
1:3.40%	18,4	17,6	4%	
1:3.60%	19,27	17,37	10%	
1:3.80%	19,5	17,8	9%	
1:3.100%	19,2	14,43	25%	
2:3.20%	5,25	2,69	49%	43%
2:3.40%	26,67	15,5	42%	
2:3.60%	28,84	16,03	44%	
2:3.80%	29,15	18,32	37%	
2:3.100%	26,07	15,34	41%	

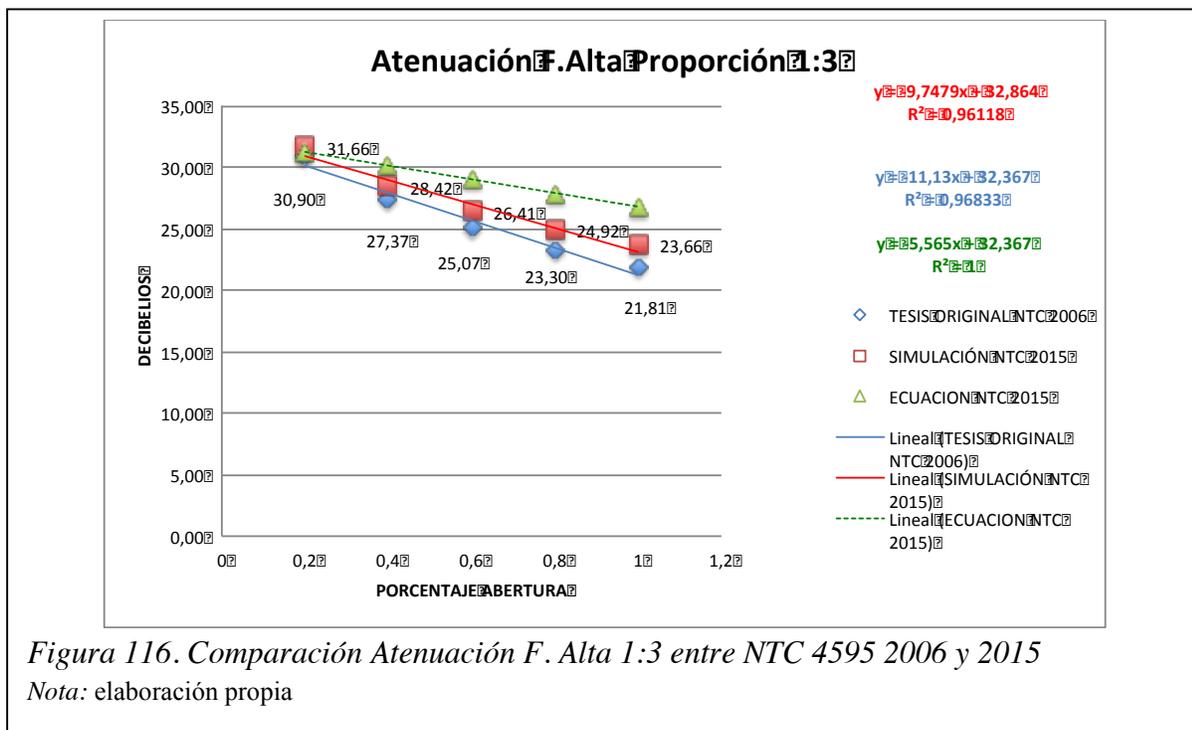
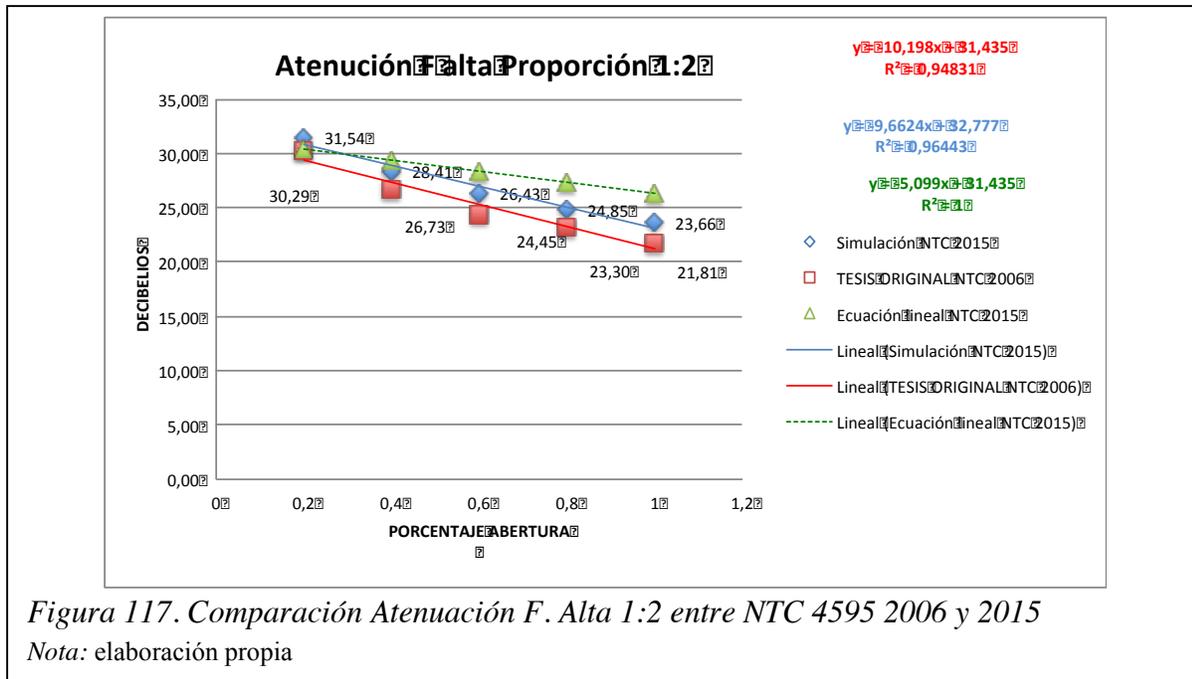
*Figura 114. Cuadro resumen con diferencias en porcentaje del aumento de la ventilación flujo ascendente*

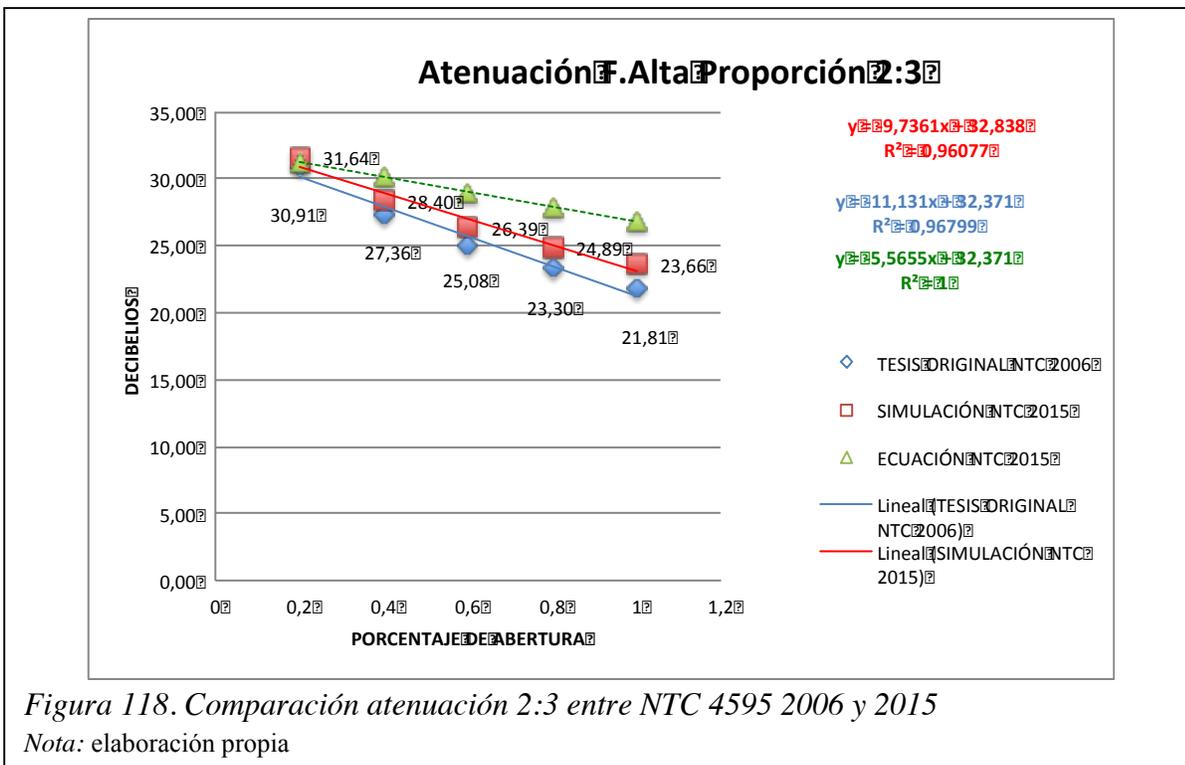
*Nota: elaboración propia*

VANO	VIENTO DESCENDENTE NTC2006	VIENTO DESCENDENTE NTC 2015	AUMENTO EN %	MEDIA DEL AUMENTO
1:2.20%	2,88	0,34	88%	60%
1:2.40%	2,75	1,94	29%	
1:2.60%	16,05	4,43	72%	
1:2.80%	17,03	6,55	62%	
1:2.100%	17,9	8,85	51%	
1:3.20%	9,35	8,98	4%	14%
1:3.40%	10,5	9,56	9%	
1:3.60%	12,25	9,98	19%	
1:3.80%	12,4	10,35	17%	
1:3.100%	12,35	9,65	22%	
2:3.20%	2,57	1,07	58%	72%
2:3.40%	16,55	4,23	74%	
2:3.60%	19,12	4,60	76%	
2:3.80%	23,72	5,80	76%	
2:3.100%	20,54	5,20	75%	

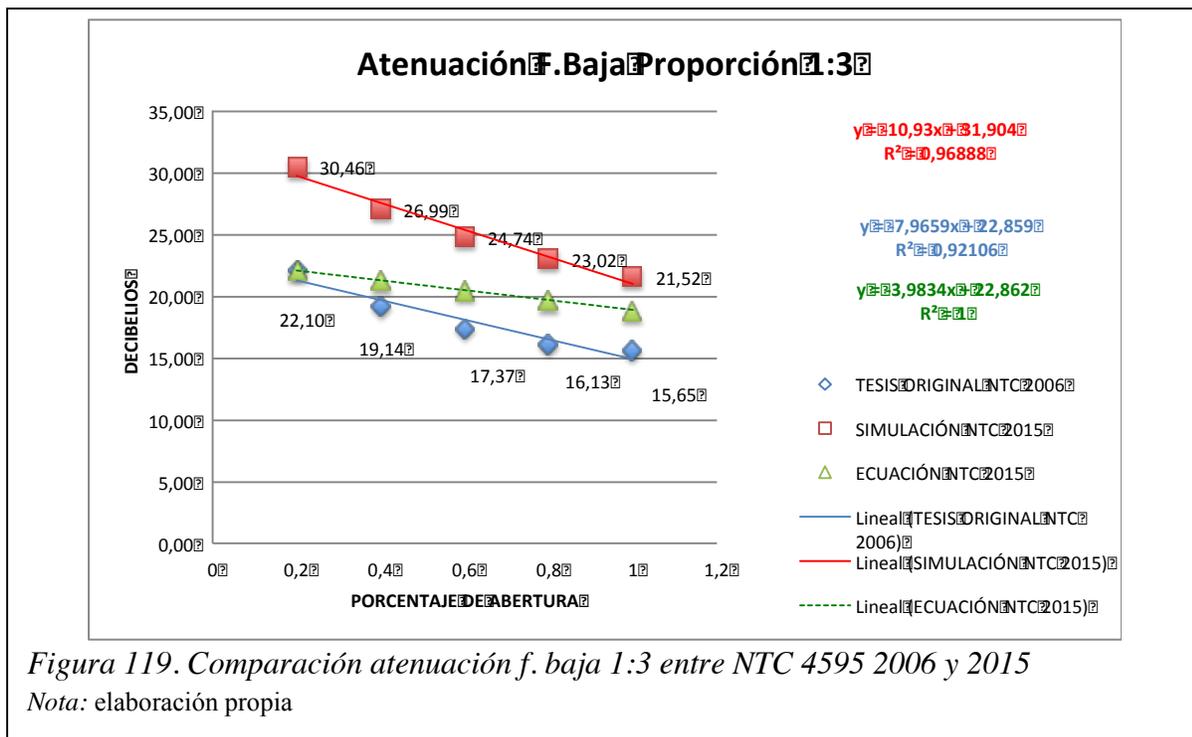
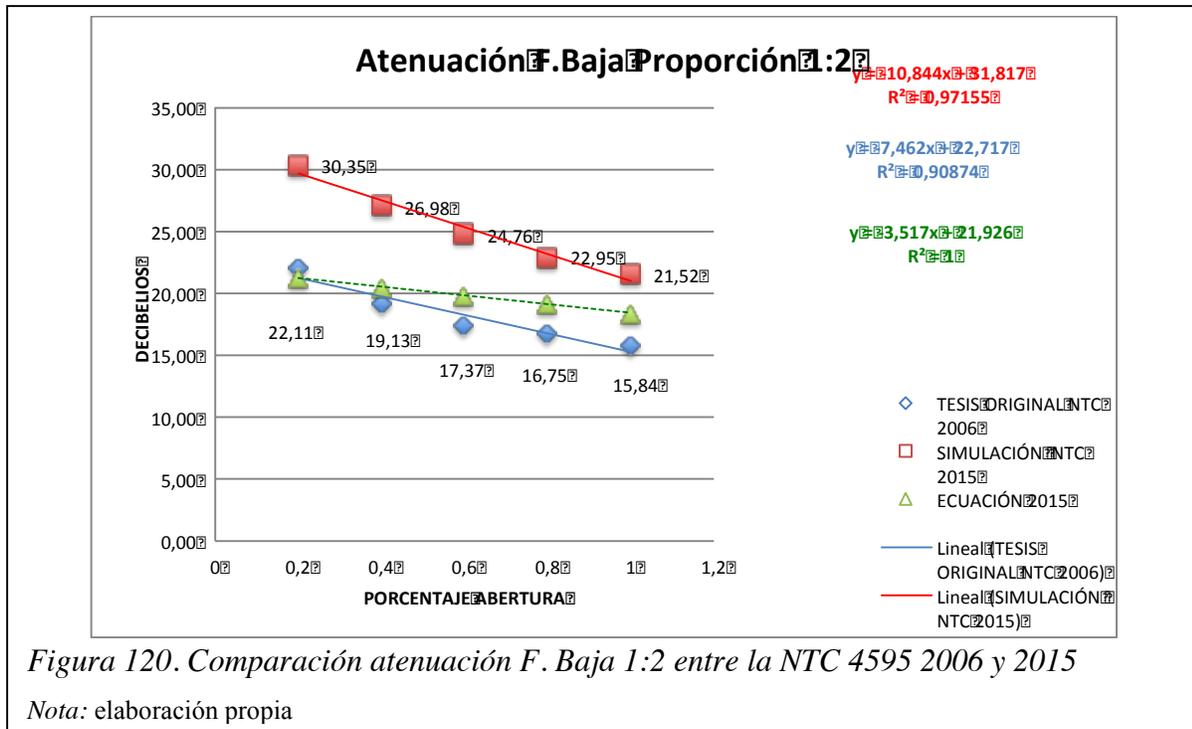
*Figura 115. Cuadro resumen con diferencias en porcentaje del aumento de la ventilación flujo descendente*  
 Nota: elaboración propia

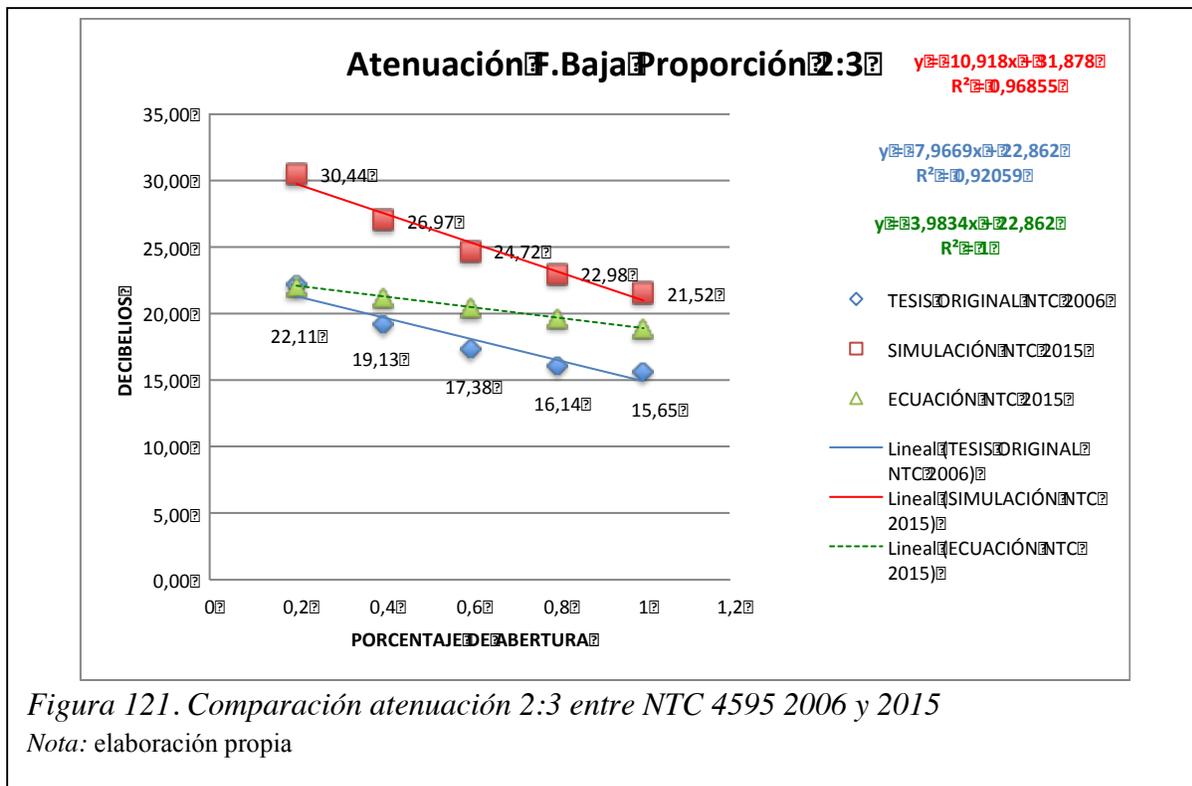
En cuanto al comportamiento de la atenuación con fuente alta, es lógico esperar un aumento en la reducción sonora. En la proporción 1:2, el aumento en la atenuación entre la NTC 4595 de 2006 y la NTC 4595 de 2015, es en promedio por cada porcentaje de abertura, de 1,7 dBA; en las proporciones 1:3 y 2:3, el aumento es en promedio es de 1,3 dBA, lo que quiere decir que duplicando el área de la abertura, la atenuación sonora se reduce entre 1,7dBA en la proporción 1:2, lo que significa que se reduce en un 7%; y se disminuye en 1,3dBA, en promedio, en proporciones 1:3 y 2:3, es decir, un 5% (ver figuras 116 a 118). Por otra parte, la ecuación lineal obtenida usando la NTC 4595 de 2006, para poder prever la atenuación, aplicándola en el vano sugerido por la NTC 4595 de 2015, se obtienen son datos que tienen una desviación estándar promedio con respecto a los datos de la simulación en la proporción de 1:2, de un orden de 1,56 dBA y en proporciones de 1:3 y 2:3, en un orden de 1,3 dBA (ver anexos).





El comportamiento en atenuación con fuente baja en la proporción 1:2; el aumento en la atenuación entre la NTC 4595 de 2006 y la NTC 4595 de 2015 es en promedio por cada porcentaje de abertura de 7,1 dBA; en la proporción 1:3 es de 7,2dBA, y en la de 2:3 es de 7,5 dBA, lo que quiere decir que duplicando el área de la abertura la atenuación sonora se reduce entre 7,1 dBA 39% y 7,2 dBA, esto es un 40% en proporción; y la 1:3 y la 2:3 se reducen en promedio en 7,5 dBA a un 42% (ver figuras 119 a 121). La ecuación lineal obtenida usando la NTC 4595 de 2006, para poder prever la atenuación, y aplicándola en el vano sugerido por la NTC 4595 de 2015, arroja datos que tienen una desviación estándar promedio con respecto a los datos de la simulación en la proporción de 1:2, de un orden de 2,39 dBA y en proporciones de 1:3 y 2:3, en un orden de 2,28 dBA (ver anexos).





Se presenta cuadro resumen donde se muestra la diferencia de la reducción de la atenuación entre norma NTC 4595 2006 y la 2015 y la tendencia de esta reducción según la proporción (ver figuras 122 y 123).

VANO	ATENUACIÓN F.ALTA NTC 2006	ATENUACIÓN F.ALTA NTC 2015	REDUCCIÓN EN %	MEDIA DE LA REDUCCIÓN
1:2.20%	30,29	31,54	-4%	-7%
1:2.40%	26,73	28,41	-6%	
1:2.60%	24,45	26,43	-8%	
1:2.80%	23,3	24,85	-7%	
1:2.100%	21,81	23,66	-8%	
1:3.20%	30,9	31,66	-2%	-5%
1:3.40%	27,37	28,42	-4%	
1:3.60%	25,07	26,41	-5%	
1:3.80%	23,3	24,92	-7%	
1:3.100%	21,81	23,66	-8%	
2:3.20%	30,91	31,64	-2%	-5%
2:3.40%	27,36	28,40	-4%	
2:3.60%	25,08	26,39	-5%	
2:3.80%	23,3	24,89	-7%	
2:3.100%	21,81	23,66	-8%	

Figura 123. Cuadro resumen de las diferencias en porcentaje de la reducción de la atenuación de NTC 4595 2006 a 2015 fuente alta

Nota: elaboración propia

VANO	ATENUACIÓN F.BAJA NTC 2006	ATENUACIÓN F.BAJA NTC 2015	REDUCCIÓN EN %	MEDIA DE LA REDUCCIÓN
1:2.20%	22,11	30,35	-37%	-39%
1:2.40%	19,13	26,98	-41%	
1:2.60%	17,37	24,76	-43%	
1:2.80%	16,75	22,95	-37%	
1:2.100%	15,84	21,52	-36%	
1:3.20%	22,1	30,46	-38%	-40%
1:3.40%	19,14	26,99	-41%	
1:3.60%	17,37	24,74	-42%	
1:3.80%	16,13	23,02	-43%	
1:3.100%	15,84	21,52	-36%	
2:3.20%	21,5	30,44	-42%	-42%
2:3.40%	19,13	26,97	-41%	
2:3.60%	16,76	24,72	-47%	
2:3.80%	16,14	22,98	-42%	
2:3.100%	15,84	21,52	-36%	

Figura 122. Cuadro resumen de la diferencia en porcentajes de la reducción de la atenuación entre NTC 4595 2006 Y 2015 fuente baja

Nota: elaboración propia

## **6 Conclusiones**

Estas conclusiones están repartidas en 4 secciones: la primera hace referencia al marco teórico conceptual; la segunda a la metodología usada; la tercera ilustra el manejo y la adquisición de los datos, y la cuarta es sobre los hallazgos encontrados.

### **6.1 Conclusiones sobre el marco teórico**

En esta investigación se encontró abundante información sobre la ventilación y la acústica de salones de clase, sin embargo, no existe mucha sobre los rangos de edades de los niños incluidos en el estudio.

Sobre la proporción y el área de los vanos, como solución pasiva para lograr equilibrar las dos variables ambientales estudiadas, como son el ruido y la ventilación, se encuentra poco en la literatura científica. Lo hallado se relaciona con elementos que se incorporan a la infraestructura de la ventana, sin embargo, no hay mucha investigación acerca de la proporción o el área del vano con los elementos que lo componen ni sobre las variaciones de estos, que son los que contribuyen a mejorar y equilibrar estas dos variables ambientales.

Falta mucha más investigación sobre equilibrar la calidad del aire que ingresa por los vanos para poder disfrutar de una ventilación pasiva en los centros urbanos, sin desmejorar la calidad del aire interior y sin perjuicio para los ocupantes.

### **6.2 Conclusiones sobre la metodología**

En esta ocasión se optó por una investigación teórica, sin verificación de los datos estudiados en terreno. Solo se hizo comprobación en cámara reverberante, con datos fáciles de cuantificar y clasificar. Sin embargo, es importante anotar que la comprobación en terreno de lo recolectado teóricamente puede ayudar a tener otros ángulos de información, que con el ámbito teórico únicamente, es imposible de ver. Por tiempo y costos faltaron modelos a escala de las aulas para comprobación en túneles de viento de lo visto en los modelos computacionales. Hizo falta también, por tiempo y costos, hacer encuestas de satisfacción de las condiciones climáticas estudiadas con las variaciones propuestas en las aberturas. Una gran ventaja del modelo teórico es

que se enfoca en el objeto de estudio, sin tener elementos externos que alteren los resultados e interpretaciones de los mismos.

Se pudo experimentar que al cambiar el porcentaje de las aberturas, y sus dimensiones, conservando el área para cada tipo de abertura, el vano que mejor comportamiento simultáneo presentó es el de 2:3 con abertura del 40%.

### **6.3 Conclusiones sobre la adquisición y manejo de datos**

Los datos recolectados con software CFD de *Autodesk* son confiables y tienen a su vez algoritmos que manejan estadísticas de movimiento de los flujos de aire.

El estudio presenta limitaciones en cuanto a la variabilidad real que tienen los flujos de aire en la zona, durante un periodo de tiempo, ya que al comparar la información de la velocidad del viento, esta permanecía constante.

En cuanto a los datos obtenidos de la aplicación de la fórmula del TL combinado, se observa un escenario muy controlado, ya que fueron comprobados sus datos en cámara reverberante, sin embargo, la comprobación en el campo es importante, puesto que las variables de absorción de sonido de elementos como vegetación, elementos arquitectónicos, personas etc., dan una mayor precisión al estudio y una aproximación real y particular de las variables estudiadas

### **6.4 Conclusiones sobre los hallazgos**

Comparando los resultados, tanto de ventilación como de ruido con los parámetros técnicos establecidos previamente, se puede deducir lo siguiente:

**1.** Los mejores comportamientos de ventilación los generan las proporciones de vano de 1:2 y 2:3, con 50,12 y 44,17% de área ventilada, respectivamente, con una abertura del 80% del vano.

**2.** Los mejores índices de atenuación del ruido en aula de planta cuadrada los generan las proporciones 1:3 y 2:3, con aberturas entre 40%; en aula rectangular ancha, los mejores comportamientos están en 2:3 y 1:2, con 40% de abertura, y en aula profunda están en proporciones de 1:2 y 1:3, con 40% de abertura. Por lo tanto se puede concluir que el porcentaje de 40% es el que presenta el mejor comportamiento en la atenuación sonora.

**3.** Los mejores comportamientos simultáneos de ventilación y atenuación sonora están en el 40% de abertura, con vanos de proporciones 2:3, en el aula cuadrada para este experimento. Sin embargo, estadísticamente, no se encontró relación entre la forma del aula y el área ventilada.

**4.** Se obtienen ecuaciones lineales para determinar el porcentaje de abertura y atenuación que se logra en el interior del aula; igualmente con la ventilación, agregándole el factor de la forma del aula, que se obtiene mediante ecuaciones lineales que ayudan a predecir el porcentaje de viento que se habrá dentro del salón de clases.

**5.** Las proporciones de los vanos 1:2, 1:3, 2:3, tienen relación con el área ventilada dentro del aula cuando el flujo del aire es ascendente; la proporción que genera mayor área ventilada es la 2:3, seguida por la proporción de 1:2, y por último está la 1:3. En flujo descendente, aunque las pruebas estadísticas no muestran una relación a causa del tamaño de la muestra, la 2:3 es la que mayor área ventilada proporciona.

**6.** Las mejores áreas ventiladas son las generadas por aberturas entre 80 y 60%, las aberturas del 100% siempre muestran caídas en el área de ventilación.

**7.** Al comprobar los resultados las normas NTC 4595 de 2006 Y NTC 4595 de 2015, se puede concluir que las ecuaciones lineales para áreas ventiladas funcionan por lo general en los rangos medios de las aberturas, es decir, entre las aberturas de 40 y 80%. Los extremos tienen un comportamiento con mayor desviación estándar.

Una de las conclusiones más importantes de esta investigación, es la importancia de revisar y reevaluar la NTC 4595, ya que es indispensable detallar cómo se mide la ventilación dentro de las aulas, considerando cada centro urbano por sus connotaciones de densidad y dirección del viento. En este estudio se demostró la inoperancia de tener en cuenta el caudal ingresado y las renovaciones por hora necesarias, si no consideran la distribución y la velocidad del viento al interior del aula, pues se afecta el confort de gran parte de la población al interior. En la norma NTC 4595, para el dimensionamiento del área del vano, no se tiene valorada la distribución de esta área en fachada para lograr una ventilación que logre distribuir el aire en el mayor porcentaje del área del salón; igualmente, no se tiene regulada ni establecida la altura de los sillares con respecto a las ventanas, según la antropometría de los alumnos, para garantizar un correcto refrescamiento de su cuerpo. La norma actualiza NTC 4595 de 2015, reduce a la mitad las aberturas, estas no cumplen con el caudal requerido, ni con el dimensionamiento mínimo de las ventanas, solicitado por la fórmula empírica de *Florida Energy II*. Adicionalmente, no se logra clasificar adecuadamente la ciudad de

Medellín, puesto que el rango climático que se sugiere para la altitud donde se localiza la ciudad ocurre, por lo regular, solo en las mañanas (temperaturas entre 18 y 24 °C).

En cuanto el ruido de fondo, la norma colombiana no está compaginada con la realidad de las ciudades del país, donde los ruidos de fondo son mucho más altos que los contemplados; no se tienen recomendaciones adicionales de atenuadores naturales urbanos (como taludes, barreras de árboles, grama, o pisos blandos etc.) para los centros escolares, en procura de mejorar los índices de ruido; tampoco dentro de la norma se tiene en cuenta el contexto urbano de cada ciudad para poder realizar una medición de la atenuación urbana, ni se hacen recomendaciones acerca de la conformación de las ciudades ni los usos adecuados para implantar infraestructuras escolares.

## **7 Recomendaciones**

Las recomendaciones o líneas de futuras investigaciones para profundizar y ampliar el conocimiento alrededor del tema tratado son:

**1.** Evaluar la distribución de los vanos en fachada para aumentar el porcentaje de distribución de aire, sin deterioro de la atenuación.

**2.** Investigar sobre elementos naturales próximos a las aulas que ayuden a mitigar el ruido e incrementen la velocidad de entrada del aire al interior del aula.

**3.** Investigar sobre la profundidad y la localización del vano en fachada para lograr mitigar los ruidos de altas frecuencias.

**4.** Hacer pruebas de campo para la comprobación práctica de lo expresado teóricamente en este trabajo: mediciones físicas de ventilación al interior de las aulas, medición de los ruidos de fondo y los tiempos de reverberación a interior y medición de inteligibilidad de la palabra.

### Referencias

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. (2018). *Desafíos para el 2030. Ciencia, tecnología, educación y medio ambiente*.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE. (2009). *2009 Ashrae Handbook: Fundamentals*. New York: Wiley. <https://doi.org/10.1039/c1cs15219j>
- Arámburo, E. B. (2007). *Implementación de un sistema modificado de Cancelación Activa de Ruido*.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2015). *Actualización de los mapas de ruido de las zonas urbanas de los municipios de Medellín, Bello e Itagüí*. Medellín.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2006). *ISO 7730: ergonomía del ambiente térmico*. Madrid.
- Beltrán, D., & Castillo, J. (2015). Optimización energética para el aprovechamiento de ventilación natural en edificaciones en climas cálidos del Ecuador, (January), 78. <https://doi.org/10.13140/2.1.1704.4803>
- Bojórquez, G., Luna, A., Gómez-Azpeitia, L. G., García-Cueto, O. R., & Ruiz-Torres, R. P. (2014). Temperatura neutral y rangos de confort térmico para exteriores, período cálido en clima cálido seco. *Ambiente Construido*, 10(2), 133–146. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212010000200009>
- Breithaupt, M. (2000). *El ruido y su mitigación*. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo.
- Brotas, L., Roaf, S., & Nicol, F. (2017). *Design to thrive. PLEA Conference Proceedings: Design to Thrive*. Edimburgo: PLEA Conference Proceedings: Design to Thrive.
- Calidad de ambiente interior. (2009). In *Aspectos técnicos de la calidad de ambientes interiores* (pp. 233–253).
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Ediciones UPG.
- Casas-García, O., Betancur-Vargas, C. M., & Montañó-Erazo, J. S. (2015). Revisión de la normatividad para el ruido acústico en Colombia y su aplicación. *ENTRAMADO*, 11(1), 264–286. <https://doi.org/10.18041/entramado.2015v11n1.21106>

- Colombia. Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2015). *Documento CONPES 3831. Declaración de importancia estratégica del plan nacional de infraestructura educativa para la implementación de la jornada única escolar*. Bogotá.
- Colombia. Ministerio de Educación Nacional. (2015). *Colegio 10, lineamientos y recomendaciones para el diseño arquitectónico del colegio de jornada única*. Bogotá.
- Columbia University, & Escuela de Asuntos Internacionales y Públicos. (2017). *Camino de la Política para Mejorar la Calidad del Aire Urbano en Medellín, Colombia*. Medellín.
- Consejo Privado de Competitividad. (2016). *Informe Nacional de Competitividad 2016-2017*. Bogotá.
- De Rozas, M., Escudero, S., Fuente, M., & De Lorenzo, A. (2013). Sistemas de ventilación: influencia en el aislamiento acústico de la fachada. *TecniAcústica*, (4355), 1–6.
- De Salis, M. H., Oldham, D. J., & Sharples, S. (2002). Noise control strategies for naturally ventilated buildings. *Building and Environment*, 37(5), 471–484. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00047-6)
- Díaz Chyla, A. (2015). *La influencia en el aislamiento acústico a ruido aéreo de los aireadores en las ventanas compactas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ercoli, L., Azzurro, A. P., & Stornini, J. (1999). Caracterización sonora de las aulas: un estudio de los principales parámetros acústicos en aulas argentinas. *TecniAcústica*, 1–7.
- Erhart, T., Guerlich, D., Schulze, T., & Eicker, U. (2015). Experimental validation of basic natural ventilation air flow calculations for different flow path and window configurations. In *Energy Procedia* (Vol. 78, pp. 2838–2843). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.644>
- Escobar Velásquez, A. L., David Sánchez, C., Chaverra, H., Sánchez Pavas, I., Rave, J. C., Vanegas Daza, J. D., ... Osorio Correa, Y. (2011). *Medellín, un valle de ruidos: una aproximación sociológica al estudio del ruido urbano*. Medellín.
- Estellés, R. (2005). *Pérdida por Transmisión. Reducción sonora*. Montevideo.
- Evans, J. (2007). Acoustical Standards for Classroom Design Comparison of International Standards and Low Frequency Criteria. *Noise Notes*, 5(4), 3–12. <https://doi.org/10.1260/147547306781476280>
- Eysenbach, G. (2008). Evaluación cualitativa de condiciones ambientales de viviendas del ipv en s. m. de Tucumán Cecilia. *Journal of Medical Internet Research*, 10(3), 22.

- Fabbri, K. (2015). *Indoor Thermal Comfort Perception. Indoor Thermal Comfort Perception*. Berna: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18651-1>
- Fuentes Freixanet, V. A. (2004). *Ventilación natural: cálculos básicos para arquitectura*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Fundación Corona, Periódico El Tiempo, Pontificia Universidad Javeriana, & Camara de Comercio de Bogotá. (2017). *Encuesta de Percepción Ciudadana 2017. Informe encuesta de percepción ciudadana*. Bogotá.
- Galiana, L., Sancho Vendrell, J., & Llopis Reyna, A. (2011). *Acústica arquitectónica y urbanística*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- García Boscá, D., & Mora, J. (2010). *Estudio acústico generado por el tráfico de la población de L'ollería*.
- García C, A. (2017). *Componentes geométricos de las fachadas de las aulas de jardines infantiles*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- García Cardona, A. (2017). *Componentes geométricos de las fachadas de las aulas de jardines infantiles. enfoques para la consideración integrada de la ventilación, la iluminación natural y el ruido en las condiciones de Medellín*. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.
- García Cardona, A. A. (2016a). Evaluación de la incursión del viento y la iluminación a través de los vanos en aulas de jardines infantiles en Medellín , Colombia. *Revista Arquitectura y Urbanismo*, 37, 49–62.
- García Cardona, A. A. (2016b). *Evaluation of the acoustic behaviours of classrooms by account of the size and the position of the vainevaluation of the acoustic behaviours of classrooms by account of the size and the position of the vain*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2016). *Norma Técnica Colombiana 6199*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC, & Colombia. Ministerio de Educación Nacional. (2006). *Norma Técnica Colombiana 4595. Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares*. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC, & Colombia. Ministerio de Educación Nacional. (2015). *Norma Técnica Colombiana 4595. Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares*. Bogotá.

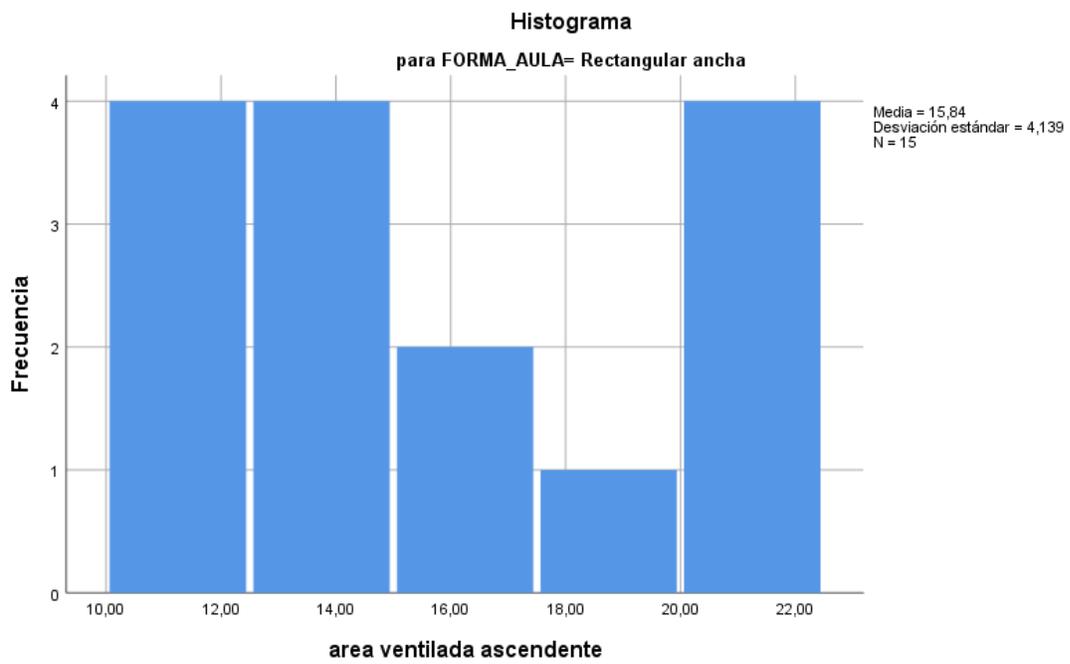
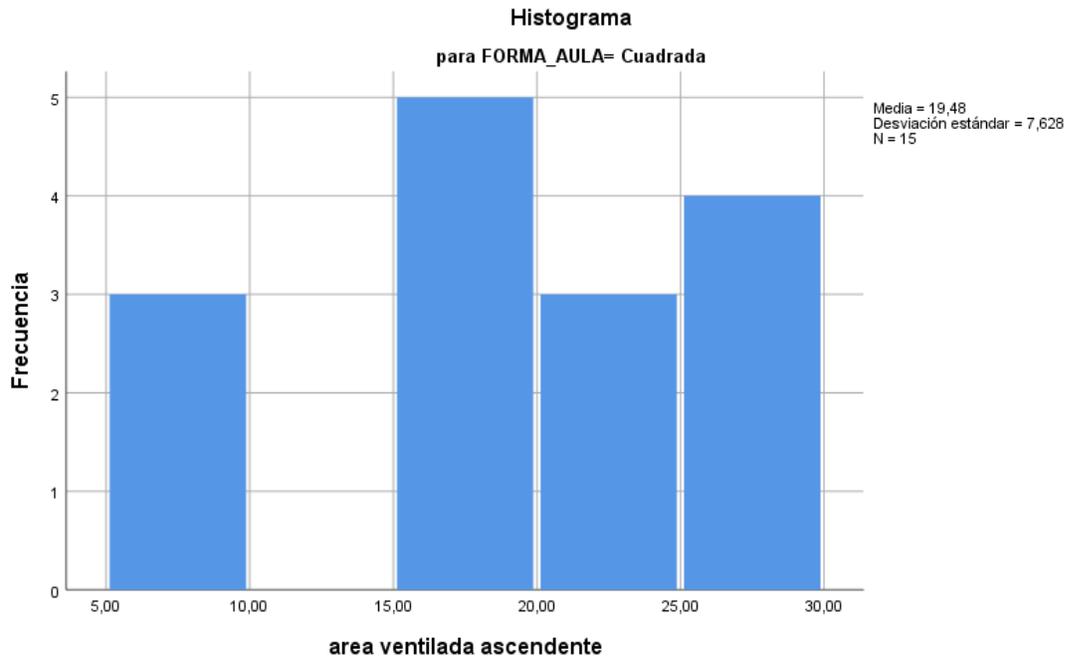
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2012). *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- International Organization for Standardization - ISO. (1996). *ISO 9613-2:1996: acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors part 2: General method of calculation*.
- Jacome, M. D. (2009). *Propuesta de diseño, acondicionamiento y aislamiento acústico para aulas de la Unidad Educativa Montebello Academy*. Universidad de las Américas.
- Jenks, M., & Burgess, R. (2000). *Compact cities: sustainable urban forms for developing countries*. London and New York: Spon Press. <https://doi.org/10.1021/es803496a>
- Jung, H. S. (2005). A prototype of an adjustable table and an adjustable chair for schools. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(10), 955–969. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.04.007>
- Magnusson, I., Pàmies, T., Romeu, J., & Arcos, R. (2014). Modelo de control activo de transmisión de ruido a través de una apertura en pared delgada. In *IX Congreso Iberoamericano de Acústica* (p. 8). Valdivia: IX Congreso Iberoamericano de Acústica.
- Marin-Restrepo, L., Morales-Maya, C., Guerrero-Teran, G., García-Cardona, A., & Waldron-Toro, J. (2015). Intelligibility Assessment in a Square Shaped Preschool Classroom According to the Grouping of Children of 3 to 5 Year of Age. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 6206–6213. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.939>
- Medina Valdez, A. (2009). *La calidad acustica arquitectonica: el ambiente acustico en edificios escolares de nivel superior*. Instituto Politécnico Nacional.
- Mínguez, A. (1998). *Ingeniería avanzada para sistemas de control de ruido acústico mediante técnicas adaptativas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Mínguez, A., Recuero, M., Sancho, J., & Pascual, J. (1999). Control activo de ruido en automovil. *TecniAcústica*, (4350), 1–7.
- Miyara, C. D. F., Miyara, F., Pasch, V., Cabanellas, S., & Yanitelli, M. (2014). Ruido y contenido semántico. *La Semana Del Sonido*, 1–12.
- Miyara, F., Pasch, V., Cabanellas, S., & Yanitelli, M. (2014). Ruido y contenido semántico. *La Semana Del Sonido*, 1–12.

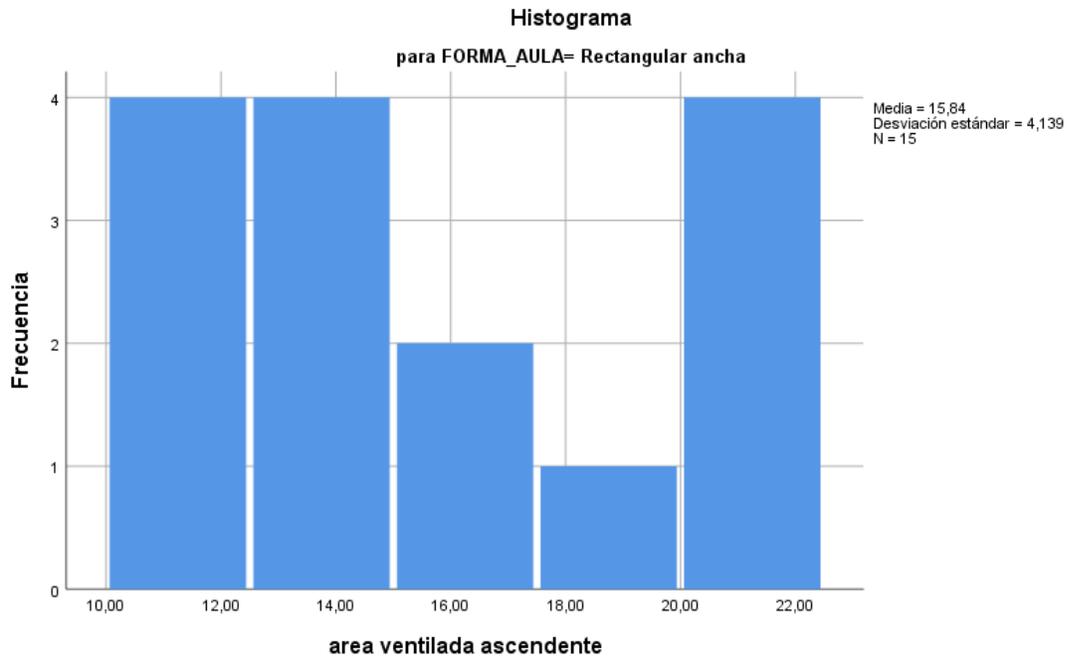
- Montazami, A., Wilson, M., & Nicol, F. (2012). Aircraft noise, overheating and poor air quality in classrooms in London primary schools. *Building and Environment*, *52*, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.019>
- Munar, E., Rosselló, J., Mas, C., Morente, P., & Quetgles, M. (2002). El desarrollo de la audición humana. *Psicothema*, *14*(2), 247–254.
- Murua, K. (2005). *Acústica para la arquitectura*.
- Narváez-Bravo, G., & León-Aristizábal, G. (2001). Caracterización y zonificación climática de la Región Andina. *Meteorología Colombiana*, (4), 121–126.
- Natarajan, S., Rodriguez, J., & Vellei, M. (2015). A field study of indoor thermal comfort in the subtropical highland climate of Bogota, Colombia. *Journal of Building Engineering*, *4*, 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.10.003>
- Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía - OSMAN. (2009). *Ruido y salud*. Andalucía: OSMAN. <https://doi.org/10.1145/2382336.2382386>
- Picción, A., Camacho, M., Cheirasco, G., Noel López, M., & Milicua, S. (2010). Estudio de campo sobre las condiciones de confort térmico y visual en edificios de enseñanza públicos en clima templado. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, *14*, 151–157.
- Roselia, L., León, P., Luz, E., & Muñoz, G. (2007). Rosalío Ávila Chaurand Dimensiones antropométricas de población latinoamericana, 281.
- Sala, E., & Rantala, L. (2016). Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland. *Applied Acoustics*, *114*, 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.009>
- Schibuola, L., Scarpa, M., & Tambani, C. (2016). Natural ventilation level assessment in a school building by CO2 concentration measures. *Energy Procedia*, *101*, 257–264.
- Secretaría de educación de Medellín. (2018). Educación en cifras.
- Secretaría de Educación de Medellín. (2018). *Educación en Cifras*. Medellín.
- Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. (2016). *Escala Beaufort y sus equivalencias*. Buenos Aires.
- Sommerhoff, J. (2012). Diseño y evaluación acústica de salas para la enseñanza. *SONAC Revista de Sonido y Acústica*, (3), 117–125.
- Sommerhoff, J., & Rosas, C. (2011). Estudio de la correlación entre STI y test de inteligibilidad subjetivo. *Estudios Filológicos*, (47), 133–147. <https://doi.org/10.4067/S0071-17132011000100008>

- Tang, S.-K. (2017). A Review on Natural Ventilation-enabling Façade Noise Control Devices for Congested High-Rise Cities. *Applied Sciences*, 7(2), 175. <https://doi.org/10.3390/app7020175>
- Teli, D., Jentsch, M. F., & James, P. A. B. (2012). Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. *Energy and Buildings*, 53, 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.022>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). *Procesamiento de Datos y Análisis Estadístico usando SPSS. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Universidad Nacional de Colombia; Área Metropolitana Valle De Aburrá. (2012). *Evaluar y monitorear la calidad del aire en el Valle de Aburra - Informe final: partículas, gases y meteorología*. Medellín. Retrieved from <https://bit.ly/2T1YNvH>
- Van Moeseke, G., Gratia, E., Reiter, S., & De Herde, A. (2005). Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities. *Energy and Buildings*, 37(8), 878–889. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.009>
- Vázquez, P. G. (2007). El desarrollo emocional en la educación. *Cuestiones Pedagógicas*, 18, 143–159.
- Velez, C., Diaz, J., Vanegas, I., Castaño, Y., & MEN. (2006). *Estándares Básicos de Competencias*.
- Wang, J., Wang, S., Zhang, T., & Battaglia, F. (2017). Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations. *Energy and Buildings*, 139, 762–779. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.070>
- Yarke, E. (2005). *Ventilación natural de edificios: Fundamentos y Métodos de Cálculo para aplicación de Ingenieros y Arquitectos*. Buenos Aires: Nobuko.
- Yepes, D. L., Gómez, M., Sánchez, L., & Jaramillo, A. C. (2009). Acoustic map making methodology as a tool for urban noise handling - Medellín case. *DYNA (Colombia)*, 76(158), 29–40.
- Yun, H., Nam, I., Kim, J., Yang, J., Lee, K., & Sohn, J. (2014). A field study of thermal comfort for kindergarten children in korea: An assessment of existing models and preferences of children. *Building and Environment*, 75, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.003>

Anexos

Anexos 1. Histogramas de viento ascendente





Nota: Fuente propia

**Anexos 2. Pruebas estadísticas de Mann-Whitney para viento ascendente**

	PROPORCION VENTANA	N	Rango promedio	Suma de rangos
area ventilada ascendente	1:2	15	17,67	265,00
	1:3	15	13,33	200,00
	Total	30		
		area ventilada ascendente		
U de Mann-Whitney		80,000		
W de Wilcoxon		200,000		
Z		-1,348		
Sig. asintótica(bilateral)		,178		
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]		,187 <sup>b</sup>		

a. Variable de agrupación: PROPORCION VENTANA

En este caso no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos prporciones de 1:2 y 1:3.

	PROPORCION VENTANA	N	Rango promedio	Suma de rangos
Área ventilada ascendente	1:2	15	13,27	199,00
	2:3	15	17,73	266,00
	Total	30		

**Estadísticos de prueba<sup>a</sup>**

	area ventilada ascendente
U de Mann-Whitney	79,000
W de Wilcoxon	199,000
Z	-1,390
Sig. asintótica(bilateral)	,165
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	,174 <sup>b</sup>

a. Variable de agrupación: PROPORCION VENTANA

	PROPORCION VENTANA	N	Rango promedio	Suma de rangos
area ventilada ascendente	1:3	15	10,60	159,00
	2:3	15	20,40	306,00
	Total	30		

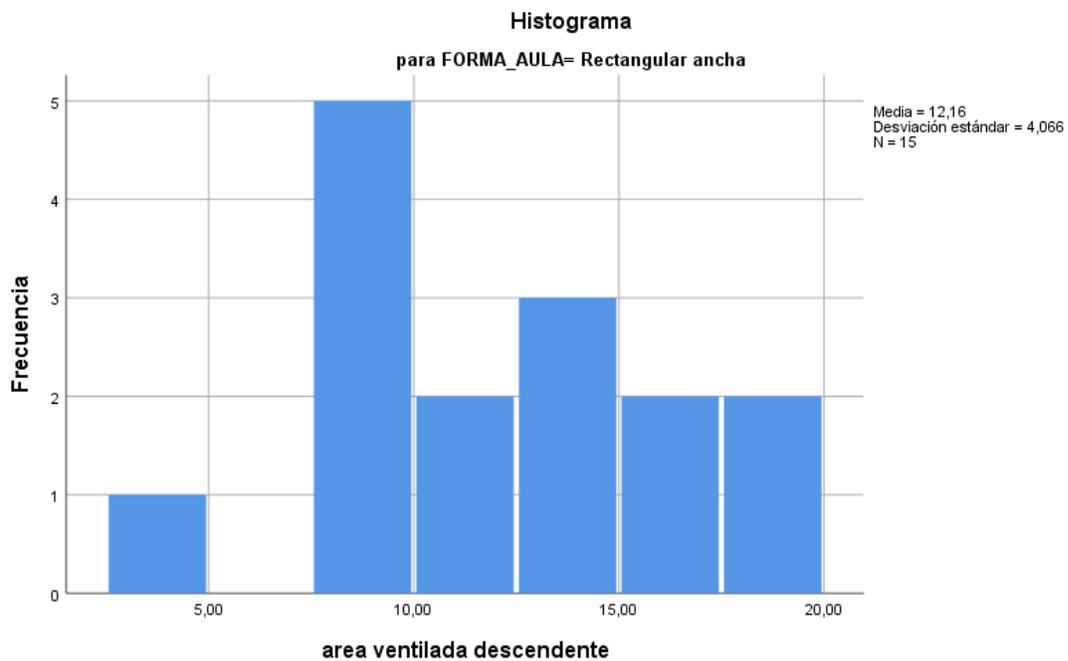
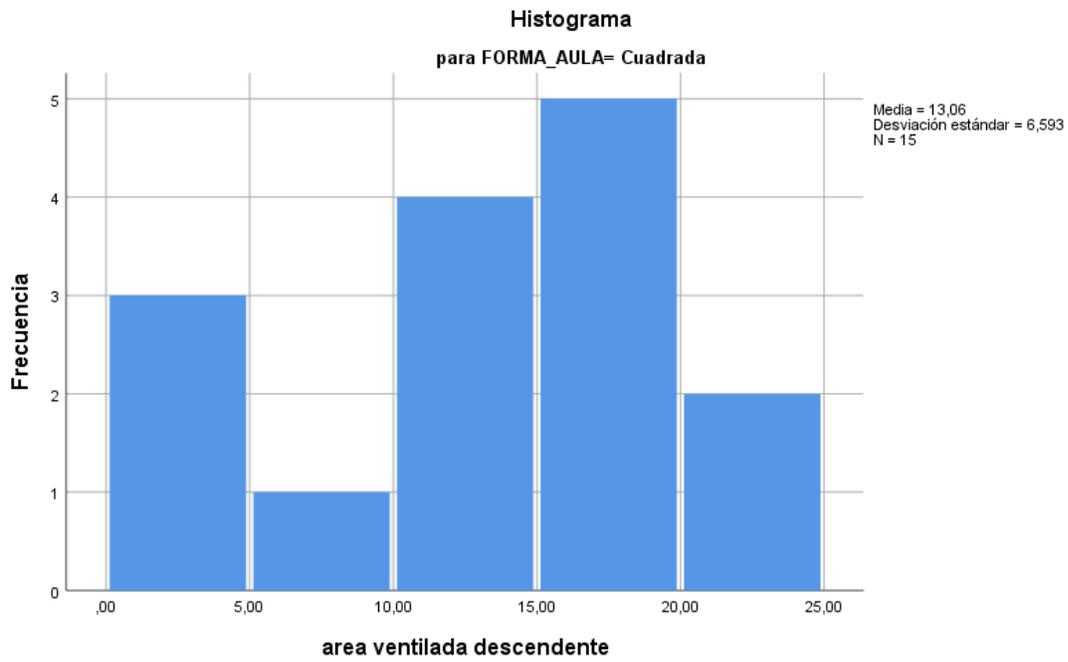
**Estadísticos de prueba<sup>a</sup>**

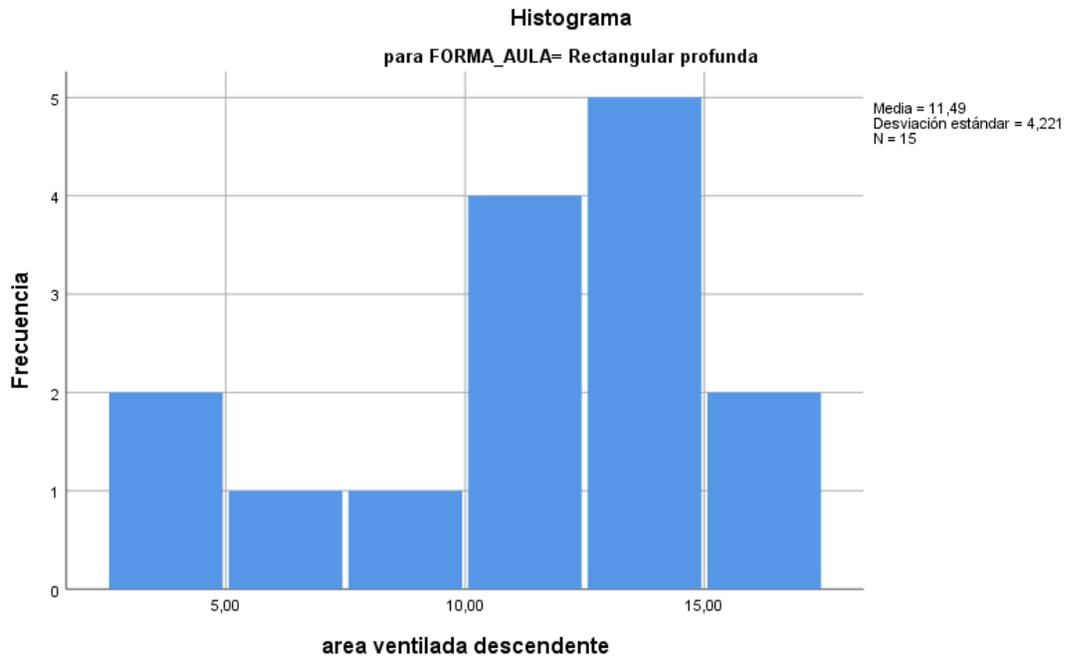
	area ventilada ascendente
U de Mann-Whitney	39,000
W de Wilcoxon	159,000
Z	-3,049
Sig. asintótica(bilateral)	,002
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	,002 <sup>b</sup>

a. Variable de agrupación: PROPORCION VENTANA

Nota: fuente propia usando software Spss

### Anexos 3. Histogramas para viento descendente





Nota: Fuente propia usando software Spss

#### Anexos 4 . Pruebas de Mann-Whitney para viento descendente

##### Rangos

	PROPORCION VENTANA	N	Rango promedio	Suma de rangos
area ventilada descendente	1:2	15	12,33	185,00
	2:3	15	18,67	280,00
	Total	30		

##### Estadísticos de prueba<sup>a</sup>

	area ventilada descendente
U de Mann-Whitney	65,000
W de Wilcoxon	185,000
Z	-1,970
Sig. asintótica(bilateral)	,049
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	,050 <sup>b</sup>

a. Variable de agrupación: PROPORCION VENTANA

a. No corregido para empates.

Se aplica la corrección de Bonferroni dividiendo el valor de la significancia (0,05) entre el número de comparaciones, que en este caso son 3 ( $0,05/3 = 0,017$ ). La significancia asintótica es de 0,049, siendo mayor que 0,017 lo cual quiere decir que no hay diferencias significativas en el área ventilada entre las proporciones 1:2 y 2:3.

<b>Rangos</b>				
	PROPORCION VENTANA	N	Rango promedio	Suma de rangos
area ventilada descendente	1:2	15	18,73	281,00
	1:3	15	12,27	184,00
	Total	30		

<b>Estadísticos de prueba<sup>a</sup></b>	
	area ventilada descendente
U de Mann-Whitney	64,000
W de Wilcoxon	184,000
Z	-2,012
Sig. asintótica(bilateral)	,044
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	,045 <sup>b</sup>

a. Variable de agrupación: PROPORCION VENTANA

b. No corregido para empates.

Aplicando la corrección de Bonferroni, se tiene que no hay diferencias significativas en el área ventilada de las proporciones 1:2 y 1:3 ya que  $0,044 > 0,017$

**Rangos**

	PROPORCION VENTANA	N	Rango promedio	Suma de rangos
area ventilada descendente	1:3	15	11,73	176,00
	2:3	15	19,27	289,00

	Total	30		
--	-------	----	--	--

Estadísticos de prueba <sup>a</sup>	
	area ventilada descendente
U de Mann-Whitney	56,000
W de Wilcoxon	176,000
Z	-2,344
Sig. asintótica(bilateral)	,019
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	,019 <sup>b</sup>

a. Variable de agrupación: PROPORCION VENTANA, b. No corregido para empates.

**Nota:** Fuente propia usando software Spss

### Anexos 5. Pruebas de normalidad a las diferentes variables aula cuadrada

	Pruebas de normalidad			Shapiro-Wilk		
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Estadístico	gl	Sig.
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,339	5	,062	,766	5	,041
area ventilada descendente	,328	5	,084	,748	5	,029
atenuación con fuente alta	,203	5	,200*	,953	5	,758
atenuación con fuente baja	,256	5	,200*	,879	5	,305

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. Cuadrada 1:2

☐

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,297	5	,171	,859	5	,226
area ventilada descendente	,338	5	,063	,802	5	,084
atenuación con fuente alta	,169	5	,200 <sup>*</sup>	,965	5	,843
atenuación con fuente baja	,206	5	,200 <sup>*</sup>	,914	5	,493

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. Cuadrada 1:3

a. Corrección de significación de Lilliefors



**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,412	5	,006	,669	5	,004
area ventilada descendente	,302	5	,152	,838	5	,158
atenuación con fuente alta	,149	5	,200 <sup>*</sup>	,986	5	,963
atenuación con fuente baja	,206	5	,200 <sup>*</sup>	,915	5	,496

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. cuadrada 2:3

a. Corrección de significación de Lilliefors



**Nota:** Fuente propia usando software Spss

### Anexo 6. Análisis de correlación sentido de flujo vs. atenuación aula cuadrada

#### Atenuación fuente baja versus viento con flujo descendente aula cuadrada 1:2

		area ventilada descendente	atenuación con fuente baja
área ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,889*
	Sig. (bilateral)		,044
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	242,952	-65,877
	Covarianza	60,738	-16,469
	N	5	5

atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,889*	1
	Sig. (bilateral)	,044	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-65,877	22,590
	Covarianza	-16,469	5,647
	N	5	5

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,911*
	Sig. (bilateral)		,032
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	285,236	-101,836
	Covarianza	71,309	-25,459
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,911*	1
	Sig. (bilateral)	,032	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-101,836	43,846
	Covarianza	-25,459	10,962
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

**atenuación fuente alta vresus viento ascendente aula cuadrada 1:2**

		atenuación con fuente baja	area ventilada ascendente
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	1	-,902*
	Sig. (bilateral)		,036
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	22,590	-72,386
	Covarianza	5,647	-18,097
	N	5	5
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	-,902*	1
	Sig. (bilateral)	,036	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-72,386	285,236
	Covarianza	-18,097	71,309
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

**atenuación fuente baja vresus viento ascendente aula cuadrada 1:2**

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,930*
	Sig. (bilateral)		,022
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,930*	1
	Sig. (bilateral)	,022	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). Aula cuadrada 1:3



		atenuación con fuente alta	area ventilada descendente
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	1	-,899*
	Sig. (bilateral)		,038
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	43,846	-92,776
	Covarianza	10,962	-23,194
	N	5	5
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	-,899*	1
	Sig. (bilateral)	,038	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	-92,776	242,952
	Covarianza	-23,194	60,738
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

**atenuacion con fuente alta y área ventilada con flujo descendente cuadrada 1:2**

		area ascendente	ventilada atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,930*
	Sig. (bilateral)		,022
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,930*	1
	Sig. (bilateral)	,022	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

**Correlacion viento ascendente con fuente baja 1:3 cuadrada**

**Correlaciones**

		area ascendente	ventilada atenuación con fuente baja
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,964**
	Sig. (bilateral)		,008
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,964**	1
	Sig. (bilateral)	,008	
	N	5	5

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

**Correlacion viento ascendente con fuente baja 1:3 cuadrada**

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,930*
	Sig. (bilateral)		,022
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,930*	1
	Sig. (bilateral)	,022	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). Aula cuadrada 1:3



		area ventilada ascendente	atenuación con fuente baja
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,964**
	Sig. (bilateral)		,008
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,964**	1
	Sig. (bilateral)	,008	
	N	5	5

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). 1:3 cuadrada



		area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,952*
	Sig. (bilateral)		,013
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,952*	1
	Sig. (bilateral)		,013
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).Aula cuadrada 1:3



		area ventilada descendente	atenuación con fuente baja
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,970**
	Sig. (bilateral)		,006
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,970**	1
	Sig. (bilateral)		,006
	N	5	5

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).Aula cuadrada 1:3



			area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
Rho de Spearman	area ventilada ascendente	Coefficiente de correlación	1,000	-,400
		Sig. (bilateral)	.	,505
		N	5	5
	atenuación con fuente alta	Coefficiente de correlación	-,400	1,000
		Sig. (bilateral)	,505	.
		N	5	5

Aula cuadrada 2:3

			area ventilada ascendente	atenuación con fuente baja
Rho de Spearman	area ventilada ascendente	Coefficiente de correlación	1,000	-,400
		Sig. (bilateral)	.	,505
		N	5	5
	atenuación con fuente baja	Coefficiente de correlación	-,400	1,000
		Sig. (bilateral)	,505	.
		N	5	5

Aula cuadrada 2:3

		atenuación con fuente baja	area ventilada descendente
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	1	-,950*
	Sig. (bilateral)		,013
	N	5	5
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	-,950*	1

Sig. (bilateral)	,013	
N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).Aula cuadrada 2:3

		area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,887*
	Sig. (bilateral)		,045
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,887*	1
	Sig. (bilateral)	,045	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).Aula cuadrada 2:3

Nota: Fuente propia usando software Spss

### Anexos 7. Pruebas de normalidad de las diferentes variables en aula rectangular ancha

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,206	5	,200*	,915	5	,501
area ventilada descendente	,425	5	,003	,652	5	,003
atenuación con fuente alta	,156	5	,200*	,980	5	,933
atenuación con fuente baja	,202	5	,200*	,922	5	,545

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. **Aula rectangular ancha 1:2**

a. Corrección de significación de Lilliefors

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,234	5	,200*	,930	5	,599
area ventilada descendente	,260	5	,200*	,905	5	,440
atenuación con fuente alta	,157	5	,200*	,980	5	,934
atenuación con fuente baja	,202	5	,200*	,923	5	,548

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. **Aula rectangular ancha 1:3**

a. Corrección de significación de Lilliefors

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,365	5	,028	,767	5	,042
area ventilada descendente	,259	5	,200*	,846	5	,182
atenuación con fuente alta	,156	5	,200*	,980	5	,935
atenuación con fuente baja	,211	5	,200*	,903	5	,427

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. **Aula rectangular ancha 2:3**

a. Corrección de significación de Lilliefors

En esta forma de aula solo dos variables no tienen un comportamiento normales : área ventilada descendente en proporción 1:2 y área ventilada ascendente proporción 2:3, donde se aplicará el coeficiente de Spearman,

**Anexos 8. Correlaciones sentido de flujo vs. tamaño aula rectangular ancha**

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,738
	Sig. (bilateral)		,155
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,738	1
	Sig. (bilateral)	,155	
	N	5	5

**Aula rectangular ancha 1:2**

**Correlaciones**

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente baja
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,801
	Sig. (bilateral)		,103
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	15,085	-16,495
	Covarianza	3,771	-4,124
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,801	1

Sig. (bilateral)	,103	
Suma de cuadrados y productos vectoriales	-16,495	28,099
Covarianza	-4,124	7,025
N	5	5

Aula rectangular ancha 1:2

			atenuación con fuente baja	area ventilada descendente
Rho de Spearman	atenuación con fuente baja	Coefficiente de correlación	1,000	-,600
		Sig. (bilateral)	.	,285
		N	5	5
area ventilada descendente	atenuación con fuente baja	Coefficiente de correlación	-,600	1,000
		Sig. (bilateral)	,285	.
		N	5	5

Aula rectangular ancha 1:2

			area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
Rho de Spearman	area ventilada descendente	Coefficiente de correlación	1,000	-,600
		Sig. (bilateral)	.	,285
		N	5	5
atenuación con fuente alta	area ventilada descendente	Coefficiente de correlación	-,600	1,000
		Sig. (bilateral)	,285	.
		N	5	5

Aula rectangular ancha 1:2

			area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	1	-,860
		Sig. (bilateral)		,062
		N	5	5
atenuación con fuente alta	area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	-,860	1
		Sig. (bilateral)	,062	
		N	5	5

Aula rectangular ancha 1:3

			area ventilada ascendente	atenuación con fuente baja
area ventilada ascendente	atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	1	-,913*
		Sig. (bilateral)		,030

	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,913*	1
	Sig. (bilateral)	,030	
	N	5	5

Aula rectangular ancha 1:3

		atenuación con fuente baja	area ventilada descendente
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	1	-,933*
	Sig. (bilateral)		,021
	N	5	5
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	-,933*	1
	Sig. (bilateral)	,021	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Aula rectangular ancha 1:3

		area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,877
	Sig. (bilateral)		,051
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,877	1
	Sig. (bilateral)	,051	
	N	5	5

Aula rectangular ancha 1:3

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
Rho de Spearman	area ventilada ascendente	Coefficiente de correlación	1,000
		Sig. (bilateral)	,624
		N	5
	atenuación con fuente alta	Coefficiente de correlación	-,300
		Sig. (bilateral)	,624
		N	5

Aula rectangular ancha 2:3

			area ventilada ascendente	atenuación con fuente baja
Rho de Spearman	area ventilada ascendente	Coefficiente de correlación	1,000	-,300
		Sig. (bilateral)	.	,624
		N	5	5
	atenuación con fuente baja	Coefficiente de correlación	-,300	1,000
		Sig. (bilateral)	,624	.
		N	5	5

Aula rectangular ancha 2:3

			atenuación con fuente baja	area ventilada descendente
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	1		-,891*
	Sig. (bilateral)			,043
	N	5	5	5
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	-,891*	1	
	Sig. (bilateral)	,043		
	N	5	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Aula rectangular ancha 2:3

			area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1		-,798
	Sig. (bilateral)			,106
	N	5	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,798	1	
	Sig. (bilateral)	,106		
	N	5	5	5

Aula rectangular ancha 2:3

**Nota :** Fuente Propia usando software Spss

**Anexos 9. Pruebas de normalidad para las diferentes variables en aula rectangular profunda**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,179	5	,200*	,956	5	,779

area ventilada descendente	,340	5	,060	,760	5	,036
atenuación con fuente alta	,176	5	,200*	,965	5	,844
atenuación con fuente baja	,237	5	,200*	,917	5	,514

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. **Aula profunda 1:2**

a. Corrección de significación de Lilliefors

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
area ventilada ascendente	,162	5	,200*	,973	5	,894
area ventilada descendente	,395	5	,010	,715	5	,014
atenuación con fuente alta	,166	5	,200*	,966	5	,852
atenuación con fuente baja	,214	5	,200*	,898	5	,398

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. **Aula profunda 1:3**

a. Corrección de significación de Lilliefors

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
area ventilada ascendente	,213	5	,200*	,899	5	,406
area ventilada descendente	,230	5	,200*	,892	5	,366
atenuación con fuente alta	,208	5	,200*	,957	5	,785
atenuación con fuente baja	,278	5	,200*	,870	5	,266

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. **Aula profunda 2:3**

**Nota:** Fuente propia usando software Spss

Solo los datos de área ventilada descendente en proporción 1:3 tienen un comportamiento no normal el resto son normales, se aplica solo Spearman en este caso

**Anexos 10. Correlaciones tamaño vs. sentido del flujo aula rectangular profunda**

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,959**
	Sig. (bilateral)		,010
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,959**	1
	Sig. (bilateral)	,010	
	N	5	5

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). **Aula rectangular profunda 1:2**

		atenuación con fuente baja	area ventilada descendente
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	1	-,924*
	Sig. (bilateral)		,025
	N	5	5
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	-,924*	1
	Sig. (bilateral)	,025	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). **Aula rectangular profunda 1:2**

		area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,847
	Sig. (bilateral)		,070
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,847	1
	Sig. (bilateral)	,070	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). **Aula rectangular profunda 1:2**

		area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,847
	Sig. (bilateral)		,070
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,847	1
	Sig. (bilateral)	,070	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). **Aula rectangular profunda 1:2**

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,997**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,997**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). **Aula rectangular profunda 1:3**

		area ventilada ascendente	atenuación con fuente baja
--	--	------------------------------	-------------------------------

area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,982**
	Sig. (bilateral)		,003
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,982**	1
	Sig. (bilateral)	,003	
	N	5	5

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). **Aula rectangular profunda 1:3**

			atenuación con fuente baja	area ventilada descendente
Rho de Spearman	atenuación con fuente baja	Coefficiente de correlación	1,000	-,400
		Sig. (bilateral)	.	,505
		N	5	5
	area ventilada descendente	Coefficiente de correlación	-,400	1,000
		Sig. (bilateral)	,505	.
		N	5	5

**Aula rectangular profunda 1:3**

			area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
Rho de Spearman	area ventilada descendente	Coefficiente de correlación	1,000	-,400
		Sig. (bilateral)	.	,505
		N	5	5
	atenuación con fuente alta	Coefficiente de correlación	-,400	1,000
		Sig. (bilateral)	,505	.
		N	5	5

			area ventilada ascendente	atenuación con fuente alta
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1	-,987**	
	Sig. (bilateral)		,002	
	N	5	5	
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,987**	1	
	Sig. (bilateral)	,002		
	N	5	5	

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). **Aula rectangular profunda 2:3**

		atenuación con fuente baja	area ventilada descendente
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	1	-,991
	Sig. (bilateral)		,00
	N	5	
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	-,991**	
	Sig. (bilateral)	,001	
	N	5	

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). **Aula rectangular profunda 2:3**

		area ventilada descendente	atenuación con fuente alta
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	-,981**
	Sig. (bilateral)		,003
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,981**	1
	Sig. (bilateral)	,003	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). **Aula rectangular profunda 2:3**

Nota: Fuente propia usando software Spss

### Anexos 11. Correlaciones Porcentaje de la abertura versus sentido del flujo

#### Aula cuadrada

		area ascendente	ventilada	PORCENTAJE ABERTURA
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	1		,904*
	Sig. (bilateral)			,035
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	285,236		48,260
	Covarianza	71,309		12,065
	N	5		5

PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	,904*	1
	Sig. (bilateral)	,035	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	48,260	10,000
	Covarianza	12,065	2,500
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral)

		PORCENTAJE ABERTURA	area ventilada descendente
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	,899*
	Sig. (bilateral)		,038
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	10,000	44,320
	Covarianza	2,500	11,080
	N	5	5
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	,899*	1
	Sig. (bilateral)	,038	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	44,320	242,952
	Covarianza	11,080	60,738
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

		atenuación con fuente alta	PORCENTAJE ABERTURA
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	1	-,991**
	Sig. (bilateral)		,001
	N	5	5
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	-,991**	1
	Sig. (bilateral)	,001	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente baja
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,959**
	Sig. (bilateral)		,010
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,959**	1
	Sig. (bilateral)	,010	
	N	5	5

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

### Aula rectangular ancha

			PORCENTAJE ABERTURA	area ventilada ascendente
Rho de Spearman	PORCENTAJE ABERTURA	Coefficiente de correlación	1,000	,300
		Sig. (bilateral)	.	,624
		N	5	5
area ventilada ascendente		Coefficiente de correlación	,300	1,000
		Sig. (bilateral)	,624	.
		N	5	5

			area ventilada descendente	PORCENTAJE ABERTURA
area ventilada descendente		Correlación de Pearson	1	,713
		Sig. (bilateral)		,176
		N	5	5
PORCENTAJE ABERTURA		Correlación de Pearson	,713	1
		Sig. (bilateral)	,176	
		N	5	5

### Aula rectangular profunda

			area ventilada descendente	PORCENTAJE ABERTURA
area ventilada descendente		Correlación de Pearson	1	,950*

	Sig. (bilateral)		,013
	N	5	5
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	,950*	1
	Sig. (bilateral)	,013	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

		PORCENTAJE ABERTURA	area ventilada ascendente
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	,967**
	Sig. (bilateral)		,007
	N	5	5
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	,967**	1
	Sig. (bilateral)	,007	
	N	5	5

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

		PORCENTAJE ABERTURA	area ventilada ascendente
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	,922*
	Sig. (bilateral)		,026
	N	5	5
area ventilada ascendente	Correlación de Pearson	,922*	1
	Sig. (bilateral)	,026	
	N	5	5

		area ventilada descendente	PORCENTAJE ABERTURA
area ventilada descendente	Correlación de Pearson	1	,767
	Sig. (bilateral)		,131
	N	5	5
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	,767	1
	Sig. (bilateral)	,131	
	N	5	5

☐

**Anexos 12. Correlación Tamaño vs. atenuación**

**Aula cuadrada**

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente alta
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,984**
	Sig. (bilateral)		,002
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,984**	1
	Sig. (bilateral)	,002	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente baja
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,959**
	Sig. (bilateral)		,010
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,959**	1
	Sig. (bilateral)	,010	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

**Aula rectangular ancha**

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente alta
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,989**
	Sig. (bilateral)		,001
	N	5	5

atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,989**	1
	Sig. (bilateral)	,001	
	N	5	5

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente baja
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,948*
	Sig. (bilateral)		,014
	N	5	
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,948*	
	Sig. (bilateral)	,014	
	N	5	

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).



		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente baja
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,963**
	Sig. (bilateral)		,009
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,963**	1
	Sig. (bilateral)	,009	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente alta
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,989**
	Sig. (bilateral)		,001
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,989**	1
	Sig. (bilateral)	,001	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

**Aula rectangular profunda**

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente alta
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,989**
	Sig. (bilateral)		,001
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,989**	1
	Sig. (bilateral)	,001	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). **Aula rectangular profunda 1:2**

		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente baja
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,953*
	Sig. (bilateral)		,012
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,953*	1
	Sig. (bilateral)	,012	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).



		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente alta
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,984**
	Sig. (bilateral)		,002
	N	5	5
atenuación con fuente alta	Correlación de Pearson	-,984**	1
	Sig. (bilateral)	,002	
	N	5	5

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).



		PORCENTAJE ABERTURA	atenuación con fuente baja
PORCENTAJE ABERTURA	Correlación de Pearson	1	-,952*
	Sig. (bilateral)		,012
	N	5	5
atenuación con fuente baja	Correlación de Pearson	-,952*	1
	Sig. (bilateral)	,012	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).



**Anexos 13. Datos de áreas ventiladas y atenuaciones sonoras**

PROPORCION	cuadrada			
	areaVen	ASCE	atF.F. ALTA	ATF.F. BAJA
1/2.20%	6,95	30,29	21,49	
1/2.40%	7,63	26,73	18,51	
1/2.60%	22,05	24,45	16,75	
1/2.80%	21,89	23,30	16,13	
1/2.100%	<b>23,95</b>	21,81	15,65	
1/3.20%	17,32	30,90	22,10	
1/3.40%	18,40	27,37	19,14	
1/3.60%	19,27	25,07	17,37	
1/3.80%	19,50	23,30	16,13	
1/3.100%	19,20	21,81	15,65	
2/3.20%	5,25	30,91	22,11	
2/3.40%	26,67	27,36	19,13	
2/3.60%	28,84	25,08	17,38	
2/3.80%	29,15	23,30	16,14	
2/3.100%	26,07	21,81	15,65	

PROPORCION	rectangular		ATE.BAJA
	area	ancha	
	VENTANA	ALTA	
1/2.20%	11,84	30,91	22,11
1/2.40%	12,40	27,54	19,13
1/2.60%	15,68	25,36	17,37
1/2.80%	16,24	23,68	16,13
1/2.100%	14,22	21,81	15,54
1/3.20%	11,98	30,90	22,10
1/3.40%	12,21	27,56	19,14
1/3.60%	12,60	25,36	17,37
1/3.80%	12,70	23,68	16,13
1/3.100%	12,50	21,81	15,54
2/3.20%	17,78	30,91	22,85
2/3.40%	21,36	27,55	19,13
2/3.60%	22,42	25,37	17,38
2/3.80%	22,30	23,69	16,14
2/3.100%	21,35	21,81	15,54

PROPORCION	rectangular		profunda
	area	vent	ASCE
		at	ALTA
		AT	BAJA
1/2.20%	12,27	30,91	22,11
1/2.40%	20,58	27,54	19,13
1/2.60%	26,06	24,55	17,37
1/2.80%	<b>33,08</b>	22,61	16,75
1/2.100%	30,05	20,94	15,84
1/3.20%	11,54	30,90	22,10
1/3.40%	12,05	27,02	19,14
1/3.60%	12,29	24,55	17,37
1/3.80%	12,64	22,60	16,13
1/3.100%	12,85	20,94	15,84
2/3.20%	7,18	30,30	21,50
2/3.40%	15,45	27,01	19,13
2/3.60%	23,71	23,94	16,76
2/3.80%	30,57	22,61	16,14
2/3.100%	30,70	20,94	15,84

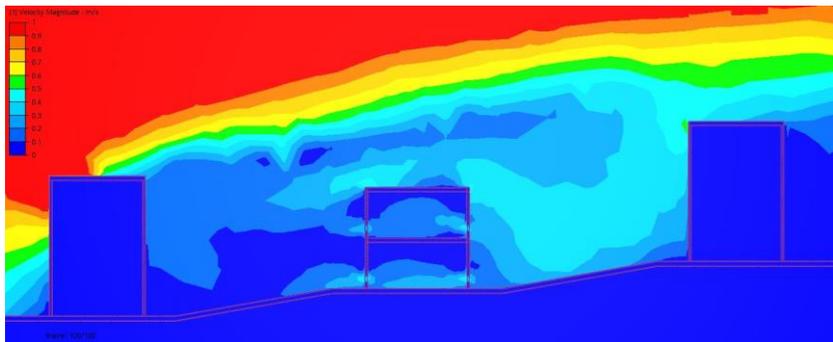
	cuadrada			
PROPORCION	areaVent	DESC	atTA ALTA	ATTA BAJA
1/2.20%		2,88	30,29	21,49
1/2.40%		2,75	26,73	18,51
1/2.60%		16,05	24,45	16,75
1/2.80%		17,03	23,30	16,13
1/2.100%		17,90	21,81	15,65
1/3.20%		9,35	30,90	22,10
1/3.40%		10,50	27,37	19,14
1/3.60%		12,25	25,07	17,37
1/3.80%		12,40	23,30	16,13
1/3.100%		12,35	21,81	15,65
2/3.20%		2,57	30,91	22,11
2/3.40%		16,55	27,36	19,13
2/3.60%		19,12	25,08	17,38
2/3.80%		23,72	23,30	16,14
2/3.100%		20,54	21,81	15,65

	rectangularancha		
PROPORCION	VENDESC	atFALTA	ATEBAJA
1/2.20%	3,97	30,91	22,11
1/2.40%	12,44	27,54	19,13
1/2.60%	13,44	25,36	17,37
1/2.80%	13,40	23,68	16,13
1/2.100%	12,50	21,81	15,54
1/3.20%	8,12	30,90	22,10
1/3.40%	9,47	27,56	19,14
1/3.60%	9,80	25,36	17,37
1/3.80%	10,50	23,68	16,13
1/3.100%	9,90	21,81	15,54
2/3.20%	9,45	30,91	22,85
2/3.40%	15,37	27,55	19,13
2/3.60%	18,84	25,37	17,38
2/3.80%	18,77	23,69	16,14
2/3.100%	16,41	21,81	15,54

PROPORCION	rectangular profunda		ATF.BAJA
	VENTADESC	ATF.ALTA	
1/2.20%	4,67	30,91	22,11
1/2.40%	12,35	27,54	19,13
1/2.60%	14,93	24,55	17,37
1/2.80%	13,50	22,61	16,75
1/2.100%	14,20	20,94	15,84
1/3.20%	6,17	30,90	22,10
1/3.40%	11,47	27,02	19,14
1/3.60%	12,30	24,55	17,37
1/3.80%	12,50	22,60	16,13
1/3.100%	11,40	20,94	15,84
2/3.20%	3,17	30,30	21,50
2/3.40%	7,82	27,01	19,13
2/3.60%	13,79	23,94	16,76
2/3.80%	17,24	22,61	16,14
2/3.100%	16,78	20,94	15,84

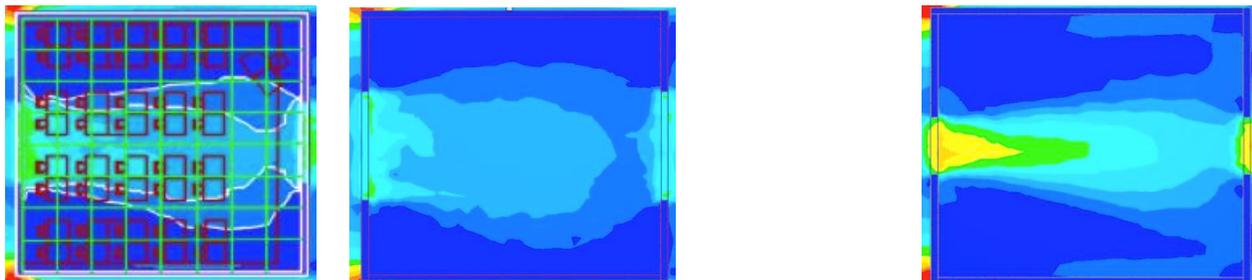
El comportamiento de la ventilación se tuvo en cuenta las corrientes ascendentes y descendentes que existen en el Valle de Aburrá y la conformación urbana predominante de máximo 3 pisos en los sitios donde encuentran la mayoría de los colegios de Medellín, se evaluaron los tres tipos de geometría propuestos : aula rectangular ancha(RA), aula rectangular profunda (RP), y aula cuadrada (C), localizando los salones de primaria en primer piso como lo seguiré colegios 10(Calle & Bogot, 2014.)

**Anexos 14. Simulaciones con software CFD de Autodesk**

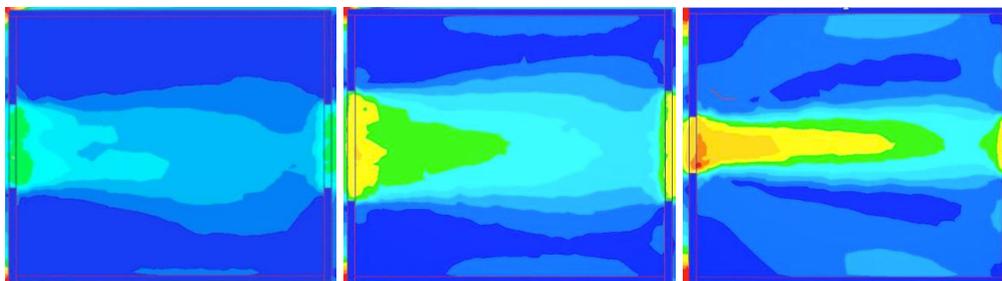


Sección corriente ascendente elaboración propia

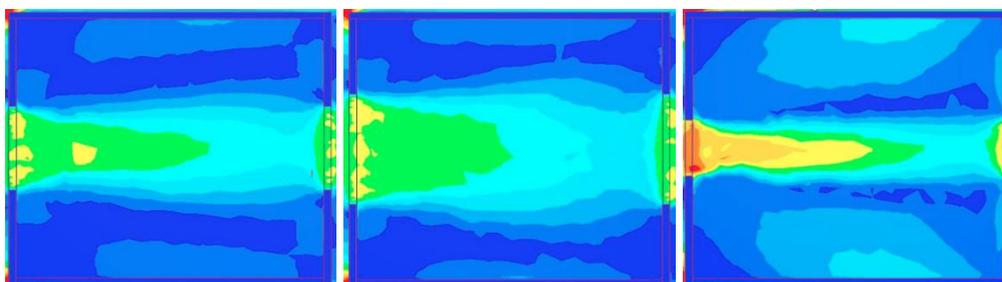
Simulaciones por tipo de aula y porcentaje de abertura ascendente



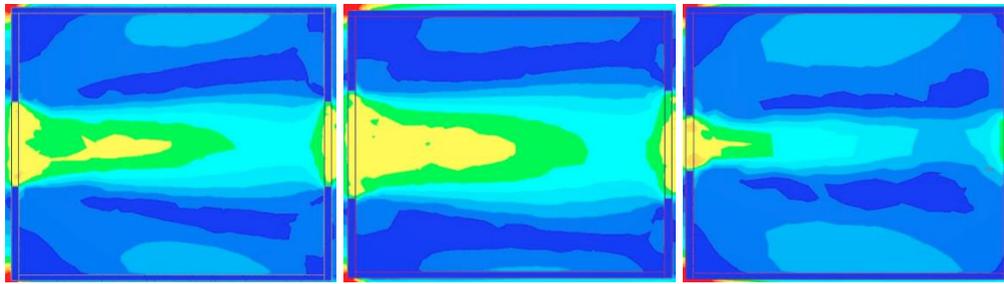
1/2 20% de abertura aula C 2/3 20% de abertura aula C 1/3 20% de abertura aula C



1/2 40% de abertura aula C 2/3 40% de abertura aula C 1/3 40% de abertura aula C



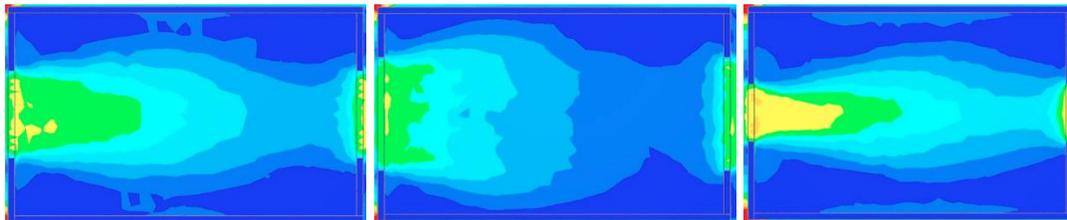
1/2 60% de abertura aula C 2/3 60% de abertura aula C 1/3 60% de abertura aula C



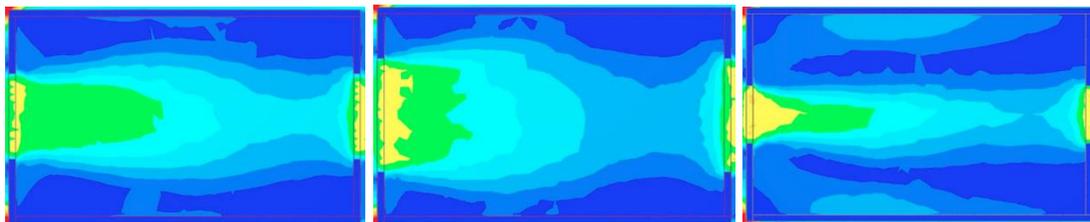
1/2 80% de abertura aula C 2/3 80% de abertura aula C 1/3 80% de abertura aula C



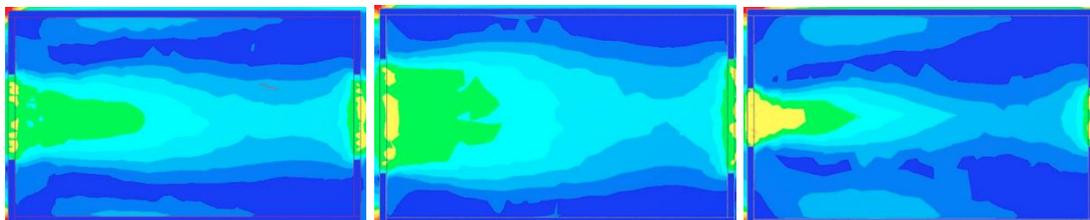
1/2 20% de abertura aula RP 2/3 20% de abertura aula RP 1/3 20% de abertura aula RP



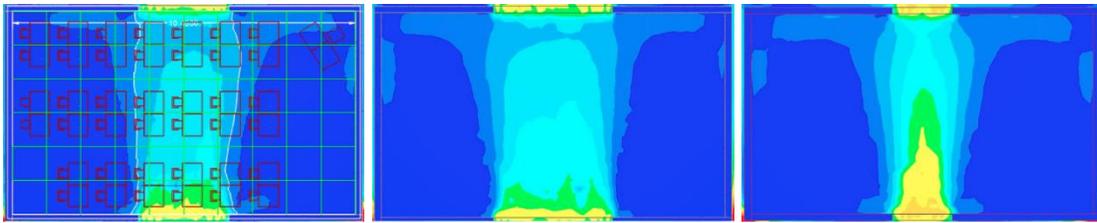
1/2 40% de abertura aula RP 2/3 40% de abertura aula RP 1/3 40% de abertura aula RP



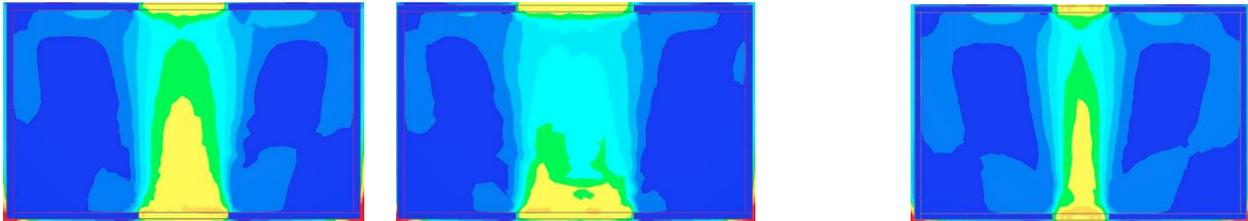
1/2 60% de abertura aula RP 2/3 60% de abertura aula RP 1/3 60% de abertura aula RP



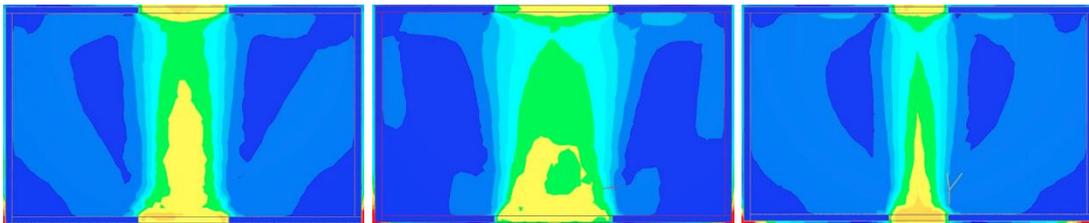
1/2 80% de abertura aula RP 2/3 60% de abertura aula RP 1/3 80% de abertura aula RP



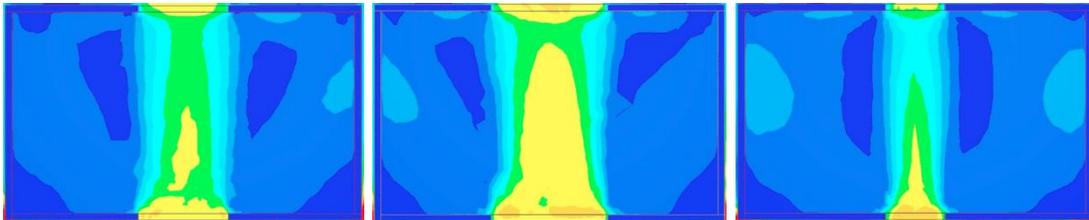
1/2 20% de abertura aula RA 2/3 20% de abertura aula RA 1/3 20% de abertura aula RA



1/2 40% de abertura aula RA 2/3 40% de abertura aula RA 1/3 20% de abertura aula RA

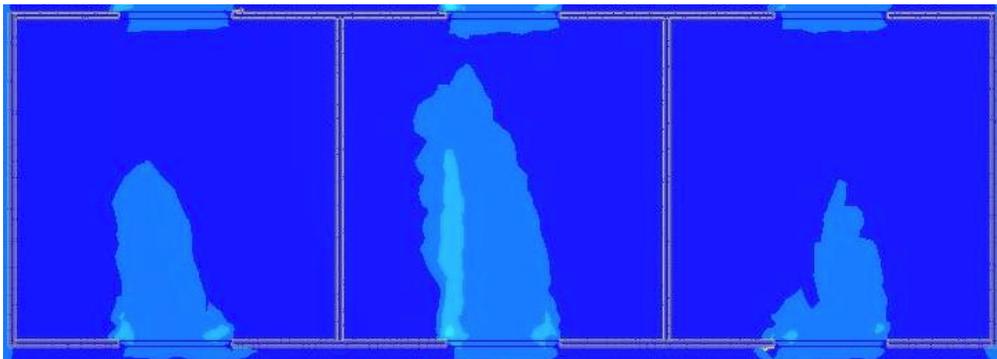


1/2 60% de abertura aula RA 2/3 60% de abertura aula RA 1/3 60% de abertura aula RA

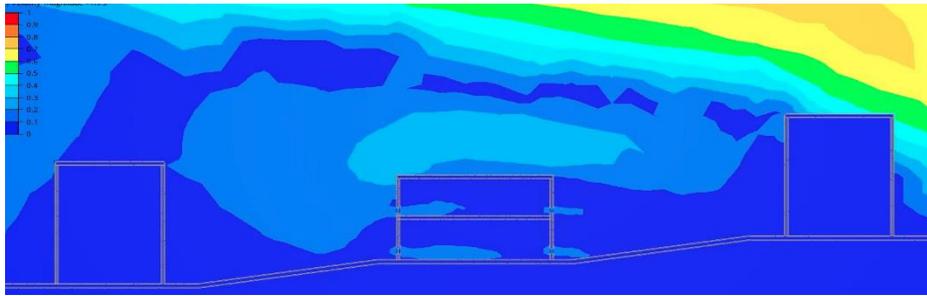


1/2 80% de abertura aula RA 2/3 80% de abertura aula RA 1/3 80% de abertura aula RA

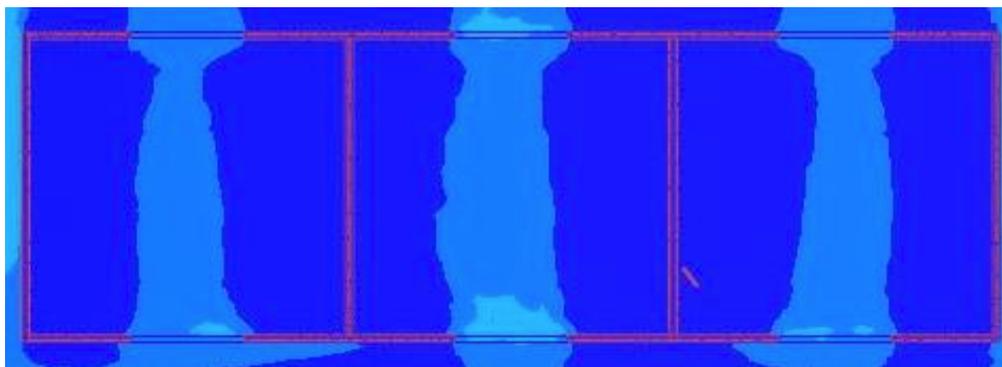
Igualmente se hicieron simulaciones con viento descendente, teniendo en cuenta tanto en las simulaciones ascendentes y descendentes el efecto que puede causar las presiones negativas en los extremos de los volúmenes, por lo tanto se evaluó el aula central y no la de los extremos



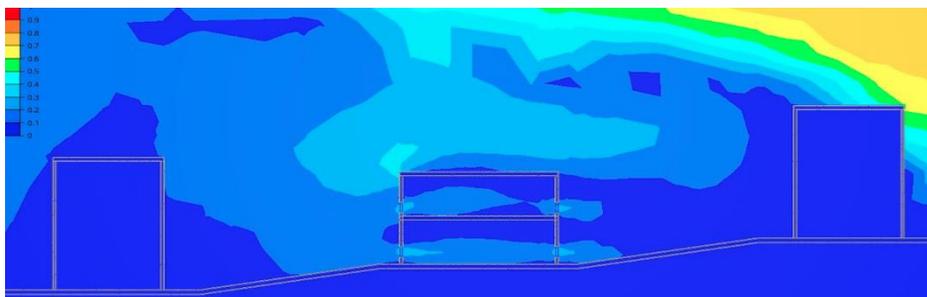
abertura del 20% aula cuadrada forma 2/3 planta



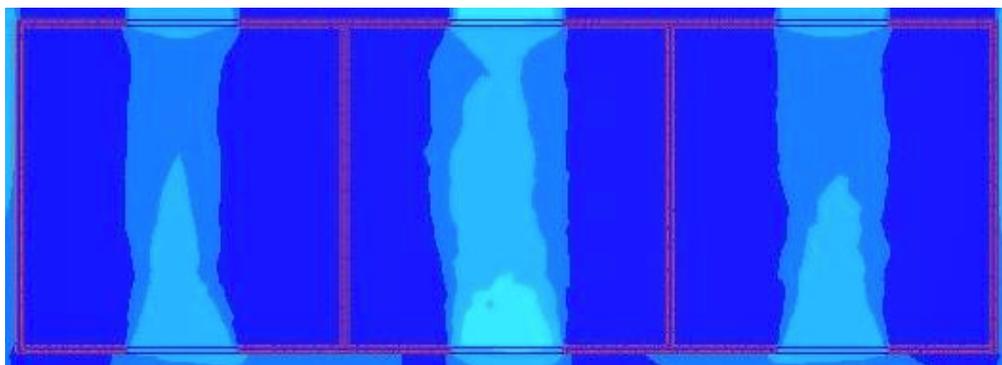
sección 2/3 abertura 20% aula cuadrada viento descendente



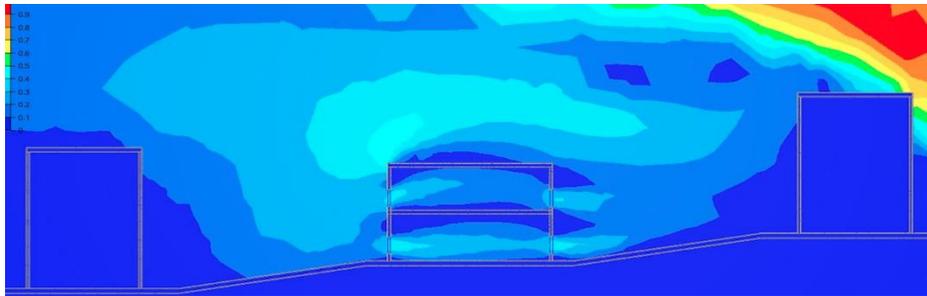
abertura del 40% aula cuadrada forma 2/3 planta descendente



sección 2/3 abertura 40% aula cuadrada viento descendente



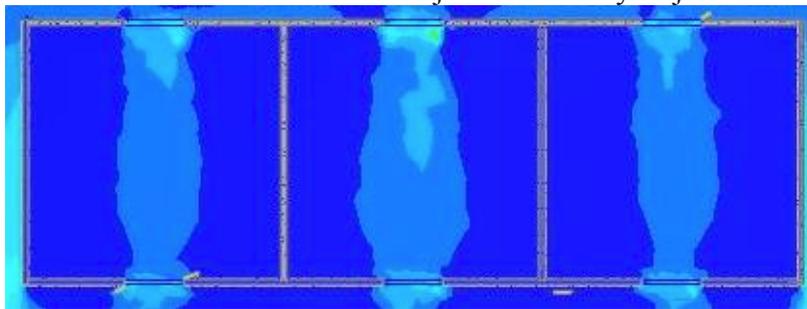
abertura del 60% aula cuadrada forma 2/3 planta descendente



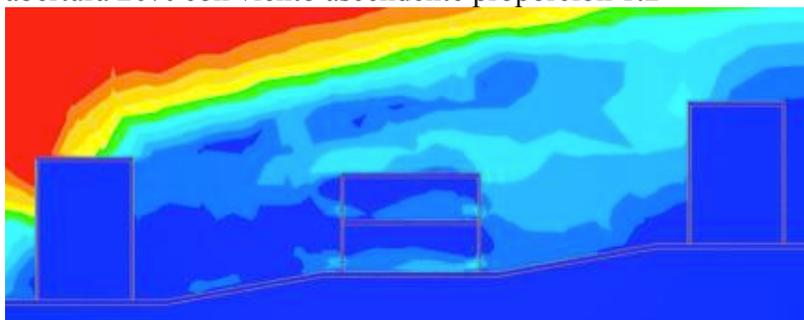
sección 2/3 abertura 60% aula cuadrada viento descendente

**Nota** : Fuente propia usando software CFD de Autodesk

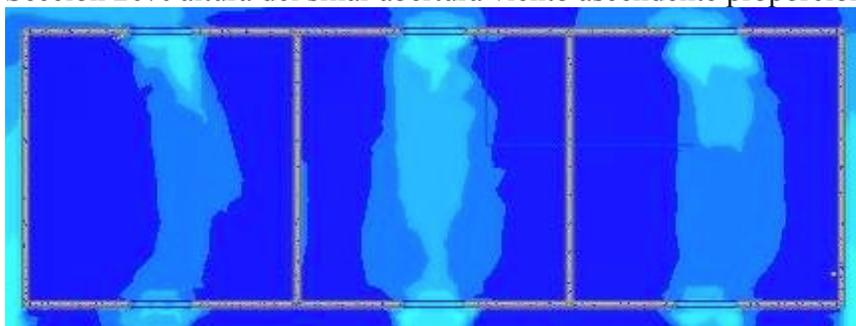
Simulaciones con aula cuadrada usando el vano sugerido por la NTC 4595 2015, se hace 30 simulaciones en total con flujo ascendente y flujo descendente



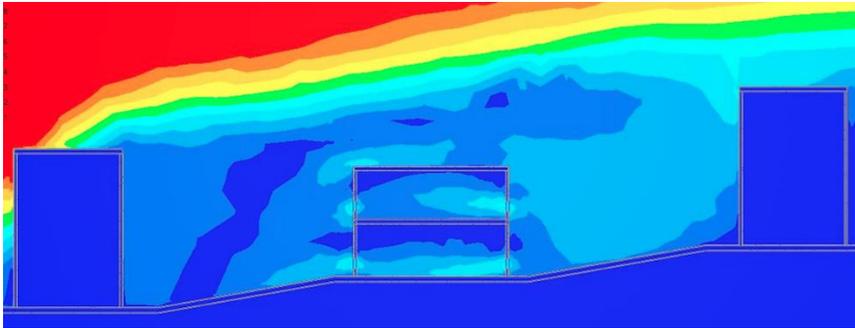
abertura 20% con viento ascendente proporción 1:2



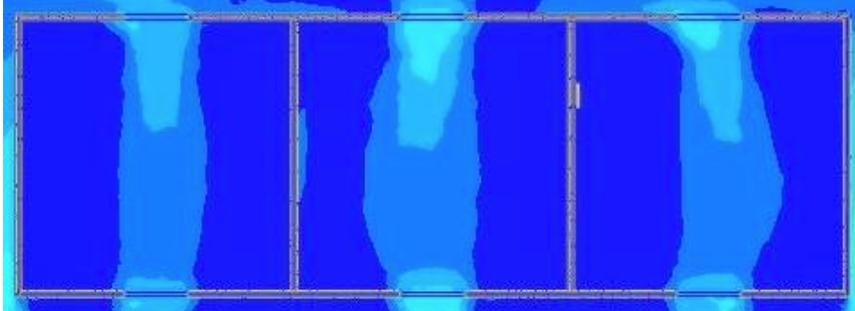
Sección 20% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



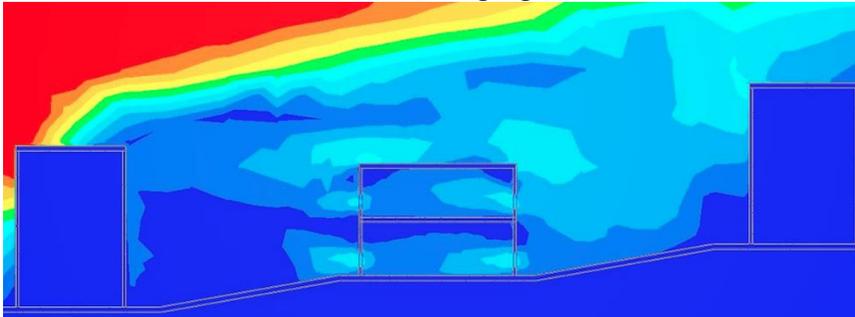
Abertura 40% con viento ascendente proporción 1:2



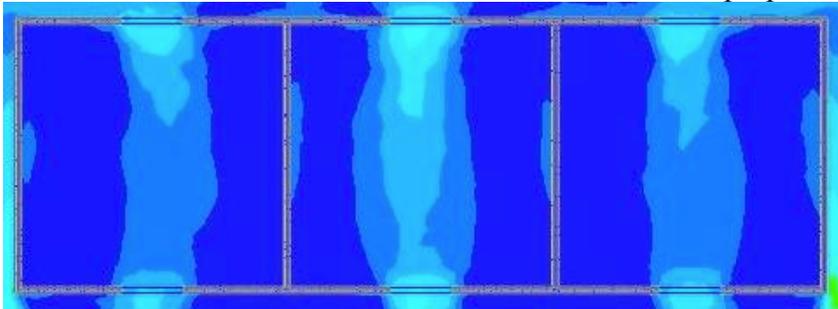
Sección 40% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



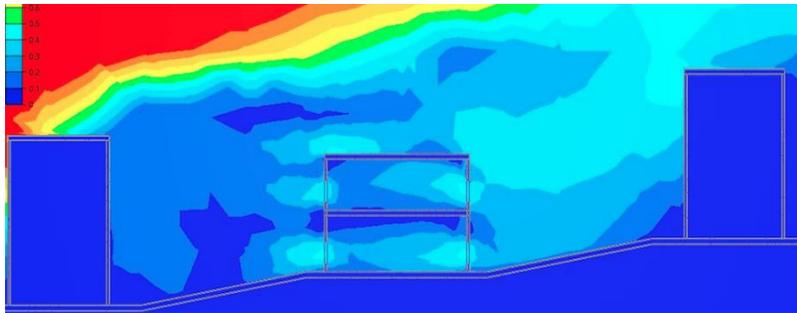
Abertura 60% con viento ascendente proporción 1:2



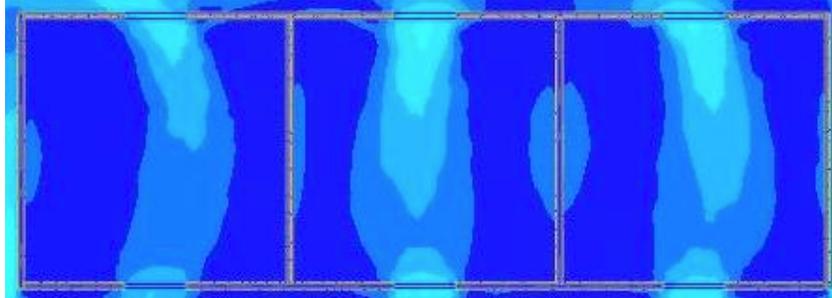
Sección 60% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



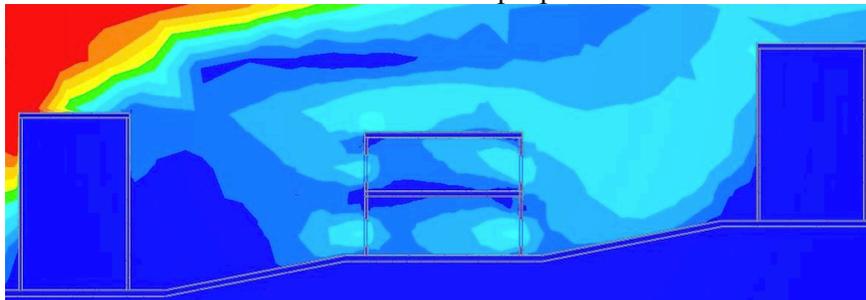
Abertura 80% con viento ascendente proporción 1:2



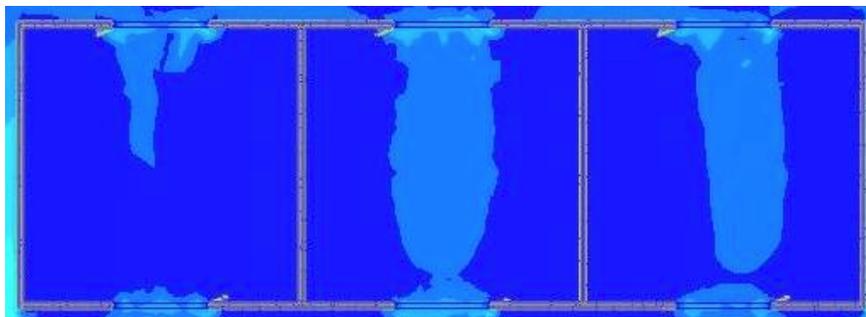
Sección 80% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



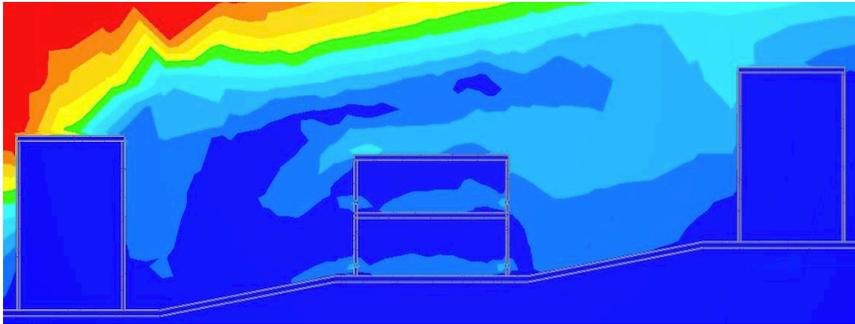
Abertura 100% con viento ascendente proporción 1:2



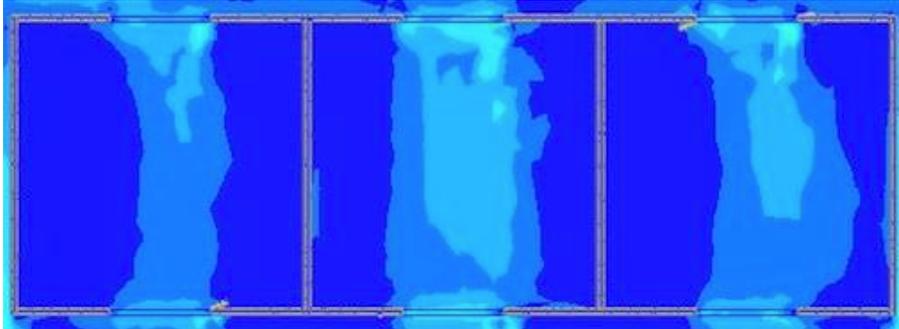
Sección 100% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



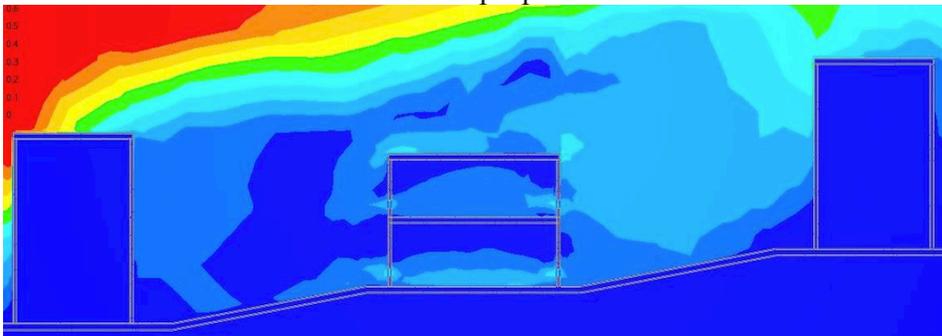
abertura 20% con viento ascendente proporción 1:3



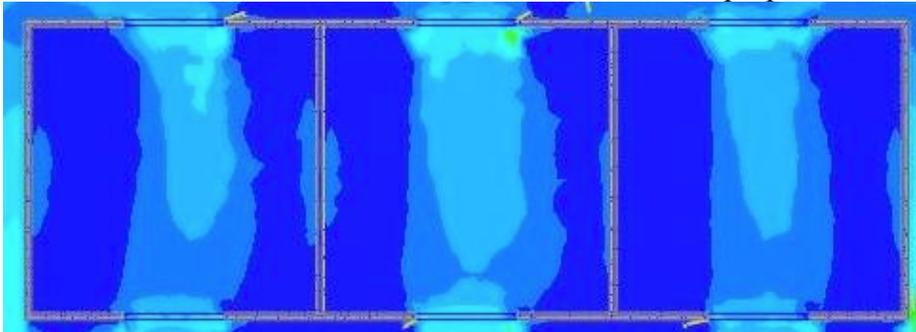
Sección 20% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:3



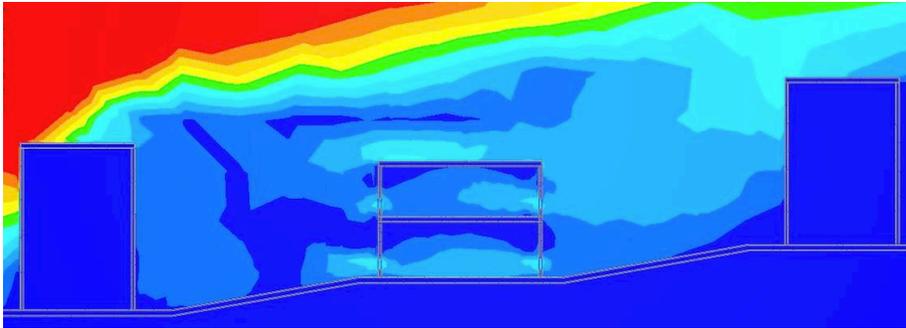
Abertura 40% con viento ascendente proporción 1:3



Sección 40% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:3



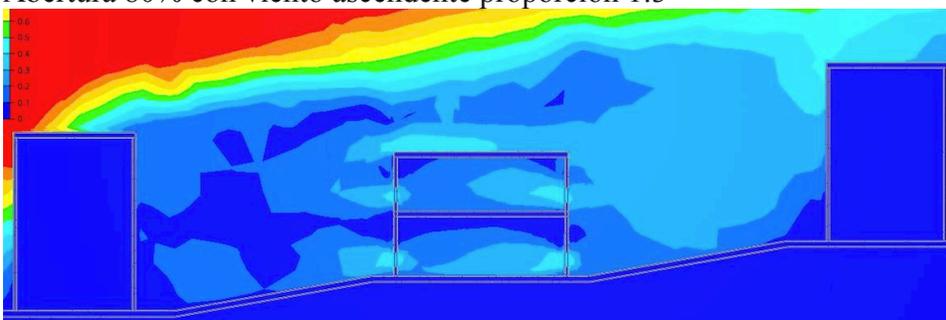
Abertura 60% con viento ascendente proporción 1:3



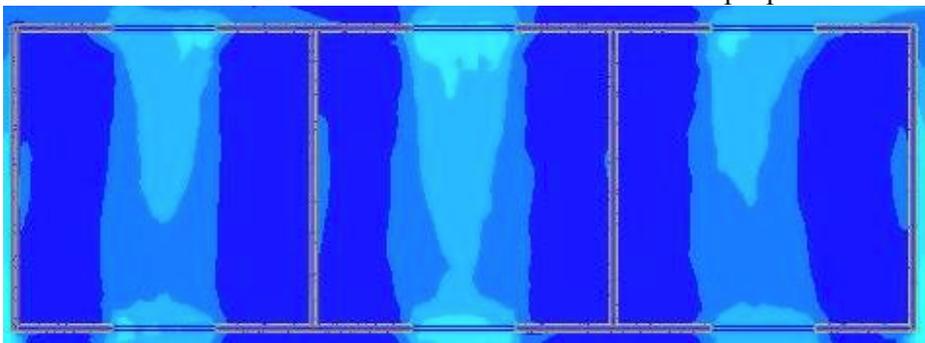
Sección 60% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:3



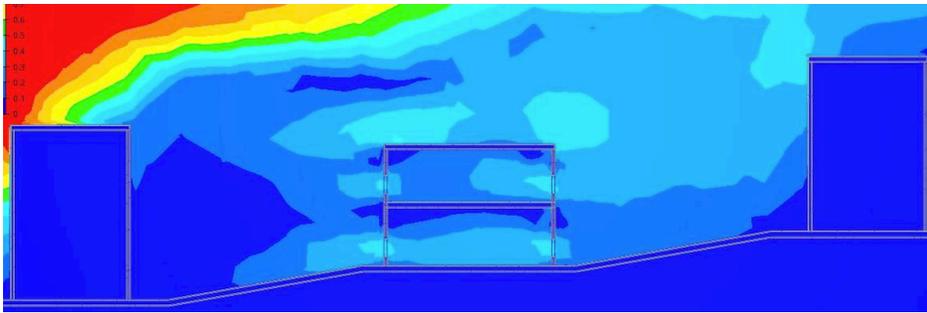
Abertura 80% con viento ascendente proporción 1:3



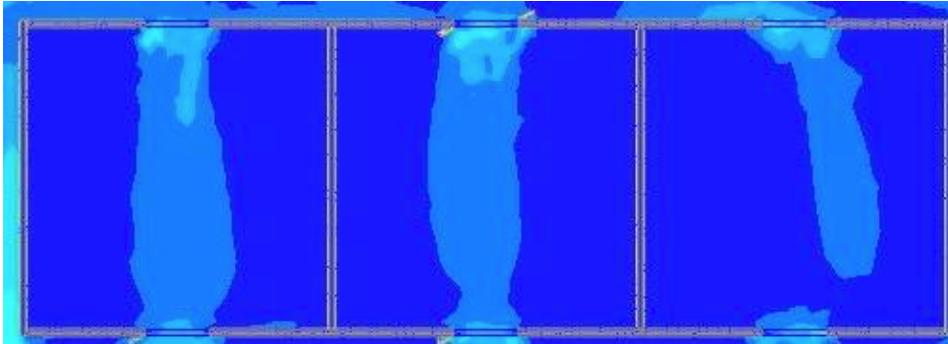
Sección 80% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:3



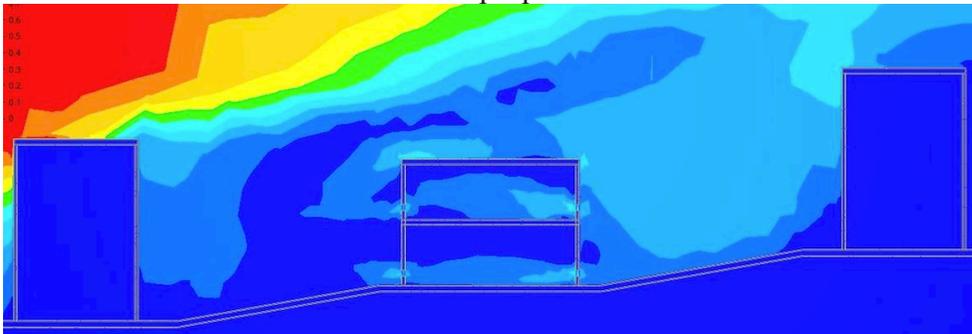
Abertura 100% con viento ascendente proporción 1:3



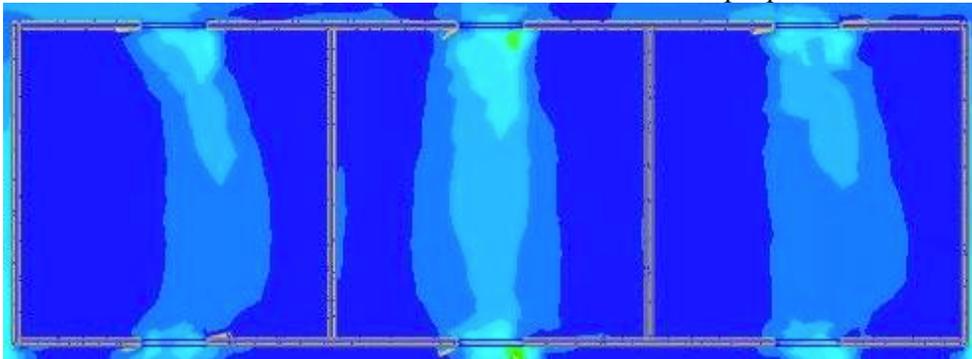
Sección 100% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:3



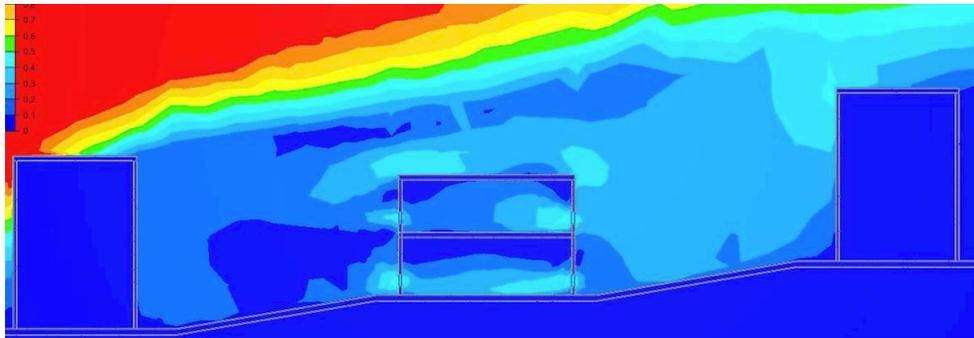
Abertura 20% con viento ascendente proporción 2:3



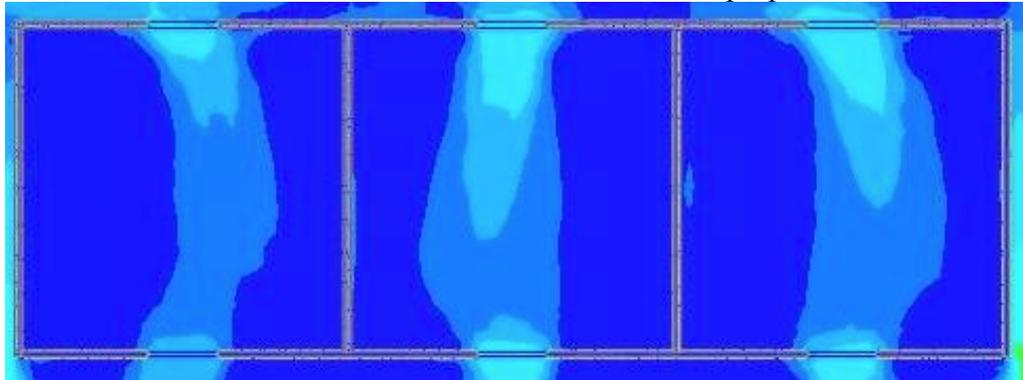
Sección 20% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



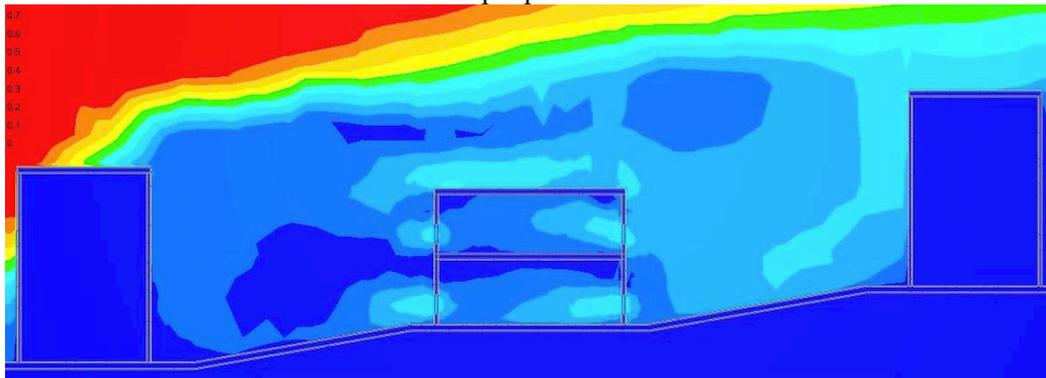
Abertura 40% con viento ascendente proporción 2:3



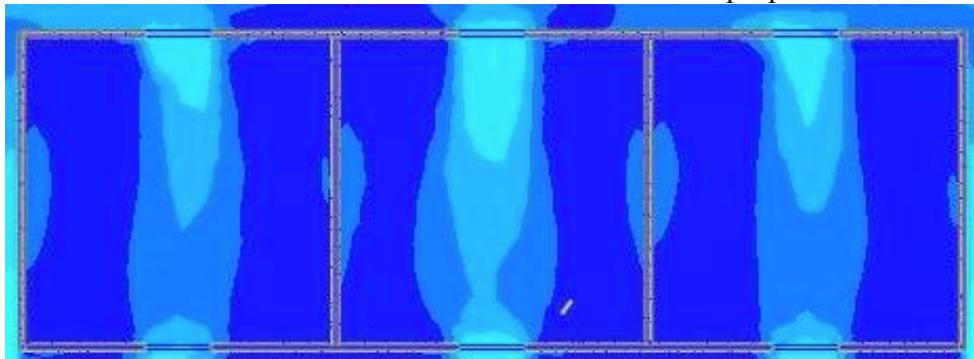
Sección 40% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



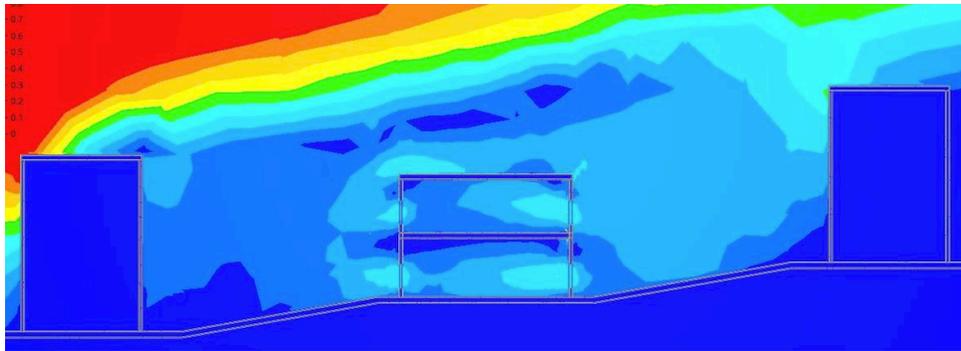
Abertura 60% con viento ascendente proporción 2:3



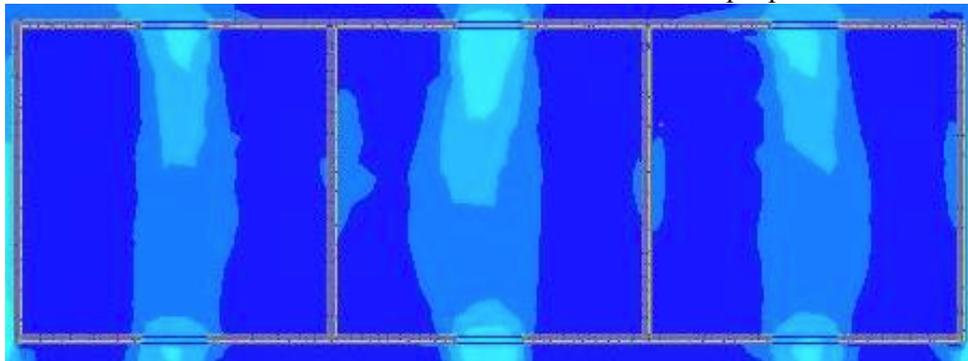
Sección 60% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



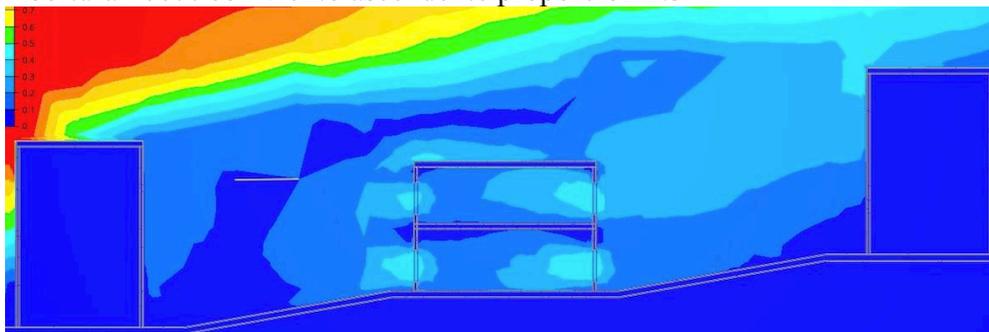
Abertura 80% con viento ascendente proporción 2:3



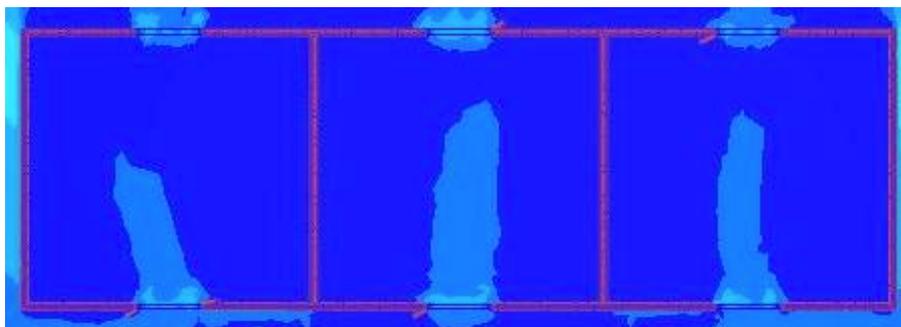
Sección 80% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



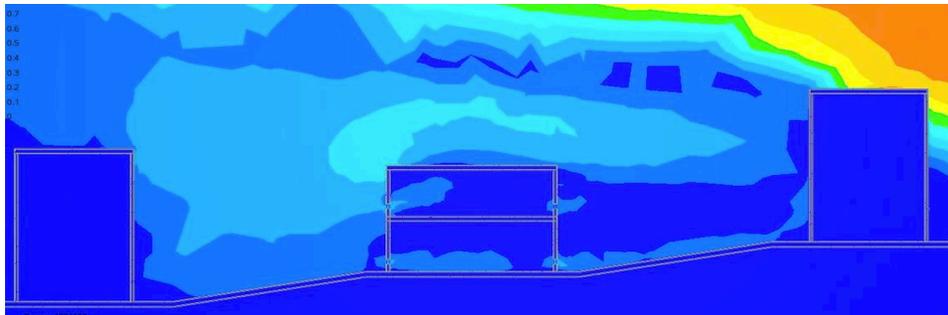
Abertura 100% con viento ascendente proporción 2:3



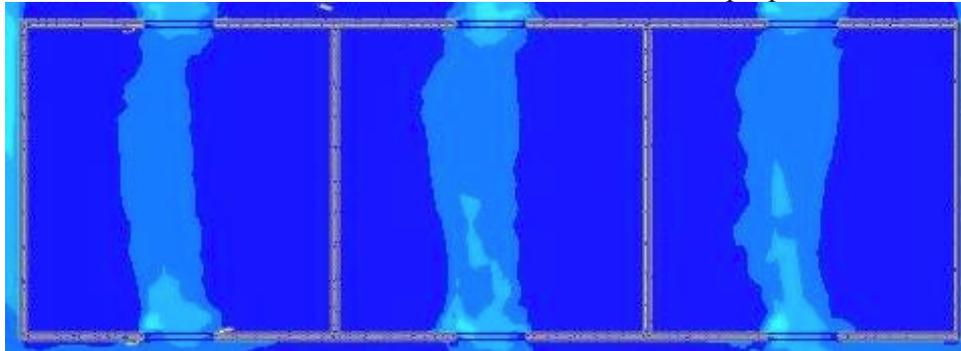
Sección 100% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



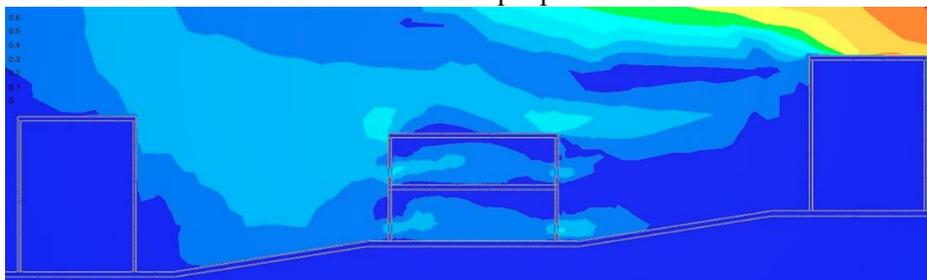
Abertura 20% con viento descendente proporción 1:2



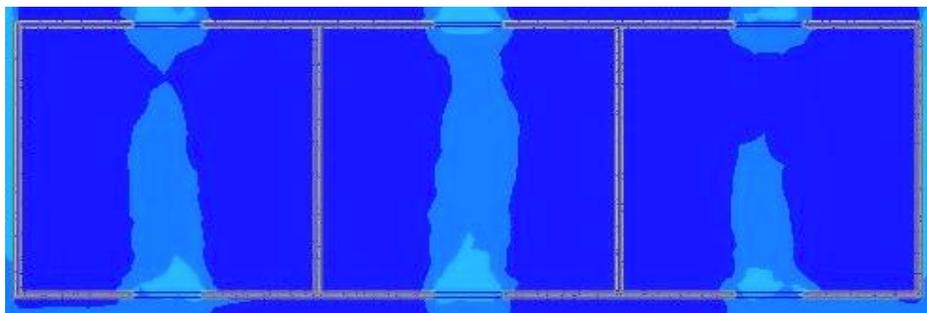
Sección 20% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



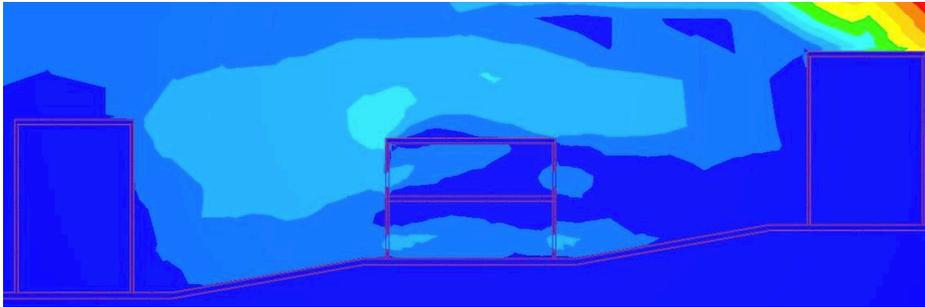
Abertura 40% con viento descendente proporción 1:2



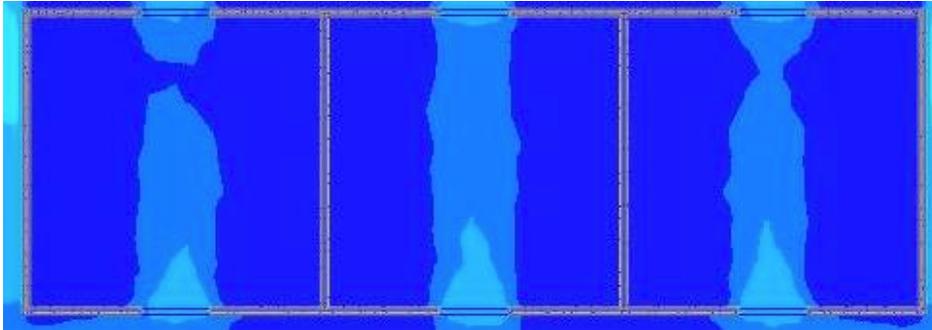
Sección 40% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



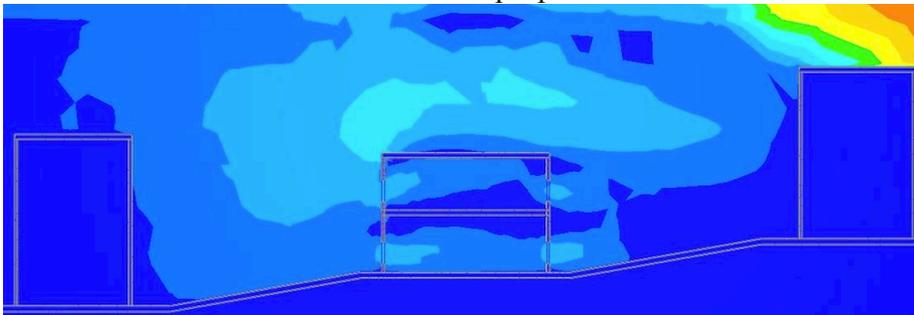
Abertura 60% con viento descendente proporción 1:2



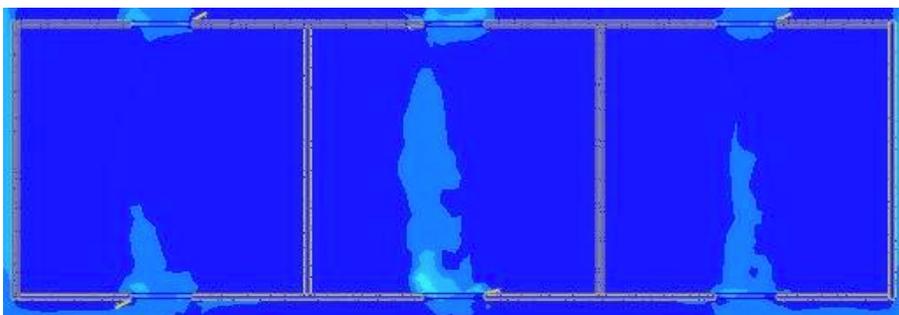
Sección 60% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



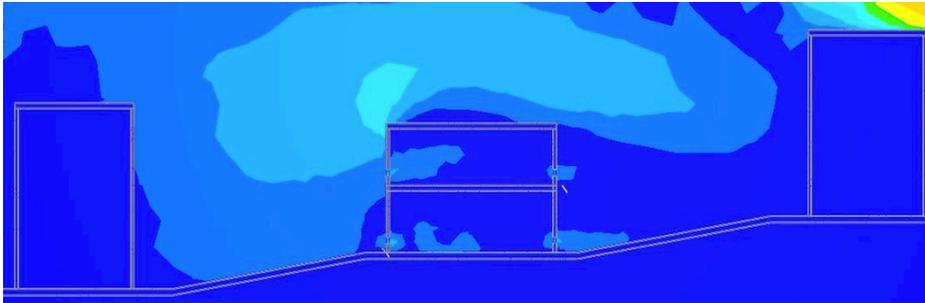
Abertura 80% con viento descendente proporción 1:2



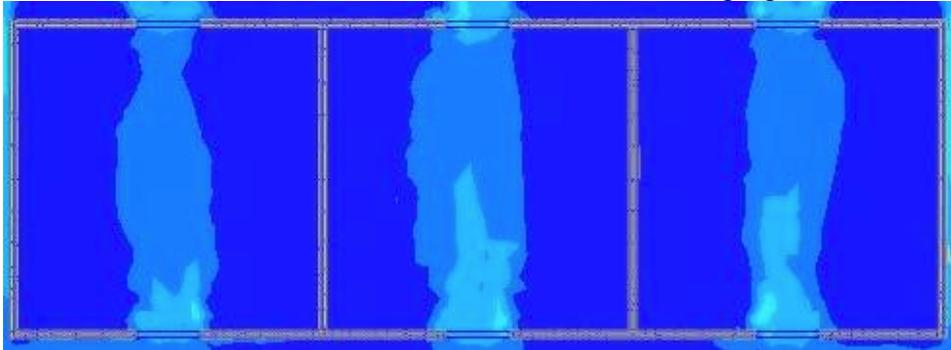
Sección 80% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 1:2



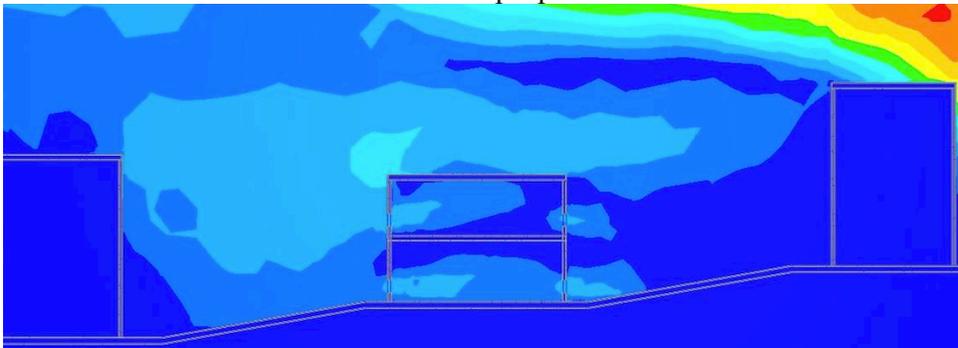
Abertura 20% con viento descendente proporción 2:3



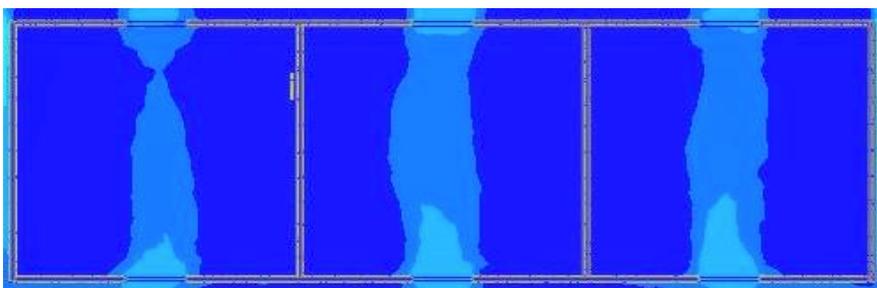
Sección 20% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



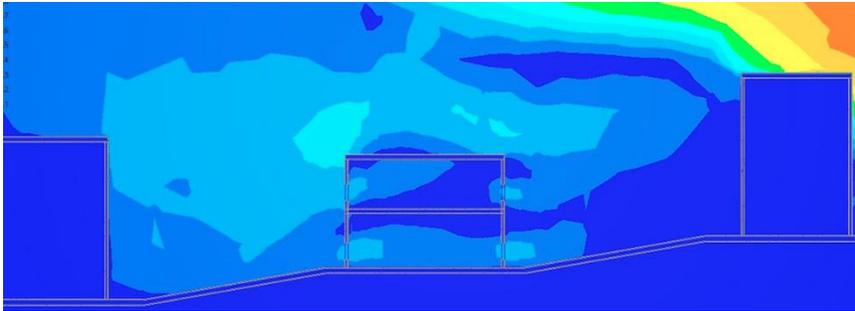
Abertura 40% con viento descendente proporción 2:3



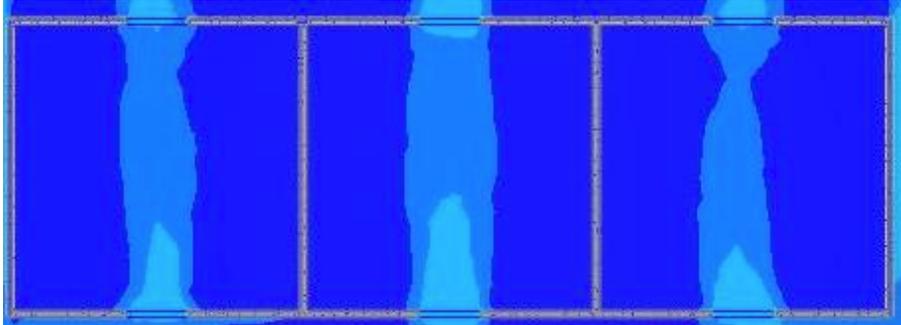
Sección 40% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



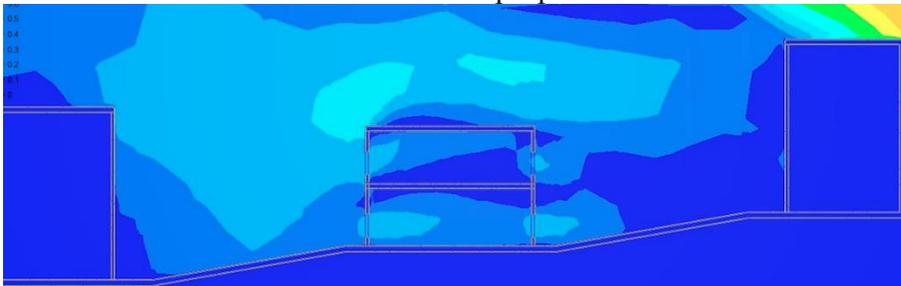
Abertura 60% con viento descendente proporción 2:3



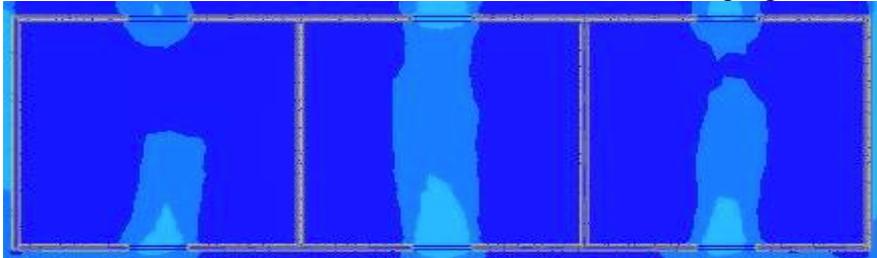
Sección 60% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



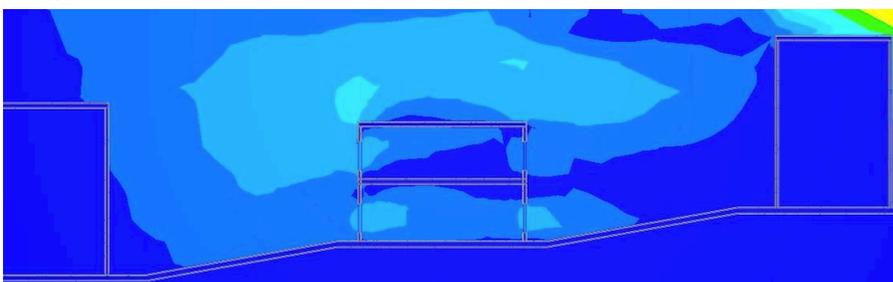
Abertura 80% con viento descendente proporción 2:3



Sección 80% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3



Abertura 100% con viento descendente proporción 2:3



Sección 100% altura del sillar abertura viento ascendente proporción 2:3

**Anexos 15. Medidas de ventilación y atenuación en aula cuadrada NTC 4595 2015**

Áreas ventiladas con flujo ascendente, con atenuaciones fuente alta y baja

PROPORCION	areaVenASC	atF.ALTA	ATF.BAJA
0,2	3,71	31,54	30,35
0,4	6,45	28,41	26,98
0,6	8,78	26,43	24,76
0,8	11,66	24,85	22,95
1	<b>9,44</b>	23,66	21,52
0,2	0,99	31,66	30,46
0,4	17,60	28,42	26,99
0,6	17,37	26,41	24,74
0,8	17,80	24,92	23,02
1	14,43	23,66	21,52
0,2	2,69	31,64	30,44
0,4	15,50	28,40	26,97
0,6	16,03	26,39	24,72
0,8	18,32	24,89	22,98
1	15,34	23,66	21,52

Áreas ventiladas con flujo descendente, con atenuaciones fuente alta y baja

PROPORCION	areaVenDESC	atF.ALTA	ATF.BAJA
1/2.20%	0,34	31,54	30,35
1/2.40%	1,94	28,41	26,98
1/2.60%	4,43	26,43	24,76
1/2.80%	6,55	24,85	22,95
1/2.100%	<b>8,85</b>	23,66	21,52
1/3.20%	8,98	31,66	30,46
1/3.40%	9,56	28,42	26,99
1/3.60%	9,98	26,41	24,74
1/3.80%	10,35	24,92	23,02
1/3.100%	9,65	23,66	21,52
2/3.20%	1,07	31,64	30,44
2/3.40%	4,23	28,40	26,97
2/3.60%	4,60	26,39	24,72
2/3.80%	5,80	24,89	22,98
2/3.100%	5,20	23,66	21,52

Áreas ventiladas ascendentes y atenuaciones usando las ecuaciones lineales

PROPORCIO	AREA	FA	FB
0,2	4,429	30,42	21,22
0,4	6,842	29,40	20,52
0,6	9,255	28,38	19,82
0,8	11,668	27,36	19,11
1	14,081	26,34	18,41
0,2	17,523	31,25	22,06
0,4	17,766	30,14	21,27
0,6	18,009	29,03	20,47
0,8	18,252	27,92	19,67
1	18,495	26,80	18,88
0,2	12,166	31,26	22,07
0,4	14,372	30,14	21,27
0,6	16,578	29,03	20,47
0,8	18,784	27,92	19,68
1	20,99	26,81	18,88

Ecuaciones lineales

AREA	FUENTE
2:3. $y=22,06*X+9,96$	1:3. $Y=-11,13*X+32,367$
1:2. $Y=24,13*X+2,016$	2:3. $Y=-11,131*X+32,371$
1:3. $Y=2,43*X+17,28$	1:2. $Y=-10,198*X+31,435$

Áreas ventiladas descendentes y atenuaciones usando las ecuaciones lineales

PROPORCION	areaVentilada	F.ALTA	F.BAJA
0,2	0,242	30,42	21,22
0,4	2,458	29,40	20,52
0,6	4,674	28,38	19,82
0,8	6,89	27,36	19,11
1	9,106	26,34	18,41
0,2	9,395	31,25	22,06
0,4	9,79	30,14	21,27
0,6	10,185	29,03	20,47
0,8	10,58	27,92	19,67
1	10,975	26,80	18,88
0,2	3,9981	31,26	22,07
0,4	4,4292	30,14	21,27
0,6	4,8603	29,03	20,47
0,8	5,2914	27,92	19,68
1	5,7225	26,81	18,88

Ecuaciones lineales

AREA VENTILADA	DESCENDENTE	FUENTE ALTA
1:2.	$Y=22,16 \cdot X - 1,974$	1:3. $Y=-11,13 \cdot X + 32,367$
1:3.	$Y=3,95 \cdot X + 9$	2:3. $Y=-11,131 \cdot X + 32,371$
2:3.	$Y=21,55 \cdot X + 3,567$	1:2. $Y=-10,198 \cdot X + 31,435$