

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Caracterización del movimiento de aire en cañones y su impacto térmico en el clima urbano

Autor: Claudia Jurado Camacho

Tutores: María del Carmen Guerrero Delgado

Servando Álvarez Domínguez

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla



Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Caracterización del movimiento de aire en cañones y su impacto térmico en el clima urbano

Autor:

Claudia Jurado Camacho

Tutores:

María del Carmen Guerrero Delgado
Profesor Sustituto Interino

Servando Álvarez Domínguez
Catedrático de Universidad

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Máster: Caracterización del movimiento de aire en cañones y su impacto
térmico en el clima urbano

Autor: Claudia Jurado Camacho

Tutores: María del Carmen Guerrero Delgado

Servando Álvarez Domínguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster, con título *Caracterización del movimiento de aire en cañones y su impacto térmico en el clima urbano*, parte del fenómeno de isla de calor urbana, hecho de gran importancia en la actualidad debido a los efectos negativos que este produce sobre la salud humana y a la intensificación del mismo como consecuencia del cambio climático.

Realizada la revisión del estado del arte sobre el fenómeno de isla de calor urbana, se ha definido la metodología necesaria para implementar los diferentes casos a simular y estudios de interés. Con los estudios propuestos para diferentes geometrías urbanas, se pretende analizar la influencia de la temperatura o la velocidad del aire de entrada en las condiciones térmicas que se alcanzan en el interior del cañón urbano.

Tras la definición de las diversas metodologías, se ha procedido a su implementación en *Ansys Fluent*, software líder en la simulación de dinámica de fluidos computacional. Finalmente, se ha realizado un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos tras simulación, lo cual ha permitido caracterizar el fenómeno y valorar, entre otros aspectos, la acumulación del calor generado en las calles o la formación de corrientes de recirculación y su peso en la dilución de contaminantes.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IX
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Justificación y motivación del proyecto</i>	1
1.2 <i>El fenómeno isla de calor urbana: qué es, causas y efectos</i>	2
1.3 <i>Influencia de la geometría urbana en el fenómeno isla de calor</i>	4
1.4 <i>Estrategias de mitigación del fenómeno isla de calor urbana</i>	6
2 METODOLOGÍA	9
2.1 <i>Objetivos del proyecto y metodología de trabajo</i>	9
2.2 <i>Estudio de tipologías urbanas en la ciudad de Sevilla</i>	10
2.2.1 <i>Presentación de los casos a estudio</i>	11
2.2.2 <i>Selección de viales de los casos a estudio</i>	11
2.3 <i>Descripción general del proceso de simulación en Ansys Fluent</i>	14
2.3.1 <i>Definición de la geometría</i>	14
2.3.2 <i>Creación del mallado</i>	15
2.3.3 <i>Modelado del problema</i>	16
2.4 <i>Influencia de la velocidad</i>	18
2.5 <i>Influencia de la temperatura</i>	18
2.6 <i>Calor antropogénico real</i>	22
2.7 <i>Parámetros de interés</i>	23
2.7.1 <i>Caudal real</i>	23
2.7.2 <i>Caudal equivalente</i>	24
2.7.3 <i>Número de renovaciones por hora</i>	25
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
3.1 <i>Caso sin generación de calor</i>	27
3.1.1 <i>Líneas de corriente</i>	27
3.1.2 <i>Posición y número de vórtices</i>	33

<i>3.2 Estudio de velocidades</i>	34
3.2.1 Caudal y ACH.....	34
3.2.2 Posición y número de vórtices. Contornos de velocidad	36
<i>3.3 Caso con generación de calor</i>	43
3.3.1 Contornos de temperatura.....	44
3.3.2 Caudales y número de renovaciones por hora	50
<i>3.4 Calor antropogénico real</i>	51
4 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	59
4.1 Conclusiones	59
4.2 Desarrollos futuros	60
REFERENCIAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Variación de la temperatura en núcleos urbanos y su periferia provocada por el efecto isla de calor urbana. Fuente: [8].	2
Figura 1.2. Mapa de calor en Sevilla. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth y Meteoblue.....	3
Figura 1.3. Ejemplo de cañón urbano en el distrito de Manhattan. Fuente: Google Imágenes.	4
Figura 1.4. Parámetros que definen la geometría del cañón urbano. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Imágenes.	5
Figura 1.5. Ejemplo de techos verdes. Fuente: Google Imágenes.....	7
Figura 1.6. Ejemplo de pavimentos fríos. Fuente: Google Imágenes.	8
Figura 2.1. Fases del trabajo realizado y contenido de cada fase. Fuente: Elaboración propia. .	10
Figura 2.2. Histograma de frecuencia acumulada con las relaciones de aspecto existentes en la ciudad de Sevilla. Fuente: Grupo de Termotecnia.	11
Figura 2.3. Vista aérea general de la zona de estudio y situación en planta de las fotografías realizadas. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.	13
Figura 2.4. Diagrama de flujo del procedimiento seguido para la simulación en Ansys Fluent. Fuente: Elaboración propia.	14
Figura 2.5. Dimensiones características de un cañón urbano y nomenclatura de las zonas consideradas. Fuente: Elaboración propia.....	15
Figura 2.6. Detalle del mallado y refinamiento en las paredes de la depresión. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 2.7. Esquema de la distribución en subvolúmenes y dimensiones de cada zona en función de la altura de la depresión. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 2.8. Identificación del tipo de mallado empleado en cada zona, detalle del mallado entre regiones y detalle del inflation en paredes. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 2.9. Distribución de subvolúmenes para el caso con generación de calor debido a la actividad antropogénica. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 2.10. Esquema del criterio sobre líneas de flujo entrante y saliente a la depresión para “i” segmentos con “j” extremos. Fuente: Elaboración propia.	24

Figura 3.1. Ejemplo de gráfica de residuales para uno de los casos simulados. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 3.2. Evolución del caudal y ACH para tres casos de relación de aspecto en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 3.3. Identificación de paredes de edificios a barlovento y sotavento en un cañón urbano. Fuente: Elaboración propia a partir de [26].....	43
Figura 3.4. Evolución de las temperaturas mínima, media y máxima en el subvolumen de la depresión para el caso con generación de calor. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 3.5. Evolución de los caudales real y equivalente y las renovaciones por hora real y equivalente para el caso con generación de calor. Fuente: Elaboración propia.	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Relaciones de aspecto de calles típicas de Sevilla. Fuente: Elaboración propia.	12
Tabla 2.2. Dimensiones del cañón para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia. 15	
Tabla 2.3. Tamaño de malla utilizado en cada región en función de la relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.	21
Tabla 3.1. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 0.2 y 2.0. Fuente: Elaboración propia.....	29
Tabla 3.2. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 2.5 y 3.0. Fuente: Elaboración propia.....	30
Tabla 3.3. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 3.5 y 4.0. Fuente: Elaboración propia.....	30
Tabla 3.4. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 4.5 y 5.0. Fuente: Elaboración propia.....	31
Tabla 3.5. Número de vórtices y posición del centro para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 3.6. Número de vórtices y posición del centro para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 3.7. Caudal y ACH para tres casos de relación de aspecto en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 3.8. Número de vórtices y posición del centro para tres casos de relación de aspecto en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 3.9. Líneas de corriente para relación de aspecto 0.2 en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 3.10. Líneas de corriente para relación de aspecto 1.0 en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 3.11. Líneas de corriente para relación de aspecto 3.0 en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 3.12. Contornos de temperatura para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.....	44

Tabla 3.13. Caudal real total, ACH real, caudal equivalente y ACH equivalente en el caso con generación de calor. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 3.14. Contornos de temperatura en el caso calor antropogénico real. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 3.15. Temperaturas media y máxima en el subvolumen con generación de calor antropogénico real. Fuente: Elaboración propia.....	56

1 INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El creciente aumento poblacional experimentado en las últimas décadas ha supuesto una gran transformación de los núcleos urbanos. Las ciudades tal y como se conocían están cambiando: la nueva ordenación implica el desplazamiento desde las áreas dedicadas a entornos verdes y rurales hacia grandes áreas destinadas a enormes estructuras donde los seres humanos desarrollan su actividad profesional y conviven.

Los materiales empleados para construir los edificios y estructuras que conforman la vía pública son, en muchos casos, absorbentes del calor recibido durante el día a causa de la radiación solar incidente. Este aspecto, además de suponer un aumento de la temperatura ambiente, también intensifica la demanda de climatización de los edificios, siendo el sector de la construcción uno de los mayores consumidores de energía del planeta.

El efecto combinado de lo mencionado anteriormente y de más causas que se expondrán a lo largo de este proyecto deriva en lo que se conoce como isla de calor urbana. En síntesis, este fenómeno supone una temperatura mayor en las zonas urbanas que en la periferia de las ciudades, siendo las causas principalmente de origen antropogénico.

Los centros urbanos de las ciudades son emplazamientos en los que los efectos del cambio climático se acentúan a consecuencia de la isla de calor urbana. Uno de los efectos más notables es la pérdida del confort térmico exterior percibido por los habitantes de las ciudades. Según han recogido numerosos estudios, la calidad de vida de las personas se ve afectada gravemente, pudiendo llegar en algunas ocasiones a sufrir insolación, deshidratación, enfermedades respiratorias por la menor calidad del aire y del agua, malestar general, cansancio acumulado, e incluso un aumento de la mortalidad por la carga adicional que supone el fenómeno isla de calor urbana.

A pesar de la tendencia de ciertas personas de trasladarse desde zonas urbanas a zonas rurales buscando una vida más sostenible y de mejor calidad a través del contacto con la naturaleza y dejando atrás las zonas urbanas masificadas, no se puede negar que las ciudades no cesan en su aumento de población, tal vez motivado por el mayor número de oportunidades que ofrecen a nivel laboral y, por ende, el desarrollo económico.

Por lo tanto, el estudio del fenómeno de isla de calor que se abordará en este proyecto entraña un tema de gran actualidad y en el que debe ponerse el punto de mira por los efectos negativos de este fenómeno sobre la salud humana. Actualmente, más de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas, lo cual provoca mayores necesidades de infraestructuras, que, si no se diseñan con materiales adecuados y atendiendo a una ordenación urbana óptima en la que se incluyan zonas verdes, supondrá un aumento aún mayor de la temperatura en estas áreas.

1.2 EL FENÓMENO ISLA DE CALOR URBANA: QUÉ ES, CAUSAS Y EFECTOS

El fenómeno de isla de calor urbana (UHI, del inglés *Urban Heat Island*) es un fenómeno térmico que provoca un aumento de la temperatura de las áreas urbanas frente a la percibida en las zonas de la periferia. [7]

Estas zonas circundantes a las grandes ciudades son las formadas por pueblos, zonas agrícolas o zonas residenciales alejadas de núcleos urbanos. Si se atiende a la ciudad en sí, también se puede notar la existencia de distintas zonas cuya temperatura varía significativamente, siendo por ejemplo la temperatura de un parque urbano menor que la registrada en el núcleo urbano formado por edificios de gran tamaño.

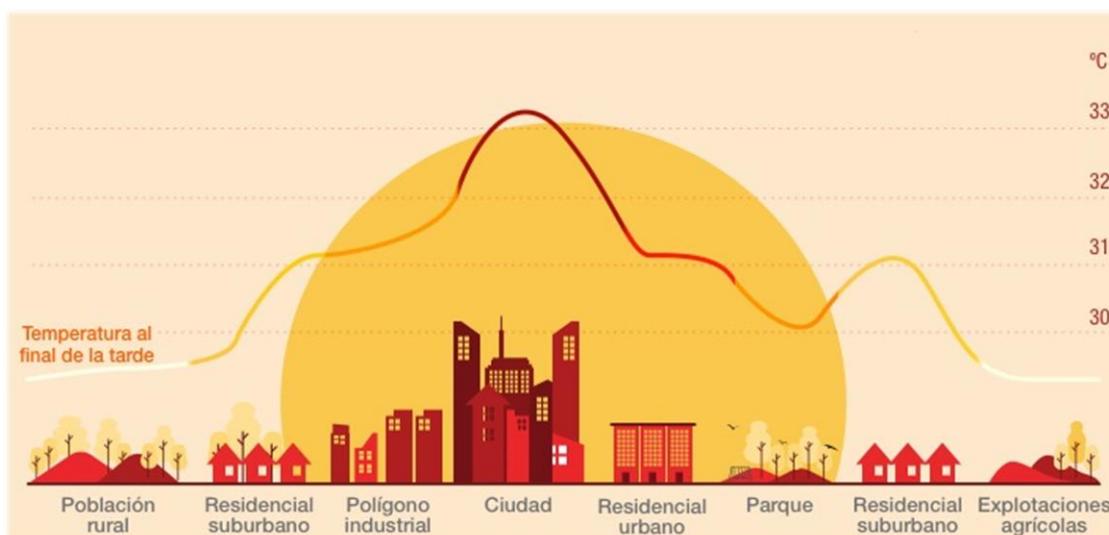


Figura 1.1. Variación de la temperatura en núcleos urbanos y su periferia provocada por el efecto isla de calor urbana. Fuente: [8].

El aumento de la temperatura provocada por el efecto isla de calor se produce tanto de día como de noche. Sin embargo, durante la noche es más notable, ya que la diferencia de temperatura entre los materiales de las construcciones urbanas y el aire ambiente es mayor, lo cual causa una mayor transferencia de calor al disipar toda esa energía acumulada durante el día.

Siguiendo con lo contenido en el apartado introductorio de este proyecto, el creciente aumento poblacional y la industrialización han sido algunos de los factores clave y moldeadores de la forma que tienen las ciudades actualmente. Los núcleos urbanos están formados por un gran número de edificios altos, calles asfaltadas y zonas industriales en detrimento de zonas verdes destinadas al ocio de los habitantes. Esta ordenación de las ciudades juega un papel muy importante en el fenómeno de isla de calor y en las causas que lo provocan, siendo las principales las enumeradas a continuación:

- Muchos de los edificios de gran tamaño destinados tanto a uso terciario como a residencial, están contruidos con materiales y colores que dificultan la evacuación del calor absorbido a lo largo del día. Además, en muchos casos debido a su altura elevada, representan un obstáculo al paso del viento, lo cual obstaculiza aún más la refrigeración de las ciudades. [8]
- El asfalto empleado en el pavimento de las calles es un material de alta conductividad térmica, lo cual se traduce en un aumento de la radiación solar de onda corta absorbida durante el día y reflejada lentamente durante la noche mediante onda larga. [6] [8]

- Las zonas industriales, los sistemas de climatización y los vehículos de combustión derivados de la actividad antropogénica, emiten enormes cantidades de gases contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x) o dióxido de azufre (SO₂) que contribuyen al calentamiento global terrestre.
- La insuficiencia de zonas verdes en la mayoría de las grandes ciudades ocasiona una menor área sombreada y, por tanto, un aumento de la temperatura del suelo, lo que se traduce en una disminución del confort térmico percibido por los habitantes.

En la figura inferior se muestra una vista satélite de Sevilla y un mapa de calor de la zona identificada correspondiente a un día de la primera ola de calor de este verano. Es evidente la correspondencia entre las zonas verdes y la menor temperatura que se presenta en estas zonas.



Figura 1.2. Mapa de calor en Sevilla. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth y Meteoblue.

Las zonas rurales presentan características muy opuestas a las citadas anteriormente para el caso de las ciudades. En primer lugar, las fachadas de los edificios son de colores claros y los estos tienen menor altura, por lo que el aire circula más fácilmente entre ellos. En lo que respecta a las calles, estas están pavimentadas con adoquines de materiales pétreos que captan menos calor y lo liberan con más rapidez que el asfalto. Por otra parte, las poblaciones rurales disponen de menor superficie destinada a zonas de uso industrial y menor número de vehículos, lo que se traduce en una disminución de la contaminación atmosférica. Finalmente, las zonas rurales están rodeadas de grandes extensiones naturales que ayudan a evacuar de forma natural el calor absorbido durante el día, al ser el coeficiente de absorción de la tierra significativamente menor que el del asfalto.

Desde la perspectiva de los efectos que ocasiona la isla de calor urbana, el más evidente de ellos es el deterioro de la calidad del aire, ya que los gases contaminantes causantes del efecto invernadero quedan atrapados con mayor facilidad. Otro aspecto que también contribuye al aumento de las emisiones de gases contaminantes es la mayor demanda de energía, y por tanto de consumo, que requieren los edificios para su acondicionamiento energético.

Dentro de este marco se han realizado numerosos estudios que evidencian los impactos de la isla de calor urbana en el consumo energético de los edificios. Según lo recogido en [10], en régimen de refrigeración este aumento es en promedio del 19 %, mientras que, en régimen de calefacción, representa una disminución del 18.4 %. Además, en el estudio realizado se observó una fuerte variación de este impacto dentro de la ciudad y en la periferia, constituyendo esto una evidencia más de lo conocido como isla de calor urbana. Es preciso destacar que este efecto sobre el consumo de los edificios combinando calefacción y refrigeración podrá ser considerado beneficioso o perjudicial en función de la zona climática que se esté tratando. En este sentido, [10] expone que los edificios consumirán mayor energía en las regiones dominadas por la refrigeración, en tanto que las dominadas por la calefacción consumirán menor energía al realizar el balance global.

1.3 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA URBANA EN EL FENÓMENO ISLA DE CALOR

En el apartado anterior se han establecido los orígenes de la isla de calor urbana. Sin embargo, no se debe olvidar la geometría urbana, la cual desempeña un papel primordial en este fenómeno y en sus efectos, siendo esta la principal línea de estudio que se pretende cubrir con la realización de este proyecto.

En los estudios de este campo es frecuente hablar del término cañón urbano, el cual se puede definir como un lugar donde la calle se encuentra flanqueada por edificios a ambos lados creando un entorno similar al de un cañón formado en la naturaleza [4]. Una vez que se conoce esta definición, se puede pensar en calles de numerosas ciudades a lo largo del planeta que se corresponderían con cañones urbanos, siendo su principal característica el estar compuestas por rascacielos de gran altura en relación al ancho de la vía. Como se verá posteriormente en este proyecto, un cañón urbano no siempre presenta estas características, puesto que los parámetros geométricos que lo definen pueden tener una gran diversidad de valores.



Figura 1.3. Ejemplo de cañón urbano en el distrito de Manhattan. Fuente: Google Imágenes.

Atendiendo a la bibliografía consultada, los parámetros principales que definen un cañón urbano son los enumerados a continuación [7]:

- **Relación de aspecto** (H/W), definida como la relación entre la altura de los edificios y el ancho de la calle.
- **Factor de visibilidad del cielo** (SVF), factor adimensional que representa la fracción de cielo visible al mirar hacia arriba desde un determinado punto. Este parámetro es inversamente proporcional a la densidad de edificios. Durante el día, en calles con un factor de vista del cielo menor, el aire es más fresco al estar más parte del suelo sombreado. [22]
- **Orientación de la calle** (β), es el ángulo en grados que forma el cañón respecto al eje Norte-Sur.

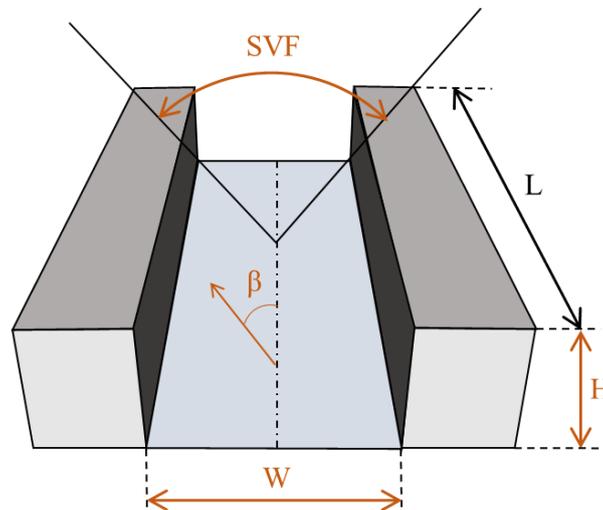


Figura 1.4. Parámetros que definen la geometría del cañón urbano. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Imágenes.

El parámetro con mayor importancia de la lista anterior es la relación de aspecto, la cual permite clasificar los cañones urbanos en tres tipos: poco profundo ($H/W < 0,5$), normal ($H/W = 1$) y profundo ($H/W > 2$) [22]. Al consultar numerosos estudios, se ha podido comprobar que los resultados obtenidos tras simulación son comparados normalmente empleando este parámetro, por lo que se seguirá este criterio.

Según lo recogido en [7], la ventilación de la calle empeora a medida que la relación de aspecto aumenta, de modo que los contaminantes quedan retenidos más fácilmente. En cuanto a las temperaturas, la tendencia observada es la misma, es decir, las calles con cañones urbanos más profundos registran mayores temperaturas que aquellas con menor relación de aspecto.

Con referencia al factor de visibilidad del cielo (SVF), lo deseable es que este parámetro tenga un valor alto. Esto es así puesto que un valor alto indica una mayor superficie de cielo para realizar el intercambio radiante debido al calor retenido por los edificios, y así, lograr un mayor enfriamiento del cañón urbano. [4]

Respecto a la orientación, este parámetro determina la cantidad de radiación solar recibida por la calle de forma directa y por reflexión desde sus superficies, el flujo de viento que se establecerá y el posible enfriamiento urbano. Además, esta variable es muy interesante desde el punto de vista del confort térmico en espacios exteriores, siendo la temperatura radiante media más baja en las calles con orientación Norte-Sur y más alta en las calles con orientación Este-Oeste. [1]

1.4 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL FENÓMENO ISLA DE CALOR URBANA

Dada la importancia del fenómeno isla de calor urbana, son numerosos los estudios de investigación llevados a cabo en este ámbito que proponen y evalúan distintas actividades destinadas a reducir los efectos de este suceso. A continuación, se recogen las principales líneas de investigación presentadas en los estudios más relevantes sobre este tema, siendo estas el uso de techos verdes, pavimentos fríos y vegetación urbana.

Como primer ejemplo de estrategias de mitigación del efecto isla de calor urbano, se tienen las cuatro alternativas propuestas en [3]. En primer lugar, el uso de pavimentos fríos con altos valores de permeabilidad y albedo (porcentaje de radiación que refleja una superficie respecto a la radiación que incide sobre la misma). Este tipo de pavimentos puede ser utilizado para reducir la absorción solar frente a un pavimento consistente en asfalto convencional. En segundo lugar y en relación con las propiedades anteriores de menor absorción de la radiación solar, se exploró la estrategia consistente en usar adoquines de césped. El tercer caso de estudio fue la expansión de la vegetación actual con especies asimilables a las presentes. Finalmente, se estudió el efecto provocado por la adición de un techo saliente que diera sombra en la zona de estudio, la cual reduce la cantidad de radiación solar absorbida por el asfalto y por tanto reduce la temperatura del aire en la zona de estudio. Además, se contempló la colocación de “espejos de agua”, es decir, fuentes de agua dentro de la zona de estudio para mejorar los efectos de enfriamiento provocados por la evaporación del agua y reducir la cantidad de energía solar que absorbe el asfalto.

Los principales resultados que se obtuvieron del estudio realizado por [3] reflejaron una reducción en la temperatura del aire de 0.88 °C a las 13:00 h con el uso de pavimentos fríos; mientras que, con la instalación de pavimentos de césped, se podía llegar a obtener una disminución de 2.11 °C a la misma hora del día. En cuanto a la estrategia consistente en colocar un techo para dar sombra, la reducción fue de 1.61 °C, sin embargo, esta disminución estaba localizada en el espacio sombreado, siendo la temperatura del aire mayor fuera de esa región. Finalmente, los resultados arrojados muestran que con la vegetación es posible obtener una disminución de la temperatura del aire más constante a lo largo del día en comparación con el resto de propuestas.

Siguiendo con la idea contenida en el párrafo anterior, [6] señala que el efecto isla de calor de las ciudades en verano se debe principalmente a la falta de vegetación y al alto nivel de radiación solar absorbida por la superficie. Las estrategias de mitigación propuestas son similares a las anteriores: el uso de cubiertas verdes, pavimentos fríos y espacios verdes en las zonas urbanas que, además de favorecer la refrigeración de las superficies, también contribuyen a la reducción del consumo de refrigeración en verano. Esta disminución podría ser hasta de un 10 %. [6]

El aumento de la superficie ocupada por vegetación en las ciudades tiene un doble efecto beneficioso, ya que las sombras producidas por los árboles interceptan la radiación solar y evitan el calentamiento del suelo contribuyendo así al enfriamiento de la atmósfera; y, además, aumenta el enfriamiento por evaporación. Esto incluso podría llegar a producir el fenómeno conocido como islas de frío urbanas. [6]

A fin de conseguir un efecto del sombreado óptimo, se deben considerar principalmente las características morfológicas del arbolado, siendo este efecto mayor a medida que aumenta el índice de área foliar. Otro aspecto de especial importancia en el potencial de enfriamiento de la vegetación urbana es la estacionalidad. Durante los extremos de calor en regiones secas, este descenso de la temperatura puede ser menor debido a la menor humedad del suelo, por lo que la evotranspiración (pérdida de humedad debida a la suma de evaporación directa desde la superficie y a la pérdida de agua desde la planta por transpiración) es menor. [15]

Por otra parte, el uso de techos verdes también constituye una gran alternativa para reducir el efecto isla de calor, ya que la vegetación intercepta contaminantes como el dióxido de carbono y crea oxígeno, ayudando así a contrarrestar los altos niveles de contaminación atmosférica. Desde el punto de vista energético, esta solución mejora el aislamiento térmico y acústico del edificio, y por tanto contribuye a la reducción de la carga de climatización necesaria, lo que se traduce en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Relacionado con lo anterior, otro punto importante que se consigue mejorar con el uso de techos verdes es el confort térmico dentro del edificio. Debido a la menor diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior y a la inercia térmica añadida al colocar el sustrato, la temperatura y el flujo de calor sufren un retraso [11]. Además, los techos verdes sirven como retenedor del agua de lluvia, lo cual se traduce en una mejora de la calidad del agua pluvial al quedar los contaminantes retenidos y no trasladarse a ríos o lagos que podrían verse afectados con esta incorporación. [6]



Figura 1.5. Ejemplo de techos verdes. Fuente: Google Imágenes.

Pese a la infinidad de ventajas que ofrecen las cubiertas verdes, también es preciso destacar ciertos aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de considerar su instalación, como por ejemplo los mayores requisitos estructurales, el mayor coste de mantenimiento, la pérdida de la transitabilidad en algunos casos o la importancia de una correcta impermeabilización para evitar los problemas derivados de las humedades. [13]

En lo referente a los pavimentos de las aceras del trazado urbano, [6] estudió diferentes materiales con distintos factores de albedo, concluyendo que las superficies rugosas y de colores oscuros absorbían mayor radiación solar que las superficies lisas y de colores claros. Por lo tanto, en los climas cálidos como el estudiado en este proyecto, se deberían instalar pavimentos hechos de materiales fríos para mitigar los efectos de la isla de calor urbana.

De acuerdo a lo recogido en [5], los materiales “fríos” convencionales consisten en revestimientos blancos o de colores claros que reflejan la radiación solar. Debido a las mejoras experimentadas en este campo, actualmente se dispone de más variedad de materiales con propiedades modificadas para conseguir una temperatura superficial menor, así como mayor diversidad de colores y acabados. En dicho artículo se propone una clasificación de los dos tipos de pavimentos fríos existentes actualmente: permeables y de hormigón reflectante. El primer tipo de pavimento está formado por una capa de hormigón, césped o ladrillos con huecos que permiten la entrada de aire y vapor de agua. Gracias al proceso de evaporación, cuando el pavimento se encuentra mojado y la superficie está caliente, se evapora el agua contenida en él y de esta forma se reduce la temperatura del pavimento. En el caso de los pavimentos de hormigón reflectante o de colores claros, la mejora se origina a causa del mayor factor de albedo, reflejando mayor cantidad de radiación solar respecto a lo conseguido con un pavimento convencional.



Figura 1.6. Ejemplo de pavimentos fríos. Fuente: Google Imágenes.

Se puede concluir que el fenómeno de isla de calor urbana representa un hecho de gran importancia en la sociedad actual debido a la ordenación urbana y a las características de la población que, con sus actividades, resulta cada vez más influyente en el clima de nuestro planeta. A lo largo de este capítulo se han establecido los orígenes de este fenómeno, así como los posibles métodos de mitigación encontrados en la bibliografía. Estos métodos ejemplifican que las soluciones constructivas deberán evolucionar en un futuro hacia infraestructuras más sostenibles siguiendo los principios de arquitectura bioclimática para así poder contrarrestar los efectos derivados de la actividad humana y, en consecuencia, el fenómeno de isla de calor urbana.

2 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se expone la metodología seguida en la realización de las distintas simulaciones numéricas que se emplearán para la caracterización del comportamiento del aire en los cañones urbanos haciendo uso del software de simulación *Ansys Fluent*. Se comienza con la definición de los objetivos a conseguir con la realización de este proyecto, así como un esquema general de las simulaciones realizadas. Seguidamente, se presentan los casos de estudio seleccionados, en este caso pertenecientes a la ciudad de Sevilla y sobre los que se trabajará el resto del proyecto. Posteriormente se detalla la metodología general para la implementación de las geometrías seleccionadas en el programa de cálculo, y se particulariza esta metodología para incluir la influencia de ciertas variables termodinámicas y condiciones del entorno que afectarán a los resultados obtenidos. Finalmente, se recogen las expresiones matemáticas aplicadas para la obtención de parámetros de interés en cualquier problema de mecánica de fluidos como son el caudal y la renovación del volumen de aire.

2.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

Siguiendo con lo contenido en la introducción del proyecto recogida en el capítulo anterior, los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este proyecto son los enumerados a continuación:

- Revisión del estado del arte sobre el fenómeno de la isla de calor urbana.
- Familiarización con un software de simulación de dinámica de fluidos computacional.
- Implementación de la geometría de un cañón urbano en el programa de simulación.
- Incorporación de variables termodinámicas de interés en el problema y valoración de su influencia en los resultados obtenidos.

La estructura del presente documento se corresponde con la metodología planteada para la consecución de los objetivos marcados anteriormente.

En el *Capítulo 1. Introducción* se ha expuesto la motivación para la elección del tema del proyecto. Además, se ha realizado una búsqueda de la información más relevante acerca del fenómeno de isla de calor urbana, dando como resultado la comprensión del fenómeno y la definición de las principales causas y efectos que provoca en el entorno y, por ende, en los seres humanos, junto con las principales estrategias de mitigación del mismo existentes en la actualidad.

Realizado lo anterior, se han seleccionado las geometrías de calles objeto de estudio de la ciudad de Sevilla en base al parámetro que define los cañones urbanos: la relación de aspecto. Posteriormente, se ha desarrollado la metodología a seguir en los estudios realizados, siendo

estos dependientes principalmente de la velocidad y la temperatura. Estos aspectos se muestran en el *Capítulo 2. Metodología*.

A continuación, empleando las metodologías implementadas en el capítulo anterior se han obtenido una serie de resultados gráficos y numéricos que se han sometido a análisis en el *Capítulo 3. Resultados y discusión*. De esta forma, ha sido posible valorar la influencia de variables como la velocidad del flujo de aire de entrada o la generación de calor en la depresión del cañón urbano en el movimiento del aire, temperatura alcanzada y condiciones de confort humano.

Finalmente, en el *Capítulo 4. Conclusiones y desarrollos futuros* se aportan las principales conclusiones obtenidas del proyecto realizado, junto con posibles vías de desarrollo identificadas a lo largo de la realización del mismo.

En la figura inferior se muestra de forma resumida lo expuesto en los puntos anteriores.

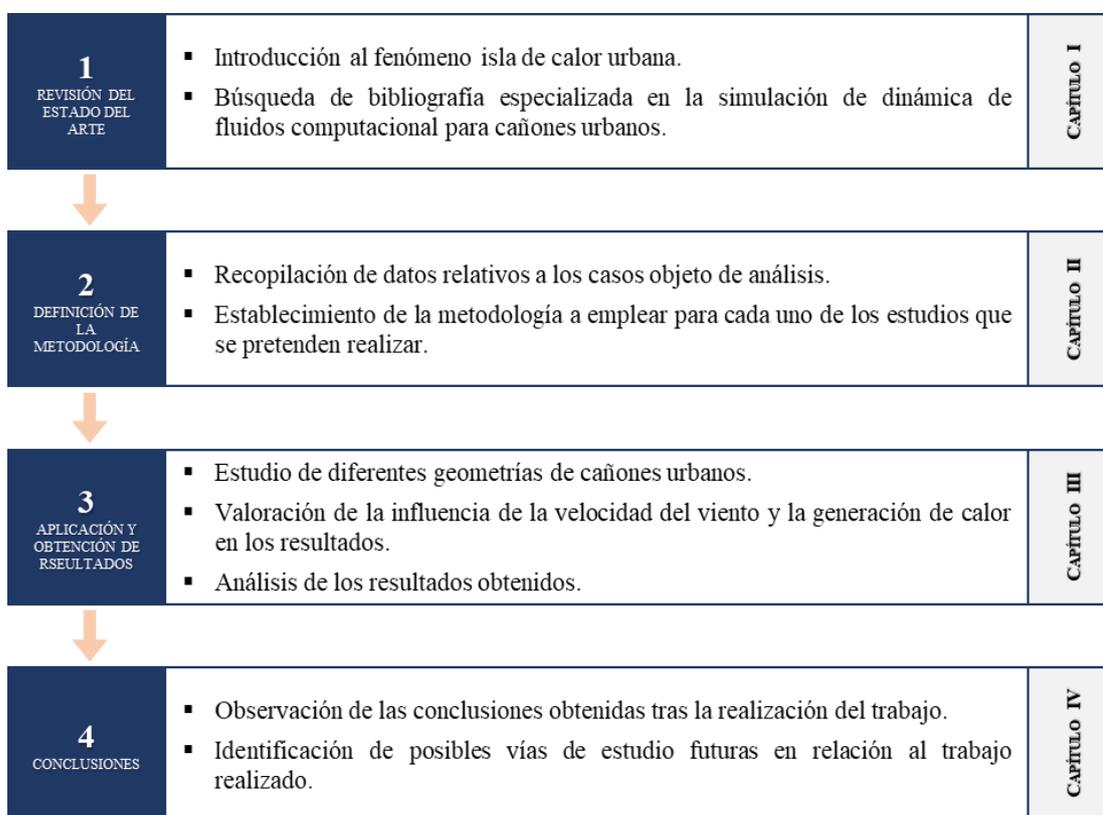


Figura 2.1. Fases del trabajo realizado y contenido de cada fase. Fuente: Elaboración propia.

2.2 ESTUDIO DE TIPOLOGÍAS URBANAS EN LA CIUDAD DE SEVILLA

La evaluación de la influencia de los cañones urbanos en el confort térmico percibido por los habitantes de una ciudad, así como el estudio de los patrones de aire formados puede ser abordado tomando como base cualquier ciudad del mundo. En el presente proyecto, debido a la proximidad y conocimiento de la zona, se ha seleccionado como zona de estudio la ciudad de Sevilla. Además de lo anterior, otro motivo para la elección de esta ciudad han sido los datos de partida proporcionados por el *Grupo de Termotecnia del Departamento de Ingeniería Energética* de la *Universidad de Sevilla*, a través de un estudio real anterior a la realización del presente proyecto.

2.2.1 PRESENTACIÓN DE LOS CASOS A ESTUDIO

El parámetro de mayor importancia para la caracterización de un cañón es su relación de aspecto (H/W), definida como la relación entre la altura de los edificios de la calle y el ancho de la misma, como ya se expuso en el *Apartado 1.3. Influencia de la geometría urbana en el fenómeno isla de calor*. Por lo tanto, el paso previo de cara al análisis que se pretende llevar a cabo en este proyecto, consiste en el establecimiento de los casos a simular, es decir, la definición de las distintas relaciones de aspecto que permiten distinguir los modelos de calles.

Siguiendo con la idea contenida en la introducción a este apartado, la evaluación de la influencia de los cañones urbanos en el confort térmico será realizada partiendo de la geometría de las calles existentes en la ciudad de Sevilla. A tal efecto, se tiene como dato de partida el estudio realizado por el *Grupo de Termotecnia*, en el que se analizaron más de 200 calles de la ciudad, dando como resultado un valor de este parámetro situado en el rango 0 a 5.8. En la Figura 2.2 se muestra el histograma de frecuencia acumulada obtenido al representar gráficamente los valores de las relaciones de aspecto tomando como paso 0.2.

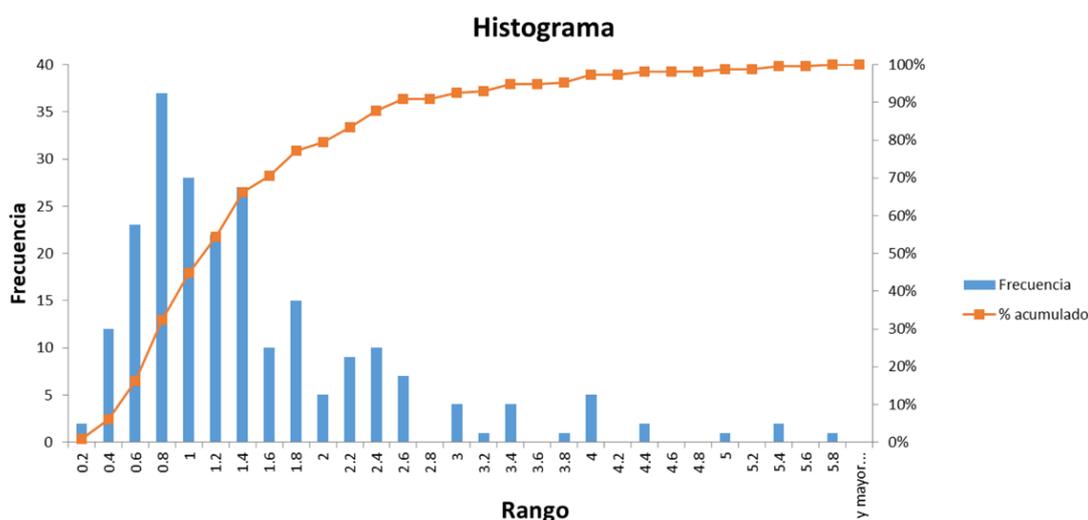


Figura 2.2. Histograma de frecuencia acumulada con las relaciones de aspecto existentes en la ciudad de Sevilla.
Fuente: Grupo de Termotecnia.

Como se puede observar en la figura anterior, las calles de Sevilla tienen relaciones de aspecto comprendidas mayoritariamente en el rango 0.4 a 2.6, las cuales representan alrededor del 90 % del total. En base a lo anterior y a lo expuesto en el *Apartado 1.3. Influencia de la geometría urbana en el fenómeno isla de calor*, en el que se clasifican los cañones urbanos en función de su relación de aspecto, las calles de Sevilla pueden englobarse principalmente en las tipologías “avenida” o “normal”, al presentar relaciones de aspecto menores a 0.5 y 1 respectivamente. Del mismo modo, es notable el menor número de calles que se encuadrarían en la categoría de cañón “profundo”, con relaciones de aspecto mayores a 2. Esta última tipología urbana estaría situada principalmente en el casco antiguo de la ciudad, en el que predominan las calles estrechas y con edificios de altura reducida.

2.2.2 SELECCIÓN DE VIALES DE LOS CASOS A ESTUDIO

Una vez definidas las relaciones de aspecto que caracterizan las calles de Sevilla, se ha considerado interesante la realización de una composición de fotografías a pie de calle de cada uno de los casos propuestos para su análisis, cuyo objetivo es ejemplificar calles que representen las relaciones de aspecto que se han analizado en el estudio tomado como base para la realización de este proyecto.

En la Figura 2.3 se muestra una vista aérea de Sevilla en la que se han marcado las ubicaciones de las calles seleccionadas para representar las tipologías de calles existentes. La elección de estas calles se ha realizado escogiendo una calle con edificios cuyos ancho y alto sean típicos de cada uno de los distintos barrios de la ciudad. Pese a que se conoce que en un barrio es posible la existencia de diferentes tipologías de calle, se considera que de esta forma se tendrá una representación bastante acertada, al ser la ordenación por barrios un elemento clave en lo que a la dimensión de las calles y altura de los edificios se refiere. No obstante, como se comentará posteriormente en este apartado, es necesario elegir unas dimensiones características dentro de una calle, puesto que no todos los edificios tienen el mismo número de plantas, y, por tanto, la determinación de la altura del cañón no es un aspecto que se pueda calcular de forma directa.

Como se puede apreciar en la Figura 2.3, las calles del Casco Antiguo (correspondientes a los marcadores 3,4,5,7 y 8) se caracterizan por tener edificios bajos con dos o tres plantas de altura y calles estrechas. Por el contrario, las grandes avenidas tienen un ancho de calle mucho mayor y edificios con un número de plantas variable, pudiendo oscilar este entre 6 y 10 en los casos de estudio considerados.

Para concluir este apartado, se ha elaborado la Tabla 2.1 en la que se muestran casos reales de calles cuya relación de aspecto se encuentra dentro de los valores obtenidos en el estudio realizado por el *Grupo de Termotecnia*. En esta tabla, se han recogido, para varias de las calles presentadas en la Figura 2.3, la altura media de los edificios, el ancho de la calle, la relación de aspecto y el número medio de plantas de los edificios representativos de cada calle. Para la realización de esta tabla, se han medido de forma aproximada los anchos de las calles con la ayuda de *Google Earth*. Con respecto a la altura de planta libre entre suelo y techo de los edificios, se ha supuesto un valor medio de 2.50 m, al considerarse este valor representativo de la mayoría de edificaciones existentes en la actualidad.

Tabla 2.1. Relaciones de aspecto de calles típicas de Sevilla. Fuente: Elaboración propia.

Nº	Calle	Nº medio de plantas	H [m]	W [m]	H/W [-]
1	Av. República Argentina	8	20	29	0.69
4	C/ Torres	2	5	4.5	1.11
6	Av. José Laguillo	6	15	28	0.54
7	C/ Federico Rubio	3	7.5	3	2.50
10	C/ Enrique Flórez	2	5	6	0.83
11	C/ Estrella Betelgeuse	4	10	26	0.38
12	C/ Periodista Eduardo Chinarro Díaz	8	20	35	0.57



Figura 2.3. Vista aérea general de la zona de estudio y situación en planta de las fotografías realizadas. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE SIMULACIÓN EN ANSYS FLUENT

Este apartado tiene como finalidad describir el procedimiento llevado a cabo para definir completamente las características del problema que se pretende simular, es decir, la simulación del movimiento del aire en el interior del cañón para distintas relaciones de aspecto. A tal efecto, y como ya se ha comentado con anterioridad en la introducción a este capítulo, se ha empleado el software *Ansys Fluent*. Este software, líder en la industria del análisis de fluidodinámica computacional (CFD, del inglés *Computational Fluid Dynamics*), permite simular y visualizar gráficamente el comportamiento de un fluido a su paso por una superficie definida mediante el establecimiento de ciertas condiciones de contorno.

Los siguientes puntos recogen, de forma detallada, la metodología seguida, la cual consta en síntesis de tres pasos principales: definición de la geometría, creación del mallado y modelado para la obtención de resultados con *Fluent*. Este proceso se muestra de forma resumida en el diagrama de flujo de la Figura 2.4. Es preciso notar que el procedimiento recogido aquí es de carácter general y el aplicado para la obtención de los primeros resultados. No obstante, y como se verá en apartados posteriores de este capítulo, ha sido necesario introducir pequeñas modificaciones en el modelado para tener en cuenta las nuevas variables añadidas al problema.



Figura 2.4. Diagrama de flujo del procedimiento seguido para la simulación en Ansys Fluent. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

El primer paso para realizar la simulación es la definición de una geometría cerrada que represente de forma simplificada el volumen del que dispone el aire para su circulación. Este volumen será el formado por el espacio libre del cañón flanqueado por edificios en sus laterales, y un espacio superior por el que se produce la entrada de aire.

Partiendo de la observación directa de la geometría urbana, se ha optado por definir una geometría como la mostrada en la Figura 2.5, en la que los principales parámetros son la altura y el ancho de la calle, como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones a lo largo de este proyecto. El resto de dimensiones que permiten definir la geometría pueden calcularse tomando como referencia el ancho de la calle (W) o la altura de la depresión (H). Puesto que el objetivo de simular varios casos con distintas relaciones de aspecto es comparar los resultados obtenidos, se debe establecer un dominio del fluido homogéneo fijo para todos los casos. Como se comentará posteriormente en este apartado, la altura de la depresión se va a considerar consante y de valor 9 m, siendo el ancho el parámetro que varía de un caso simulado a otro. Por lo tanto, se tomará como referencia para establecer el resto de dimensiones la altura de la depresión (H), ya que si se realizara en función del ancho, se tendría una gran variación en el tamaño del dominio del fluido entre el caso con la relación de aspecto más pequeña y el que tiene una relación de aspecto mayor. Esto supondría un error implícito mucho mayor en los resultados de los casos a medida que la relación de aspecto aumenta.

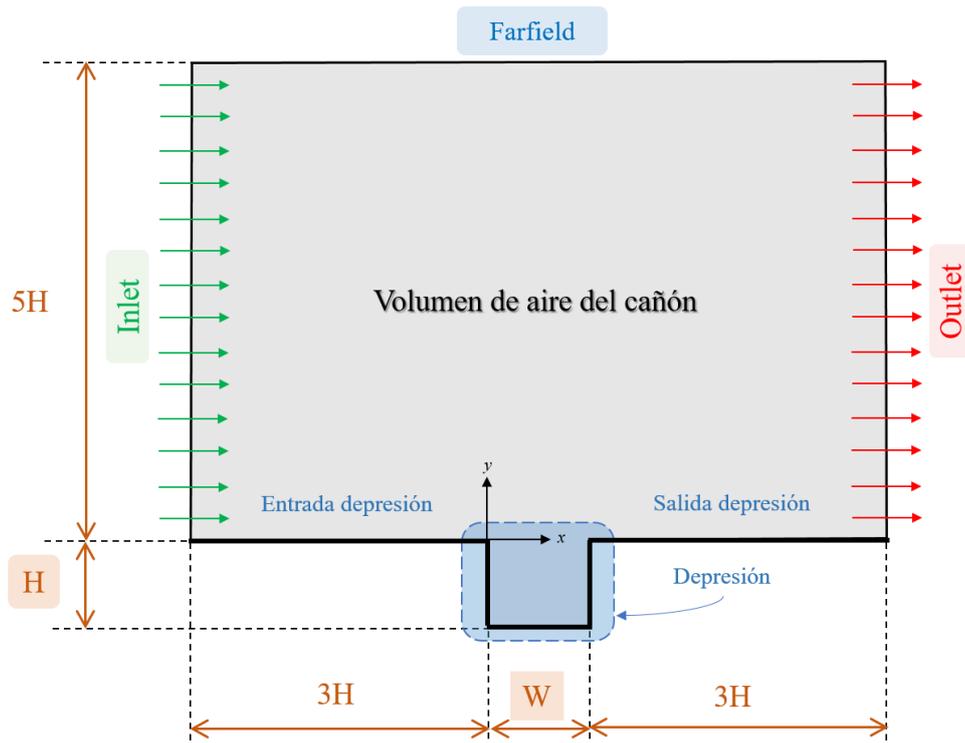


Figura 2.5. Dimensiones características de un cañón urbano y nomenclatura de las zonas consideradas. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con lo contenido en el párrafo anterior, las regiones de entrada y salida a la depresión tendrán una longitud de $3H$ (27 m) y la altura libre por encima de los edificios será cinco veces el valor de este parámetro (45 m). La elección del coeficiente que multiplica a la altura de la depresión es libre, sin embargo, se han considerado esos valores al ser los óptimos para conseguir un volumen del dominio del fluido suficientemente amplio y adecuado que permita realizar una simulación correcta.

Una vez se tiene la geometría definida, es preciso indicar sus dimensiones. Puesto que el único dato del que se dispone son las distintas relaciones de aspecto, se supondrá para todos los casos de estudio una altura del cañón de 9 m, siendo por tanto el ancho del mismo una variable que se puede obtener de forma directa. En la Tabla 2.2 se encuentran recogidos los valores numéricos para cada uno de los casos que se simularán.

Tabla 2.2. Dimensiones del cañón para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.

H/W [-]	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
W [m]	45	22.5	15	11.25	9	6	4.5	3.6	3	2.571	2.25	2	1.8

Finalmente, partiendo de la geometría dibujada, se genera una superficie sólida sobre la que posteriormente se realizará el mallado y el resto de operaciones para completar la simulación.

2.3.2 CREACIÓN DEL MALLADO

Tras la definición de la geometría del cañón, el siguiente paso consiste en discretizar espacialmente esta geometría, es decir, realizar un mallado del volumen. Se considera que el mallado propuesto en este apartado presenta unas características adecuadas para la aplicación objeto del proyecto, que permitirá obtener resultados bastante precisos con un tiempo de cálculo razonable.

En el caso objeto de este proyecto, pese a no tratarse de una geometría muy compleja, se ha optado por un mallado no estructurado de tipo triangular con un tamaño de celda de 0.03 veces la altura de la calle para relaciones de aspecto menores o iguales a la unidad, y de 0.02 veces la altura de la calle para relaciones de aspecto mayores a la unidad.

Es importante destacar el tratamiento especial del mallado en las paredes que forman las zonas de entrada y salida de la depresión, así como en el propio cañón (según la nomenclatura de la Figura 2.5). Debido a la condición de contorno de no deslizamiento impuesta en las paredes de esta región, la velocidad pasará de tener el valor considerado en la zona superior del volumen de aire, a un valor nulo en la pared. Por lo tanto, para asegurar una transición correcta entre estas velocidades es preciso realizar una discretización más fina o refinamiento del mallado, habiéndose seleccionado la opción de “inflation” de entre las propuestas por el software. Este refinamiento de la malla se ha aplicado al contorno formado por las cinco paredes de las zonas de entrada a la depresión, depresión y salida de la depresión. En cuanto a las características de este refinamiento, se ha seleccionado como grosor de la primera capa 0.03 m y 20 capas como máximo. El criterio para la elección de estos valores ha sido forzar un valor menor que la unidad del parámetro “y+” o distancia a la pared adimensional. Este parámetro es de gran utilidad en las simulaciones de dinámica de fluidos computacional, y permite determinar la importancia relativa de los flujos viscoso y turbulento. Por lo tanto, al considerar un valor de y+ menor que la unidad, se tendrá un modelado preciso del flujo laminar que se presenta en las zonas cercanas a la pared.

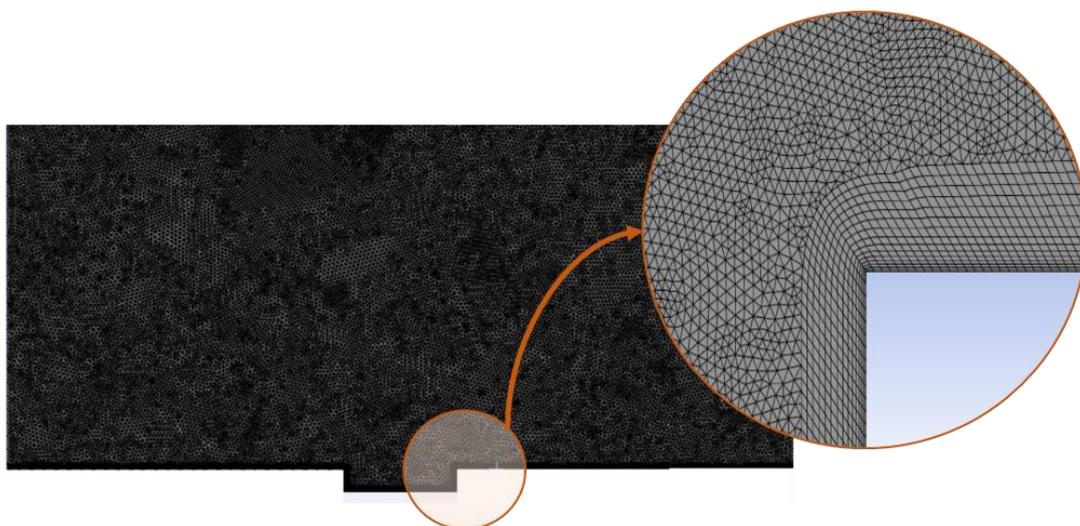


Figura 2.6. Detalle del mallado y refinamiento en las paredes de la depresión. Fuente: Elaboración propia.

El último aspecto para concluir con la generación del mallado implica nombrar cada uno de los ejes o elementos que delimitan la geometría del cañón. Se han considerado un total de cuatro ejes para la geometría definida en la Figura 2.5, los cuales se han nombrado como: “inlet”, “outlet”, “wall” (entrada a la depresión, depresión y salida a la depresión respectivamente) y “farfield” (zona lejana). Como se comentará en el siguiente apartado, este punto es de especial importancia, puesto que las condiciones de contorno serán definidas en base a la nomenclatura aquí establecida.

2.3.3 MODELADO DEL PROBLEMA

Una vez fijadas la geometría y el mallado, se está en disposición de realizar el modelado del cañón. En esta última operación, se le indicarán al software de cálculo aspectos como el modelo empleado para la simulación CFD, el fluido del que se trata, las condiciones de contorno, el método de resolución, el número de iteraciones o la condición de convergencia.

Tal y como se avanzó en el apartado anterior, las condiciones de contorno sirven para establecer qué papel tiene cada superficie de la geometría considerada en la simulación (zonas de entrada y salida del fluido, por ejemplo), y cómo esta influye en la circulación del fluido al producirse la interacción entre este y las distintas superficies.

Partiendo de la nomenclatura establecida, se han asignado las siguientes condiciones de contorno, para todos los casos simulados, en función de las opciones de las que dispone el software:

- **Inlet:** “velocity-inlet”, de magnitud 1 m/s y componente puramente horizontal, para la zona por la que se produce la entrada de aire a la geometría.
- **Interior surface body:** “interior”, para el interior de la geometría.
- **Outlet:** “pressure outlet”, para la zona de salida del fluido como una diferencia de presión.
- **Wall:** “wall”, para las zonas de entrada a la depresión, depresión y salida de esta.
- **Farfield:** “symmetry”, para simular que la zona lejana o cielo no tiene condición de contorno.

El resto de aspectos que se le han indicado al programa se encuentran enumerados a continuación:

- Para el **modelo de turbulencia** se ha optado uno de los modelos más empleados en las simulaciones de dinámica de fluidos computacional: el modelo K-epsilon RNG. Este modelo, basado en dos ecuaciones diferenciales parciales de transporte, se emplea para simular fluidos en condiciones de flujo turbulento, y permite obtener resultados bastante acertados con solo proporcionarle como entrada las condiciones de contorno, gracias a las mejoras aportadas al añadir el modelo RNG.
- En cuanto al **tratamiento cercano a la pared**, se ha seleccionado un modelo mejorado “Enhanced Wall Treatment”, que combina un modelo de dos capas. Esto es posible gracias al refinamiento de la malla que se ha realizado en las zonas correspondientes a la depresión del cañón.
- El **fluido** considerado es aire, siendo sus propiedades las indicadas por defecto en el programa.
- El **método de resolución** usado en el cálculo se ha basado en un esquema simple para el acoplamiento presión-velocidad, un esquema estándar para la discretización espacial de la ecuación de presión, y con ecuaciones de segundo orden para el momento, la energía cinética de turbulencia y la disipación de turbulencia en energía calorífica.
- Por otra parte, el **valor residual** a partir del cual se considerará que se ha alcanzado la condición de convergencia y, por tanto, ha finalizado la simulación, ha sido de 0.0001 para las ecuaciones de continuidad, velocidad en dirección “x”, velocidad en dirección “y”, así como en los parámetros que caracterizan el modelo de turbulencia, es decir, “k” y “ε”. Se considera que este valor de residuales es adecuado para la aplicación objeto de este proyecto, al proporcionar buenos resultados con un coste computacional asumible.
- Finalmente, el número de **iteraciones** máximas se ha fijado en 5000 para todos los casos analizados.

Con todo lo anterior, es posible iniciar la simulación de los casos analizados y obtener los campos de velocidad o líneas de corriente de cada uno de ellos. Los resultados obtenidos en primera aproximación se encuentran recogidos en el siguiente capítulo.

2.4 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD

En la descripción del procedimiento realizada anteriormente se estableció una velocidad de entrada del aire de componente puramente horizontal de valor 1 m/s para todos los casos objeto de análisis. Sin embargo, con objeto de realizar un análisis más profundo de todos los parámetros que afectan al movimiento del aire en cañones urbanos y su influencia en factores como la concentración de contaminantes o la acumulación de calor, el valor de la velocidad del flujo del aire de entrada debe ser estudiado.

A tal efecto, se realizará un estudio de velocidades en el que se simulará el caso sin generación de calor para diferentes valores de la velocidad del aire de entrada, siendo los valores considerados 0.25, 0.5, 0.75, 1.5, 3, 5, 7.5 y 10 m/s, además del ya analizado inicialmente en el que se fijó un valor constante de 1 m/s. Por otra parte, no se analizarán todas las relaciones de aspecto, puesto que el principal objetivo de este estudio es ver cómo afecta a las variables del problema el valor de la velocidad. No obstante, se conoce que la relación de aspecto del cañón es el principal condicionante de los resultados obtenidos, por lo que, para tener un espectro que abarque todas las relaciones de aspecto analizadas en otras ocasiones, este estudio de velocidades se realizará para tres relaciones de aspecto consideradas representativas del resto: un cañón poco profundo (0.2), un cañón normal (1.0) y un cañón profundo (3.0), de acuerdo a la clasificación de los cañones urbanos establecida en el *Apartado 1.3*.

El único aspecto a considerar para realizar las simulaciones de este estudio de velocidad es modificar el valor de la componente horizontal de la velocidad en la pestaña de condiciones de contorno de la zona de entrada al subvolumen exterior. El resto de parámetros necesarios para la simulación se mantienen de acuerdo a lo descrito en el procedimiento general. Por otra parte, los tamaños de malla considerados en cada uno de los casos de relación de aspecto son 0.27 m, 0.18 m y 0.135 m respectivamente. Como se comentará en el siguiente apartado, este tamaño de malla viene impuesto por la limitación que presenta la versión de estudiantes de *Ansys Fluent* que se ha empleado para la realización de las simulaciones objeto de este proyecto.

2.5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

En el presente apartado se reflejan las correcciones realizadas al modelo general descrito en el *Apartado 2.3* con objeto de incluir una variable fundamental que tendrá una gran influencia en el problema objeto de estudio del presente TFM: la temperatura. Puesto que, en líneas generales, la metodología seguida para la implementación de este nuevo caso en *Ansys Fluent* es similar a la descrita en dicho apartado, en este punto solo se enumeran los aspectos que difieren con respecto al modelo planteado inicialmente.

El primer cambio respecto al modelo anterior se produce en el paso correspondiente a la definición de la **geometría**. Mientras que en el caso sin considerar la influencia de la temperatura se modeló a partir de una geometría con una sola zona del dominio del fluido, en este nuevo modelo es necesario dividir en varias zonas distintas. En la zona de la depresión, se introducirá un valor de generación de calor (en W/m^3) para incluir la influencia de la temperatura en el modelo, mientras que en las otras dos zonas exteriores a la depresión no existe generación de calor, pero deben definirse para completar el dominio del fluido y establecer las condiciones de velocidad y temperatura del aire a la entrada.

Cabe destacar que, para introducir la generación de calor en la zona de la depresión solo sería necesario dividir el dominio del fluido en dos subvolúmenes, uno correspondiente a la zona exterior y otro para la depresión. Sin embargo, de esta forma se genera una línea o interfaz en la zona compartida entre esos dos subvolúmenes que requiere un tratamiento bastante engorroso en la definición del resto de los parámetros de la simulación y que podría llevar

fácilmente a error. Debido a esto, se ha generado un tercer subvolumen que engloba a la zona exterior anterior. Con la introducción de este nuevo subvolumen, se obtendrán los mismos resultados, siendo el procedimiento mucho más sencillo.

Al igual que se realizó en el caso sin generación de calor, la geometría del dominio del fluido se definirá en función de la altura de la depresión, la cual permanece constante para todas las relaciones de aspecto. En este caso, lo que antes constituía la zona exterior, se dividirá en dos subvolúmenes, en adelante llamados “exterior” e “interior”, siendo las dimensiones totales las mismas que en el caso sin generación. De esta forma, si las regiones de entrada y salida tenían una longitud de $3H$, ahora se repartirá esta longitud en $2H$ para la exterior y H para la interior; de igual forma, la altura total $5H$ se repartirá en $2H$ para la interior y $3H$ para la exterior. Para facilitar la comprensión, en la Figura 2.7 se ha representado el dominio del fluido indicando los tres subvolúmenes y las dimensiones características de cada una de las zonas.

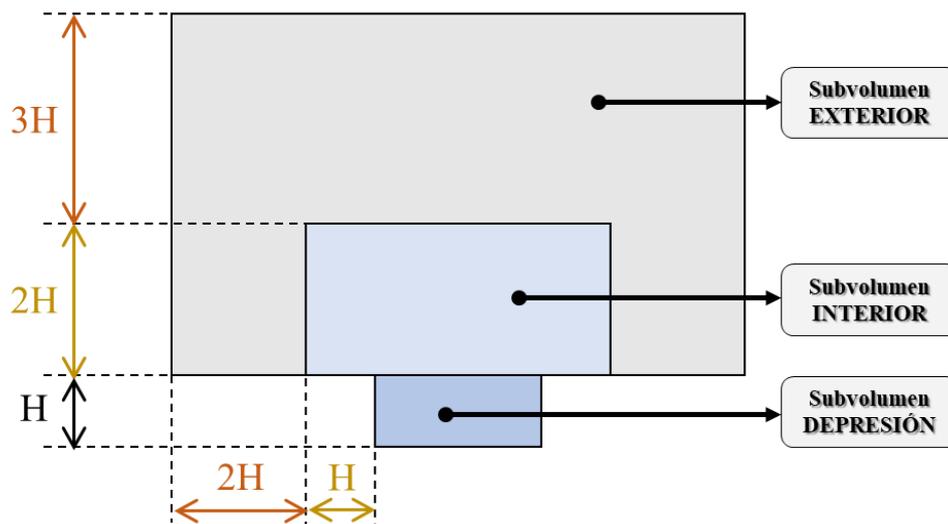


Figura 2.7. Esquema de la distribución en subvolúmenes y dimensiones de cada zona en función de la altura de la depresión. Fuente: Elaboración propia.

Una vez dibujadas las tres geometrías, se generarán tres “cuerpos”, que representan respectivamente la zona exterior a la depresión, la propia depresión o cañón y una zona más exterior que envuelve a la intermedia. Finalmente, se seleccionan las tres geometrías dibujadas y se añade un “part” llamado fluido, es decir, se le indica al software que en los tres subvolúmenes habrá el mismo fluido, que en este caso es aire.

Otra variación de gran importancia con respecto al modelado del caso generado inicialmente, se da en el **mallado**. En primer lugar, al abrir el entorno de *Ansys Fluent* correspondiente para definir las características del mallado del cuerpo, es necesario seleccionar la opción “capture proximity”, la cual permitirá una mejor definición de las esquinas de la geometría y de la zona donde confluyen las tres geometrías.

El siguiente aspecto que cambia con respecto al problema tratado en el *Apartado 2.3* aparece como consecuencia de haber introducido un tercer subvolumen en el dominio del fluido (“zona exterior” según la figura anterior). Si bien sería posible mallar todo el dominio del fluido con el mismo tamaño de malla, esto supondría un gran coste computacional que derivaría en un tiempo de simulación bastante elevado para la aplicación objeto de este proyecto. Por lo tanto, se han distinguido dos tipos de mallado en las regiones que forman el problema, siendo estos los mallados “tipo A” y “tipo B” que aparecen reflejados en la Figura 2.8. De esta forma, en el subvolumen exterior se tendrá un tamaño de malla más grande que en los subvolúmenes interior y depresión, siendo el tamaño de malla un coeficiente multiplicador de la altura de la depresión, el cual varía en función de la relación de aspecto del cañón.

Se ha adoptado este criterio puesto que se considera que los resultados más precisos deben darse en la zona de la depresión y la inmediatamente cercana a esta, es decir, el subvolumen interior; mientras que en el subvolumen exterior no es necesario realizar un mallado tan fino puesto que su principal misión es crear un dominio del fluido suficientemente amplio y de dimensiones constantes a lo largo de todas las simulaciones realizadas.

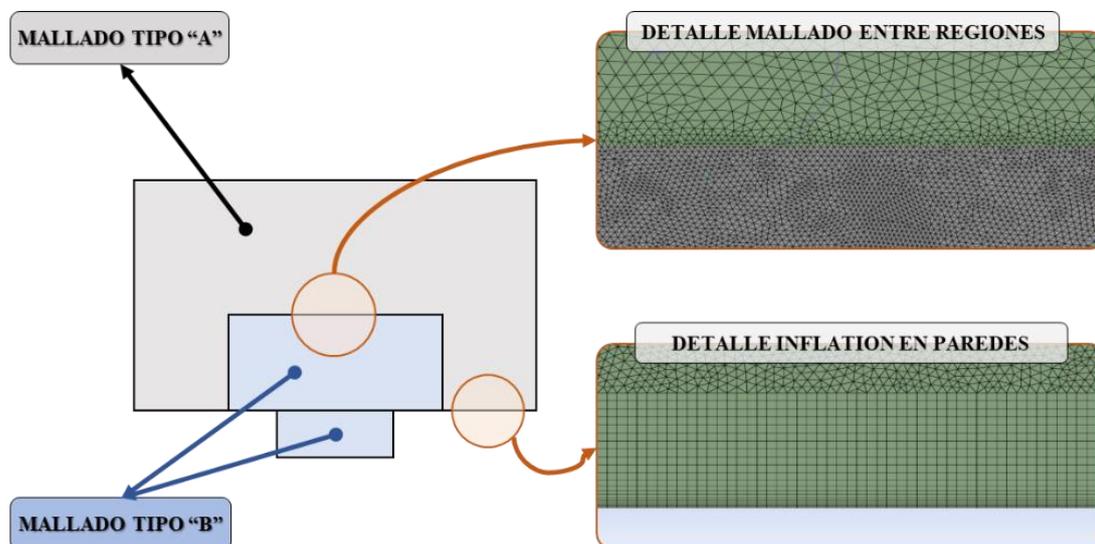


Figura 2.8. Identificación del tipo de mallado empleado en cada zona, detalle del mallado entre regiones y detalle de la inflación en paredes. Fuente: Elaboración propia.

Es preciso destacar que la elección del coeficiente multiplicador de la altura del cañón que permite definir el tamaño del mallado se ha visto limitada por el número máximo de celdas permitido en la versión de estudiante de *Ansys Fluent* que se ha empleado para la realización de este proyecto, siendo este número máximo de 500000 celdas. Además, el criterio para la selección del coeficiente multiplicador también tiene en cuenta la relación de aspecto de la depresión: para relaciones de aspecto mayores que la unidad, se calculará el tamaño de malla en función del ancho W , mientras que para relaciones de aspecto menores que la unidad, se hará tomando como base la altura H . La justificación que respalda la elección de estos criterios es buscar un mallado lo suficientemente fino que permita obtener unos resultados precisos, con un coste computacional razonable y teniendo en cuenta las limitaciones de la versión del software de cálculo empleada.

Del mismo modo que se realizó en el apartado anterior, en este caso también es necesario definir un mallado más fino en las zonas de la geometría próximas a las paredes. Las características del refinamiento son iguales a las descritas en el *Apartado 2.3*, por lo que no se vuelven a recoger aquí.

En la Tabla 2.3 se han recogido, para mayor comprensión del lector, los tamaños de malla de las zonas "tipo A" y "tipo B" para cada una de las relaciones de aspecto objeto de estudio, además del coeficiente empleado para calcular cada tamaño de malla. Como se puede observar, en las últimas relaciones de aspecto ha sido necesario aumentar aún más el tamaño de malla, debido a la limitación comentada líneas arriba sobre el número máximo de celdas. A pesar de tener que realizar este cambio, se ha buscado siempre aumentar en primer lugar el tamaño de malla "tipo B" frente al "tipo A", ya que su influencia en los resultados obtenidos es menor.

Tabla 2.3. Tamaño de malla utilizado en cada región en función de la relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.

H/W [-]	W [m]	Mallado tipo "A"		Mallado tipo "B"	
		Tamaño de celda [m]	Criterio	Tamaño de celda [m]	Criterio
0.2	45	0.18	0.02H	0.45	0.05H
0.4	22.5	0.18	0.02H	0.45	0.05H
0.6	15	0.18	0.02H	0.45	0.05H
0.8	11.25	0.18	0.02H	0.45	0.05H
1.0	9	0.18	0.02H	0.45	0.05H
1.5	6	0.12	0.02W	0.3	0.05W
2.0	4.5	0.09	0.02W	0.225	0.05W
2.5	3.6	0.072	0.02W	0.18	0.05W
3.0	3	0.06	0.02W	0.15	0.05W
3.5	2.57143	0.0514	0.02W	0.18	0.07W
4.0	2.25	0.045	0.02W	0.1575	0.07W
4.5	2	0.06	0.03W	0.2	0.1W
5.0	1.8	0.054	0.03W	0.18	0.1W

Finalmente, en el entorno del **modelado** final de *Fluent* también se producen ciertos cambios, los cuales se encuentran enumerados a continuación:

- Se debe activar la inclusión de la ecuación de la energía en el modelo a utilizar, ya que se pretende comprobar la influencia de la temperatura en los resultados obtenidos. Esta ecuación es de segundo orden al igual que el resto de ecuaciones que intervienen en la resolución del problema.
- En el modelo de turbulencia viscoso, es preciso marcar la opción "Viscous heating". Con este cambio, se incluirá un nuevo término de disipación viscosa, el cual describe la energía térmica generada por el cizallamiento en el flujo de corte.
- El valor de los residuales para la ecuación de la energía se ha considerado igual que en las variables anteriores, siendo este valor de $1 \cdot 10^{-4}$.
- La introducción de la influencia de la temperatura en el modelo se realiza a partir de la definición de una fuente de calor constante de valor 200 W/m^3 en el apartado de "Cell zone conditions" de la depresión. Se ha adoptado este valor para que exista un contraste apreciable entre la zona de la depresión y la zona interior que permita visualizar con facilidad el gradiente de temperatura y la variación de los resultados. Conviene mencionar en este punto que la generación de calor introducida de esta forma considera una generación de calor uniforme en todo el subvolumen de la depresión, y no en zonas concretas como se produce en la realidad. Para implementar esta última opción, sería necesario discretizar la zona de la depresión en un número mayor de subvolúmenes, sin embargo, se ha realizado considerando un solo subvolumen al tratarse de una primera aproximación.
- Por último, en la condición de contorno relativa a la zona de entrada ("inlet"), además de introducir una velocidad de 1 m/s con componente puramente horizontal, se indicará una temperatura constante del aire de entrada de valor 298 K ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) en la pestaña "Thermal".

Con todo lo anterior, se está en disposición de iniciar la simulación de cada una de las geometrías estudiadas en el presente proyecto. En el siguiente capítulo se presentan los contornos de temperatura obtenidos en la zona de la depresión, además del resto de resultados extraídos de las simulaciones realizadas considerando el efecto de la temperatura.

2.6 CALOR ANTROPOGÉNICO REAL

El primer estudio dependiente de la temperatura realizado en el apartado anterior tiene como objetivo principal obtener una primera representación de la distribución de temperaturas en la zona de la depresión y valorar las temperaturas máximas alcanzadas. Para ello, se introdujo una generación de calor de 200 W/m^3 en el subvolumen de la depresión del cañón.

A pesar de ello, la generación de calor impuesta no es una representación fiel del calor realmente generado en una calle, puesto que es un valor muy elevado y se considera constante en todo el subvolumen. Por lo tanto, en este nuevo estudio se pretende realizar una nueva simulación considerando ahora una generación de calor más localizada en la zona inferior de la depresión, que representará el calor antropogénico debido al tráfico, personas y equipos de climatización presentes en las calles, siendo estos elementos junto con otros el origen del efecto isla de calor urbana.

Con el propósito de analizar cómo el movimiento de aire retira el calor antropogénico generado en las calles y la influencia de la geometría en la retención de ese calor y los flujos de aire generados, se simularán las diferentes relaciones de aspecto objeto de estudio de este proyecto con una generación de calor ubicada únicamente en el subvolumen inferior de la calle, el cual tendrá una altura de 2 m, frente a los 9 m de altura total de la depresión (según la Figura 2.9). Se ha considerado esta altura para el subvolumen al ser representativa de la zona ocupada por los peatones. Las condiciones de contorno del aire de entrada se han establecido en una velocidad de componente puramente horizontal de 2 m/s y una temperatura de 298 K (25 °C).

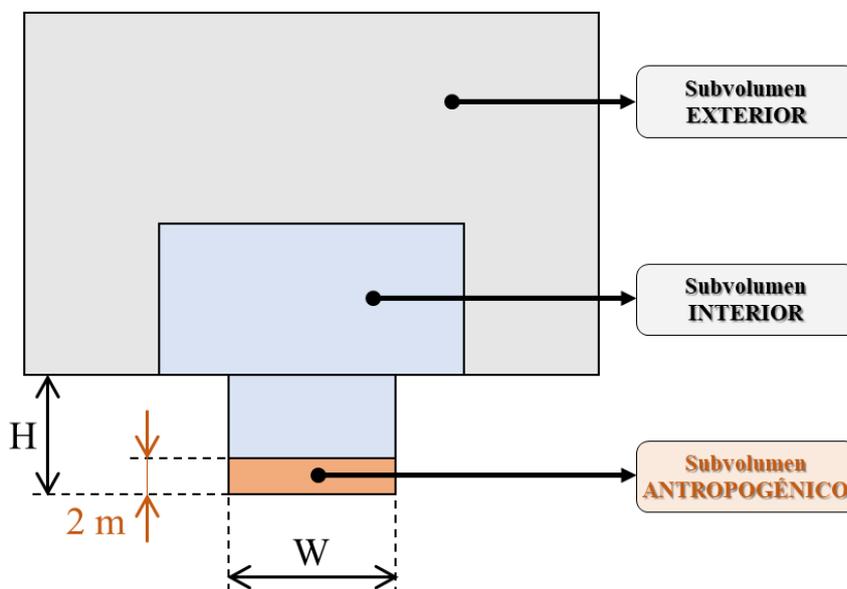


Figura 2.9. Distribución de subvolúmenes para el caso con generación de calor debido a la actividad antropogénica. Fuente: Elaboración propia.

El valor de la generación de calor volumétrica a introducir en las condiciones del fluido en ese subvolumen se ha establecido en un valor constante de 6 W/m^3 para todas las relaciones de aspecto, obtenido a partir de la ecuación (2.1). Cabe recalcar que la tercera dimensión o profundidad de la calle es considerada en *Ansys Fluent* como 1 m.

$$Q_{gen} = \frac{12 \frac{W}{m^2} \cdot \text{Área suelo} [m^2]}{\text{Volumen} [m^3]} = \frac{12 \frac{W}{m^2} \cdot (W \cdot 1) m^2}{(W \cdot 2 \cdot 1) m^3} = 6 \frac{W}{m^2} \quad (2.1)$$

Además de las ya citadas variaciones en los valores de la velocidad del aire a la entrada y la generación de calor volumétrica, se ha realizado un cambio en el refinamiento de las zonas de la geometría definidas como “wall”. Se ha optado por una mejor calidad de mallado en la pared para obtener unos datos más precisos, siendo en este caso el “inflation” consistente en una primera capa de 0.005 m de espesor y con 20 capas. El resto de parámetros para definir la simulación se ajustan a lo descrito en el procedimiento anterior, por lo que no se vuelven a recoger aquí.

2.7 PARÁMETROS DE INTERÉS

Al finalizar los procedimientos descritos en los apartados anteriores se dispone de una infinidad de datos que podrán ser postprocesados y ayudarán a entender mejor el movimiento de aire en los cañones urbanos. Además de los resultados gráficos que se obtienen en primera instancia y que resultan de especial interés por su carácter visual, es interesante calcular una serie de parámetros numéricos que cuantifiquen lo expresado en dichos gráficos.

Para ello, entre otras muchas variables, se dispone de los campos de temperatura, velocidad y posición de los nodos pertenecientes a la línea que separa la zona interior y la zona de la depresión. Con estos valores, se han calculado las variables del caudal real o medio, caudal equivalente y número de renovaciones por hora del volumen de aire de la depresión. Para mayor facilidad del lector, y al igual que se ha realizado en el resto de apartados, se han dividido las expresiones matemáticas para el cálculo de las variables de los resultados obtenidos y su análisis, estando contenidas estas dos partes en este capítulo y en el siguiente respectivamente.

2.7.1 CAUDAL REAL

La primera variable que resulta de interés calcular en cualquier problema de mecánica de fluidos como el objeto de este proyecto es el caudal real o caudal másico medio que entra a la zona de la depresión, el cual se define como la cantidad de aire que entra por una superficie independientemente de su procedencia, es decir, este caudal incluye el aire recirculado de los vórtices que se forman en el cañón.

La expresión que permite calcular el caudal másico real en cada nodo “j” es la siguiente:

$$Q_j = v_{y,j} \cdot \rho \cdot L_j \quad (2.2)$$

Donde,

- Q_j [kg/s] es el caudal másico que entra a la zona de la depresión en el nodo “j”.
- $V_{y,j}$ [m/s] es la velocidad vertical de las partículas de fluido que entra a la zona de la depresión en el nodo “j”.
- ρ [kg/m³] es la densidad del aire, la cual se supondrá constante con la temperatura e igual a 1.225 kg/m³, valor normalmente aceptado para unas condiciones estándar de presión y temperatura.
- L_j [m] es la longitud de entrada a la zona de la depresión.

Es preciso destacar que, en la práctica, los valores numéricos que se obtienen como salida del proceso de simulación son el campo de desplazamientos y el campo de velocidades en cada nodo extremo de los segmentos considerados, siendo estos nodos variables en cada caso en función del tamaño de malla establecido. Sin embargo, tanto la posición como la velocidad no son constantes a lo largo de un segmento, por lo que se hace una pequeña modificación en la ecuación (2.2) para considerar la variabilidad de los dos parámetros implicados. Este cambio consiste en sustituir la velocidad en cada nodo por su valor medio a lo largo del segmento, y la posición por el incremento de posición de cada nodo con respecto al siguiente, lo que en definitiva representaría la longitud de cada segmento. Con lo anterior, la ecuación inicial queda como sigue:

$$Q_i = \overline{v_{y,i}} \cdot \rho \cdot \Delta x_i \quad (2.3)$$

Donde,

- $\overline{v_{y,i}}$ [m/s] es la velocidad media del segmento “i”, obtenida como la media aritmética de las velocidades en los nodos “j” del segmento “i”.
- Δx_i [m] es la longitud del segmento “i”, calculado como la diferencia entre los puntos inicial y final del mismo.
- ρ [kg/m³] es la densidad del aire, la cual se supondrá constante con la temperatura e igual a 1.225 kg/m³, valor normalmente aceptado para unas condiciones estándar de presión y temperatura.

Al aplicar la ecuación (2.3), se obtienen los valores del caudal real en cada segmento “i”. No obstante, el objetivo final de este apartado es hallar el valor del caudal real total que entra a la zona de la depresión, el cual se puede obtener por adición de los caudales individuales calculados anteriormente. Para ello, solo se tendrán en cuenta aquellos segmentos cuya velocidad vertical sea negativa, siendo esto un factor indicativo de que el flujo está entrando a la depresión en ese segmento. En la Figura 2.10 se ha representado un esquema del criterio adoptado para la consideración de flujo entrante o saliente a la depresión en función del signo de la componente vertical de la velocidad.

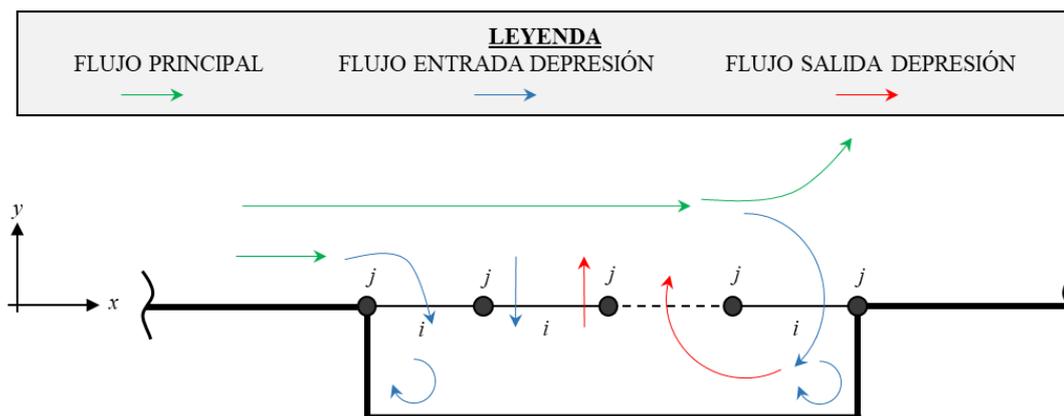


Figura 2.10. Esquema del criterio sobre líneas de flujo entrante y saliente a la depresión para “i” segmentos con “j” extremos. Fuente: Elaboración propia.

2.7.2 CAUDAL EQUIVALENTE

El siguiente parámetro que se va a calcular es el caudal equivalente, cuya principal diferencia con el anterior es que este únicamente tiene en cuenta en su cálculo el caudal que entra de un subvolumen equivalente con una temperatura exterior para mantener la temperatura del aire interior.

El caudal equivalente de un segmento “i” puede obtenerse con la ecuación que resulta al plantear un sencillo balance de energía:

$$\sum_{i=1}^n \overline{v_{y,i}} \cdot \rho \cdot \Delta x_i \cdot (T_i - T_1) = Q_{eq,i} \cdot (T_0 - T_1) \quad (2.4)$$

Donde,

- $\overline{v_{y,i}}$ [m/s] es la velocidad media del segmento “i”, obtenida como la media aritmética de las velocidades en los nodos “j” del segmento “i”.
- ρ [kg/m³] es la densidad del aire, la cual se supondrá constante con la temperatura e igual a 1.225 kg/m³, valor normalmente aceptado para unas condiciones estándar de presión y temperatura.
- Δx_i [m] es la longitud del segmento “i”, calculado como la diferencia entre los puntos inicial y final del mismo.
- T_i [K] es la temperatura media en el segmento “i”, calculada como la media aritmética de las temperaturas en los nodos “j” del segmento “i”.
- T_1 [K] es la temperatura media del subvolumen en el que se pretende calcular el caudal equivalente, es decir, el subvolumen en el que se produce la entrada de aire. El valor de esta variable se obtiene de *Ansys Fluent*.
- T_0 [K] es la temperatura exterior del subvolumen desde el que se produce la entrada de aire. Se considerará un valor constante de 298 K para este parámetro, quedando por tanto definidas las condiciones de velocidad (1 m/s) y temperatura del aire de entrada a la depresión.

Al igual que sucedía en el cálculo del caudal real, para la obtención del caudal equivalente total sólo se tendrán en cuenta las velocidades que tengan componente vertical negativa, siendo este el criterio establecido para distinguir las partículas que entran a la zona de la depresión del resto (Figura 2.10).

2.7.3 NÚMERO DE RENOVACIONES POR HORA

El último parámetro que se va a calcular en este apartado es el número de renovaciones de aire por hora (ACH, del inglés *Air Changes per Hour*). Este parámetro adimensional es una variable de gran interés en el sector de climatización de viviendas, puesto que permite cuantificar la renovación del aire que se produce en un volumen dado por unidad de tiempo. En el caso objeto de este proyecto, también tiene aplicación, al tratarse de un espacio en el que están presentes contaminantes de la misma forma que estarían en el interior de una vivienda. Con la obtención del ACH será posible evaluar la tasa por unidad de tiempo a la que se renueva el volumen de aire del cañón.

El número de renovaciones de aire por unidad de tiempo se define como el cociente entre el caudal de aire que entra al espacio y el volumen del espacio, según la siguiente expresión:

$$ACH = \frac{\dot{m}}{U_{ref} \cdot W \cdot 1m} \quad (2.5)$$

Donde,

- \dot{m} [kg/s] es el caudal de aire que entra a la depresión.
- ρ [kg/m³] es la densidad del aire, la cual se supondrá constante con la temperatura e igual a 1.225 kg/m³.
- U_{ref} [m/s] es la velocidad de referencia, supuesta con un valor de 1 m/s.
- W [m] es el ancho de la depresión.

Cabe mencionar que, pese a tratarse como un problema con geometría bidimensional en función del ancho W y la altura H , la depresión es un problema tridimensional que encierra un determinado volumen de aire. Por lo tanto, para calcular ese volumen se ha supuesto que la tercera dimensión tiene un valor de 1 m, siendo este el criterio considerado por *Ansys Fluent*.

Obtenidos los caudales real total y equivalente total como resultado de los apartados anteriores, se está en disposición de calcular el valor del parámetro ACH para estos dos casos, obteniendo respectivamente el ACH_{real} y el $ACH_{equivalente}$. Los resultados obtenidos junto con su análisis se han recogido en el siguiente capítulo.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El movimiento del aire en las ciudades es un aspecto condicionante del bienestar térmico percibido en sus espacios. Para empezar, influye en el confort térmico de los habitantes, ya que ayuda a la disipación de calor por convección del cuerpo humano. Asimismo, contribuye tanto de manera positiva como negativa, a la calidad del aire, ya que permite desplazar las masas de aire contaminado. En el movimiento de aire y los flujos generados, influyen un sinnúmero de variables termodinámicas tales como la temperatura o velocidad del aire de entrada, sin olvidar la geometría de la calle, que juega un papel primordial en la renovación del aire contaminado o con alta temperatura con flujos de aire exterior, entre otros aspectos. En definitiva, el análisis del movimiento de aire en las calles es un punto clave a tratar en un proyecto como el presentado en este proyecto.

El objetivo de este capítulo es mostrar y analizar los resultados obtenidos tras la simulación de las distintas casuísticas cuya metodología se ha recogido en el capítulo anterior. Para mayor facilidad, se ha dividido el capítulo de igual forma que el anterior, siendo los estudios que aquí se presentan los correspondientes al caso sin generación de calor, diferentes velocidades del aire de entrada a la depresión, generación de calor en el cañón, calor antropogénico real y valores numéricos de caudales y número de renovaciones por hora.

3.1 CASO SIN GENERACIÓN DE CALOR

3.1.1 LÍNEAS DE CORRIENTE

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras simular los trece casos estudiados en los que el aspecto diferenciador es la relación de aspecto. Para ello, se ha seguido el procedimiento recogido en el *Apartado 2.3. Descripción general del proceso de simulación en Ansys Fluent* del capítulo anterior.

En primer lugar, al finalizar la simulación, el programa muestra por pantalla una gráfica en la que se observa la evolución de los residuales de las principales variables del problema a medida que avanza el número de iteraciones. Los residuales son variables que cuantifican el error local de cada variable considerada en la solución del sistema de ecuaciones. Por lo tanto, esta gráfica es una herramienta de gran ayuda en los problemas iterativos como el realizado en este proyecto, para determinar si la simulación se ha realizado correctamente y ha alcanzado la convergencia, o si, por el contrario, es necesario simular de nuevo con un número mayor de iteraciones para conseguir una solución con mayor precisión numérica. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de la gráfica de residuales obtenida al finalizar la simulación de uno de los casos objeto de este proyecto, siendo las gráficas obtenidas para el resto de casos bastante similares a esta.

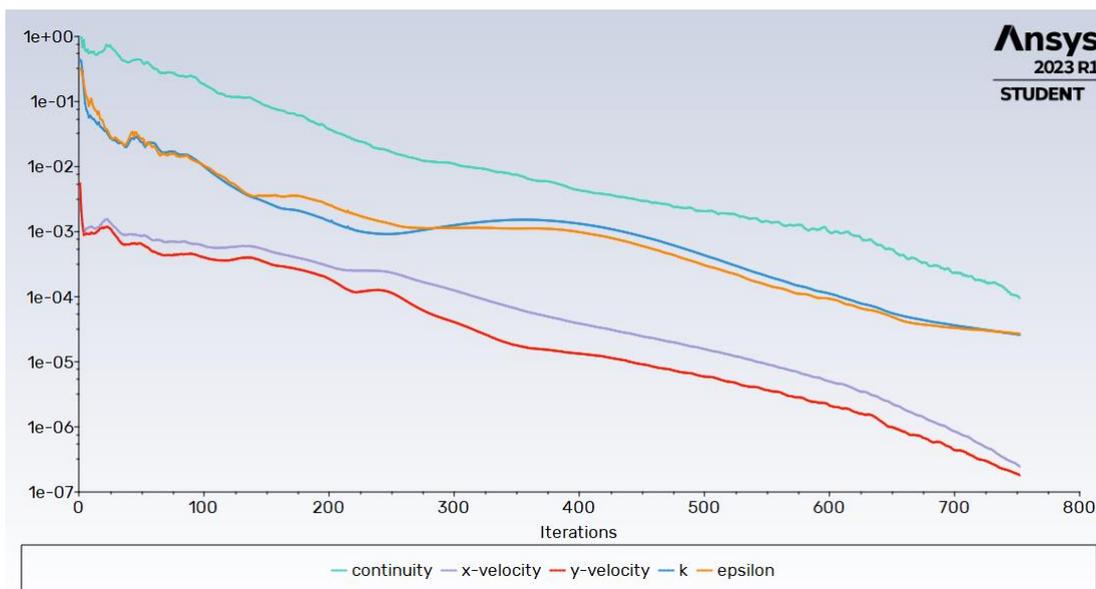


Figura 3.1. Ejemplo de gráfica de residuales para uno de los casos simulados. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los residuales de todas las variables que intervienen en el problema se sitúan como mínimo en 10^{-4} al finalizar la simulación, siendo el valor de otros residuales como las componentes “x” e “y” de la velocidad incluso menor (líneas morada y roja según la leyenda de la gráfica adjunta). Para una aplicación como la tratada en este proyecto, se considera que este valor de residuales es aceptable, por lo que se obtendrán los resultados gráficos con este número de iteraciones. Es conveniente notar que, al aumentar la complejidad del caso simulado, el programa ha necesitado mayor número de iteraciones para encontrar una solución según las restricciones impuestas, no alcanzándose en ningún caso las 5000 iteraciones máximas establecidas.

Como resultado inicial de estas simulaciones, se han representado gráficamente las líneas de corriente de velocidades, es decir, el lugar geométrico de los puntos tangentes al vector velocidad de las partículas de fluido en un instante determinado. Estos gráficos permiten visualizar el movimiento del fluido y su distribución dentro de la geometría considerada, lo cual es muy útil para determinar, entre otros aspectos, las zonas en las que se produce la recirculación del fluido. En los siguientes apartados de esta memoria se explorarán otras de las utilidades que ofrece el postprocesador de *Ansys Fluent*, todo ello encaminado a analizar y demostrar de una forma más realista el comportamiento del fluido analizado.

En las tablas inferiores se encuentran recogidos los gráficos de líneas de corriente obtenidos para las distintas relaciones de aspecto consideradas. Es preciso destacar que los gráficos se han agrupado según los valores máximo y mínimo del flujo másico (expresado en kg/s), para así visualizar de un modo más sencillo los patrones de flujo generados. De esta forma, el valor mínimo se ha establecido en todos los casos en 0 kg/s, mientras que el valor máximo toma los valores de 0.65, 0.8, 1.0 y 5.0 kg/s. Para ello, en la parte inferior de cada una de las tablas se encuentra una leyenda que indica la escala de color característica de cada uno de los gráficos mostrados en esa tabla.

Tabla 3.1. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 0.2 y 2.0. Fuente: Elaboración propia.

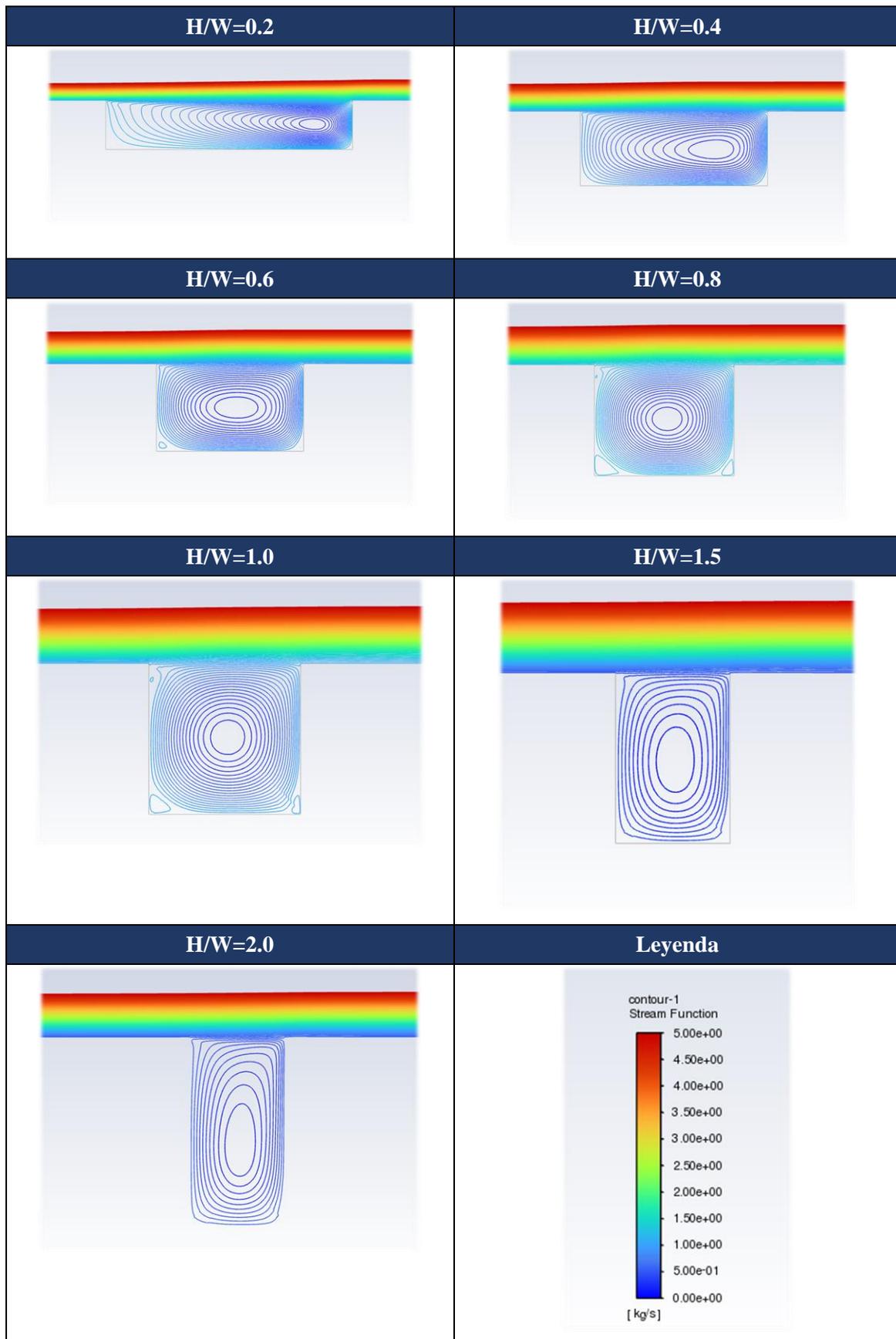


Tabla 3.2. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 2.5 y 3.0. Fuente: Elaboración propia.

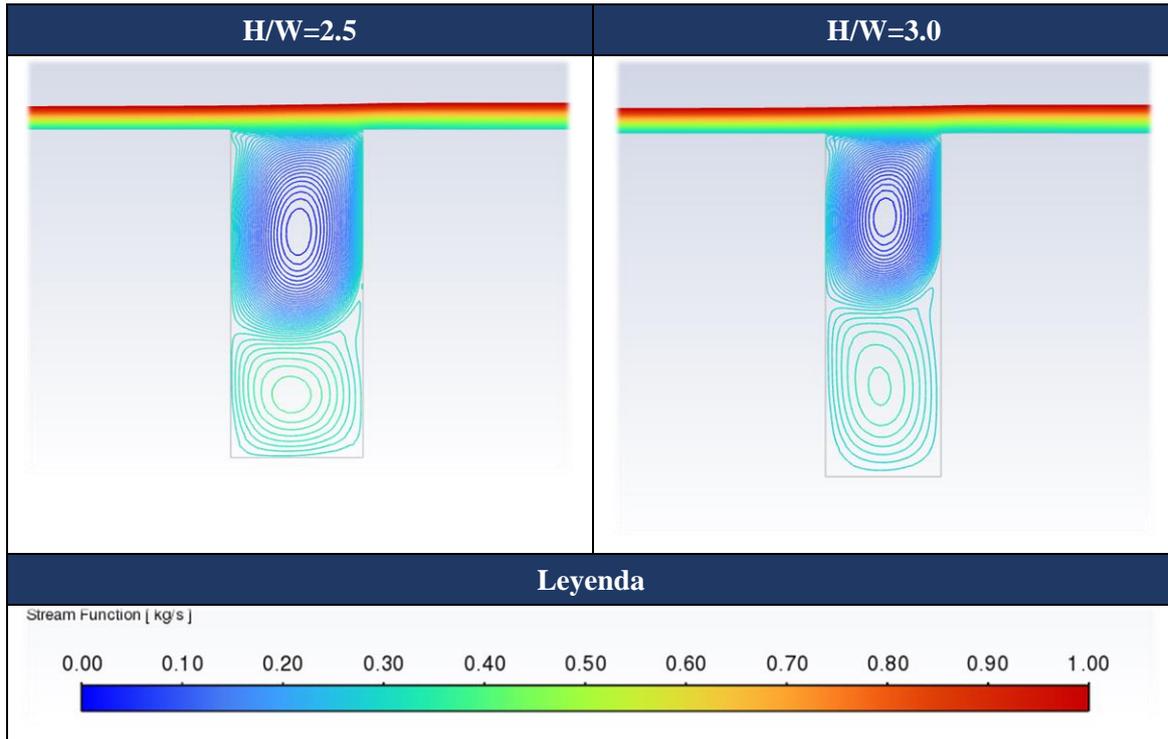


Tabla 3.3. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 3.5 y 4.0. Fuente: Elaboración propia.

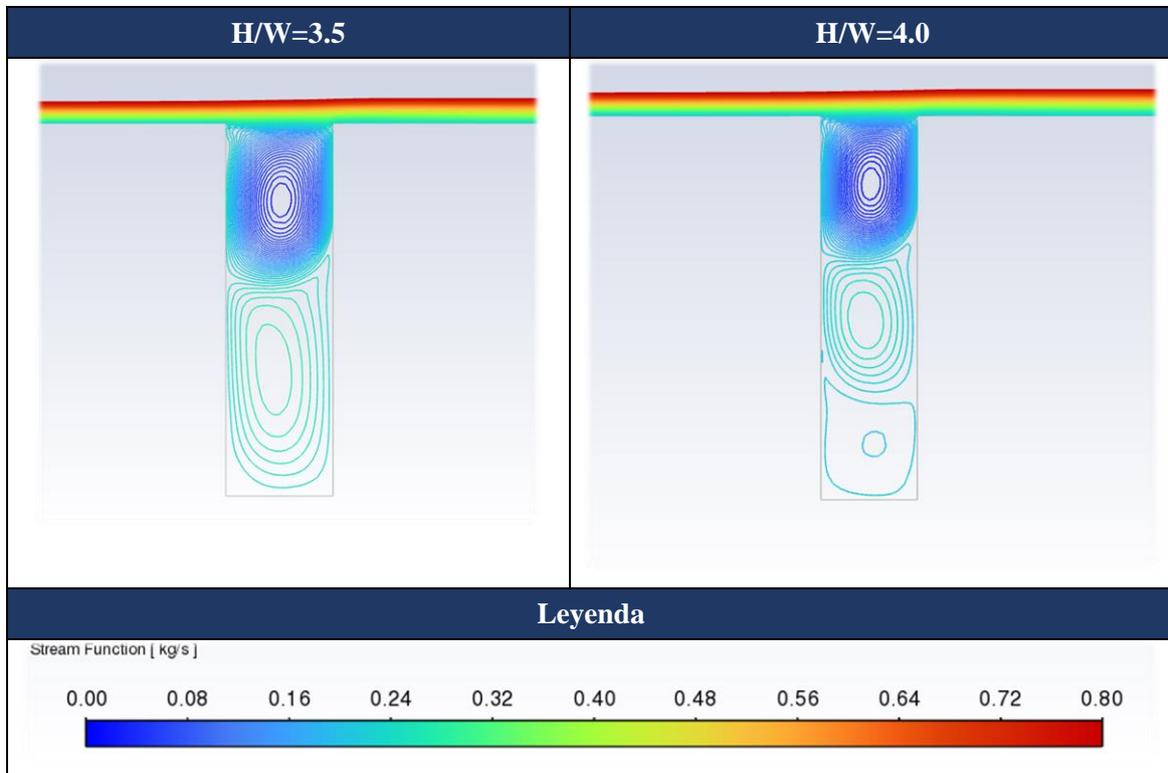
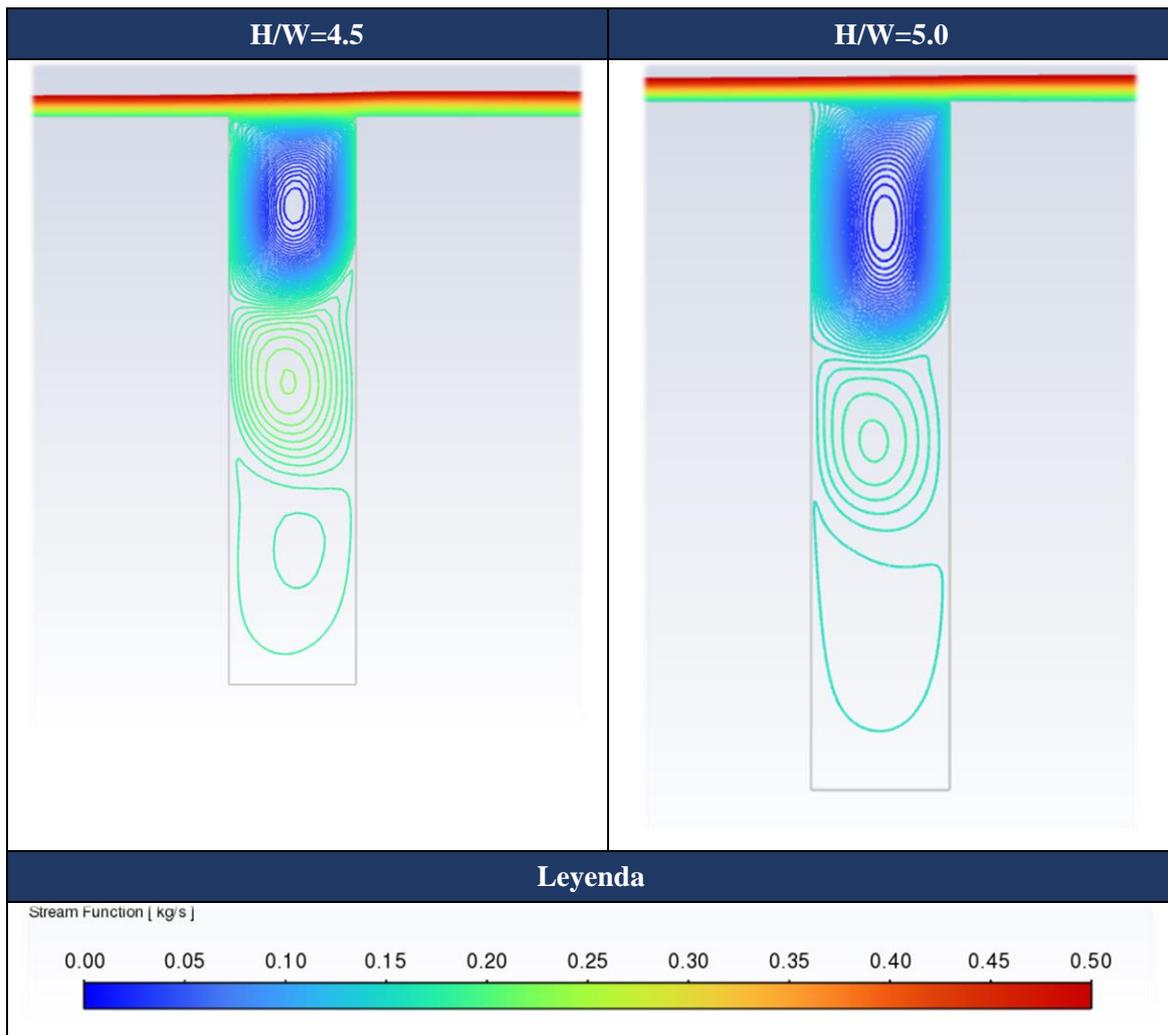


Tabla 3.4. Líneas de corriente para relaciones de aspecto entre 4.5 y 5.0. Fuente: Elaboración propia.

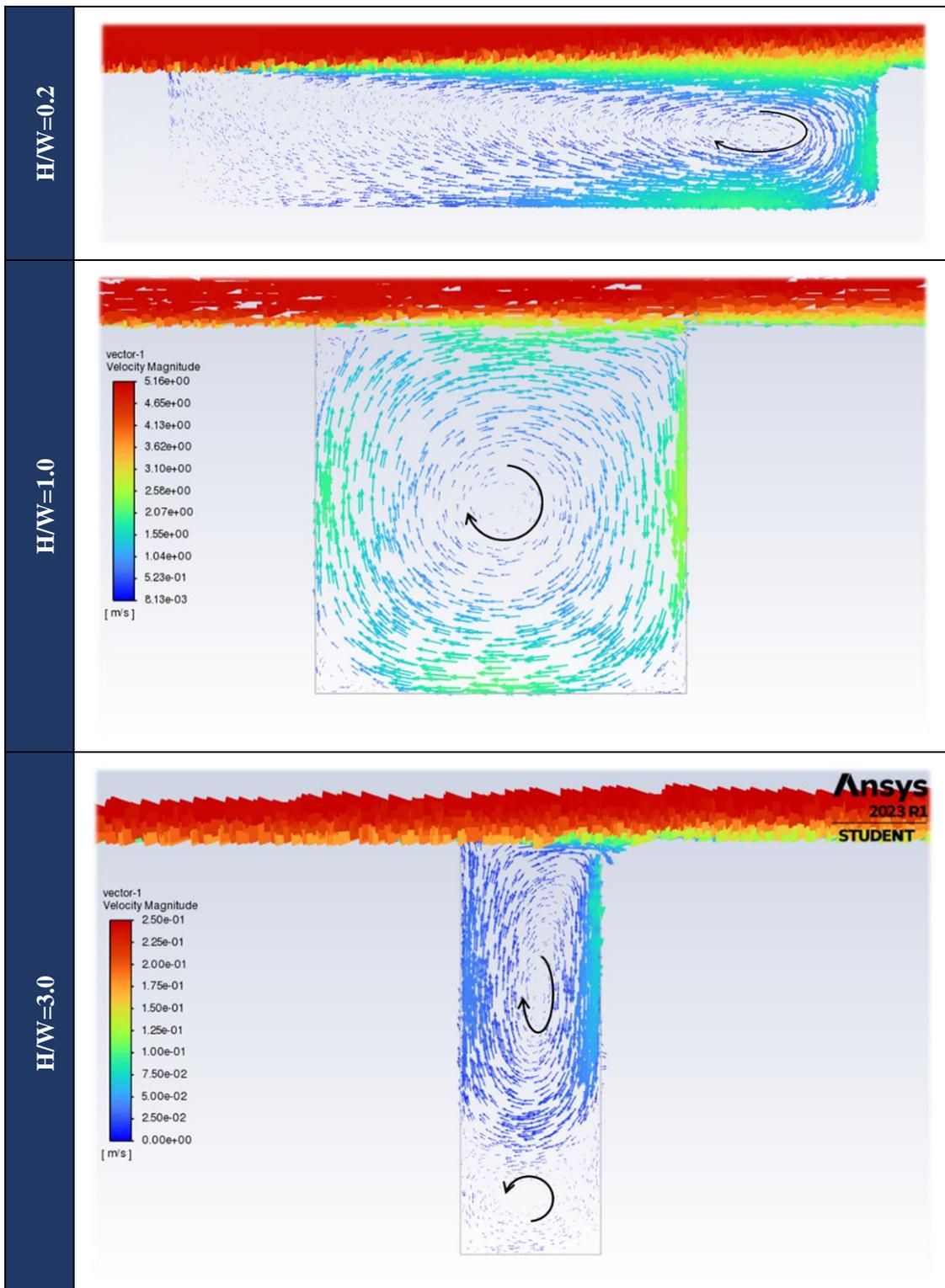


En base al análisis de los resultados gráficos anteriores, es posible concluir lo siguiente:

- Los círculos concéntricos que se pueden observar en las figuras representadas, indican que en todas las geometrías estudiadas se produce una recirculación del flujo de aire que entra al cañón en la zona de la depresión. Dichos círculos concéntricos tienen como centro la vertical trazada desde un punto situado en la mitad del ancho del cañón. En estos puntos, el flujo másico de aire en movimiento es nulo.
- Las geometrías con relaciones de aspecto comprendidas entre 0.6 y 2.0 presentan una distribución del flujo simétrica. Esta característica de simetría también se puede apreciar en los vórtices superiores de las geometrías con relaciones de aspecto a partir de 2.5.
- Las líneas de corriente en las inmediaciones de las paredes verticales del cañón, que trasladadas a la realidad serían las paredes de los edificios, están más próximas que en el resto de la geometría. Esto indica que en estas zonas el flujo es más denso.
- En los casos que presentan varios vórtices, la zona inferior de la depresión no se ve afectada por la recirculación del aire, como indica la no presencia de líneas de corriente en esa región, por lo que en estas zonas el fluido se mueve sin mostrar perturbaciones.

Por último, se han representado los vectores de velocidad para tres de los casos analizados, los cuales se muestran en la tabla inferior. Como se puede apreciar, en los casos para los que se forma un único vórtice, este gira en sentido horario, debido a que la entrada del aire exterior se produce por la región a barlovento de la depresión; sin embargo, cuando se forman dos vórtices, la recirculación inferior de aire gira en sentido antihorario, debido a que parte de ese caudal proviene de la recirculación superior.

Tabla 3.5. Número de vórtices y posición del centro para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.



3.1.2 POSICIÓN Y NÚMERO DE VÓRTICES

Para completar la información ofrecida por los gráficos de las líneas de corriente de velocidad recogidos en el punto anterior, se han extraído manualmente las coordenadas del centro de los vórtices originados en cada una de los casos analizados (de acuerdo al origen de coordenadas establecido en la Figura 2.5), siendo los resultados los recogidos en la Tabla 3.6. Cabe mencionar el carácter aproximado de las coordenadas obtenidas al haberse creado el punto de forma manual.

Tabla 3.6. Número de vórtices y posición del centro para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.

H/W [-]	Nº vórtices	Coordenadas centro	
		x [m]	y [m]
0.2	1	37.860	-4.330
0.4	1	15.931	-4.571
0.6	1	8.133	-4.461
0.8	1	5.821	-4.328
1.0	1	4.661	-4.378
1.5	1	3.131	-4.641
2.0	1	2.378	-4.884
2.5	2	1.849	-2.800
		1.658	-7.256
3.0	2	1.543	-2.185
		1.404	-6.593
3.5	2	1.326	-1.846
		1.122	-5.888
4.0	3	1.161	-1.588
		1.040	-4.761
		1.164	-7.704
4.5	3	1.034	-1.402
		0.939	-4.200
		1.100	-6.841
5.0	3	0.948	-1.589
		0.809	-4.425
		0.878	-6.635

De la observación de los datos recogidos en la tabla anterior, se puede concluir que el número de vórtices aumenta a medida que lo hace la relación de aspecto del cañón, lo cual confirma lo establecido en la bibliografía consultada. De esta forma, para el caso de $H/W=0.2$ se tiene un solo vórtice mientras que, en último caso analizado, correspondiente a $H/W=5.0$ se producen un total de tres vórtices. En cuanto a las coordenadas del centro, salvo en los dos primeros casos analizados (con relaciones de aspecto 0.2 y 0.4) en los que el centro de su único vórtice está en la mitad derecha de la depresión, en el resto de los casos, la coordenada

horizontal se sitúa en la parte central del ancho del cañón, dando lugar a un vórtice con simetría vertical. Respecto a la coordenada “y”, en los casos que solo presentan un vórtice, el valor de esta coordenada señala que también se trata de un vórtice con simetría horizontal, al estar el centro situado en la mitad de la altura de la depresión. En los casos en los que se han generado dos o tres vórtices, también se observan respectivamente dos o tres zonas diferenciadas, en las que la altura está distribuida más o menos equitativamente entre los vórtices.

3.2 ESTUDIO DE VELOCIDADES

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras simular los casos con relaciones de aspecto 0.2, 1.0 y 3.0 con diferentes valores de la velocidad del aire a la entrada de la depresión, según la metodología descrita en el *Apartado 2.4. Influencia de la velocidad* del capítulo anterior. El análisis de los datos extraídos de este estudio de velocidades se ha abordado desde dos puntos de vista: el caudal y el número de vórtices, los cuales se encuentran reflejados en los puntos sucesivos.

3.2.1 CAUDAL Y ACH

En primer lugar, se han calculado los valores de caudal y ACH para cada velocidad, dando como resultado la representación gráfica de la Figura 3.2. En la figura inferior, se han representado dos variables para cada velocidad en los tres casos de relación de aspecto analizados: el caudal, en el eje vertical primario, con líneas continuas; y el número de renovaciones por hora o ACH, con valores en el eje vertical secundario y líneas discontinuas.

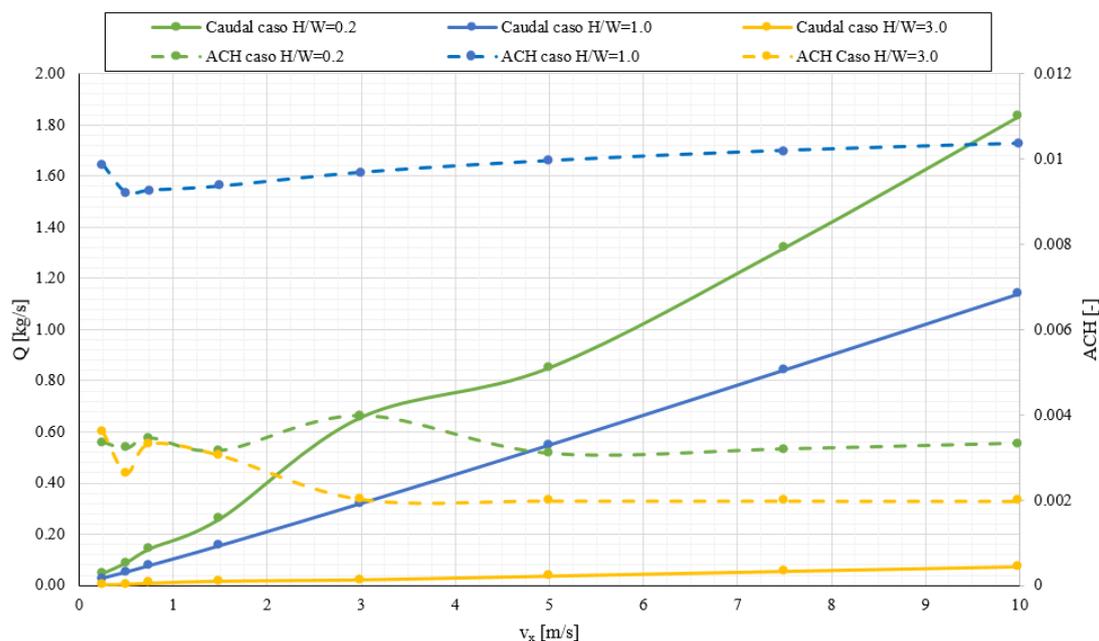


Figura 3.2. Evolución del caudal y ACH para tres casos de relación de aspecto en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el caudal en los tres casos de relación de aspecto analizados presenta una tendencia aproximadamente lineal. En primer lugar, el caudal aumenta a medida que lo hace la velocidad del aire de entrada, lo cual es justificable puesto que, a mayor flujo de aire incidente, mayor será el caudal de aire que entra a la zona de la depresión. Por otro lado, el caudal de aire es menor conforme aumenta la relación de aspecto, ya que la entrada de aire por la zona superior de la depresión se verá dificultada en cañones de menor anchura, al no disponer de una zona amplia por la que se pueda producir dicha entrada de aire.

En lo referente al número de renovaciones por hora, según la figura anterior se deduce que el este parámetro no se ve afectado por la velocidad del aire de entrada, ya que este se mantiene aproximadamente constante para cada relación de aspecto, siendo este último el parámetro que más influencia tiene en el valor del ACH. Comparando las líneas discontinuas, se puede observar que el mayor valor de ACH se produce para la relación de aspecto unitaria, siendo su valor cinco veces mayor que el obtenido para el caso con $H/W=3$. Estos resultados aseguran una mejor ventilación en los cañones urbanos de tipo unitario o normal, ya que su geometría facilita la renovación y circulación del aire y, por tanto, de los contaminantes almacenados en la depresión.

En la Tabla 3.7 se encuentran recogidos los valores numéricos de caudal y ACH para cada velocidad del aire de entrada a partir de los cuales se ha realizado la representación gráfica anterior.

Tabla 3.7. Caudal y ACH para tres casos de relación de aspecto en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.

H/W [-]	V_x [m/s]	$Q_{real,tot}$ [kg/s]	ACH_{real}
0.2	0.25	0.04621	0.00335
	0.5	0.08837	0.00321
	0.75	0.14276	0.00345
	1.5	0.26085	0.00315
	3	0.65758	0.00398
	5	0.85094	0.00309
	7.5	1.31996	0.00319
	10	1.83528	0.00333
1.0	0.25	0.02718	0.00986
	0.5	0.05073	0.00920
	0.75	0.07660	0.00926
	1.5	0.15482	0.00936
	3	0.32024	0.00968
	5	0.54883	0.00996
	7.5	0.84297	0.01019
	10	1.14232	0.01036
3.0	0.25	0.00331	0.00360
	0.5	0.00486	0.00265
	0.75	0.00915	0.00332
	1.5	0.01681	0.00305
	3	0.02228	0.00202
	5	0.03652	0.00199
	7.5	0.05470	0.00198
	10	0.07277	0.00198

3.2.2 POSICIÓN Y NÚMERO DE VÓRTICES. CONTORNOS DE VELOCIDAD

El siguiente aspecto que se ha obtenido del estudio de velocidad realizado, es el número de vórtices y posición de los mismos que se producen para cada una de las velocidades consideradas. Al disponer de los datos de posición y número de vórtices en el caso base con una velocidad constante del aire de entrada de 1 m/s, el objetivo de este análisis es comprobar la influencia de la velocidad en la formación de vórtices, así como su valoración en conjunto con la relación de aspecto.

En la tabla inferior, se han tabulado el número de vórtices y las coordenadas del centro obtenidas para cada velocidad del aire de entrada y relación de aspecto de la depresión. Se puede observar que en la depresión correspondiente a los casos para relaciones de aspecto 0.2, 1.0 y 3.0 se forman un vórtice, un vórtice y dos vórtices respectivamente. Por lo tanto, se puede concluir que, en los dos primeros casos con relaciones de aspecto bajas, la velocidad del aire de entrada no causa un impacto significativo en el número o posición de los vórtices, puesto que se sigue formando un solo vórtice en la depresión al igual que en el caso analizado inicialmente con velocidad 1 m/s. Respecto a las coordenadas del centro de dicho vórtice, tampoco presentan variación apreciable, siendo similares a las obtenidas en el caso base. Sin embargo, para la relación de aspecto 3.0, se observa que para velocidades a partir de 3 m/s, el número de vórtices se reduce de dos a uno, situándose el centro del vórtice en el centro de la depresión de forma aproximada.

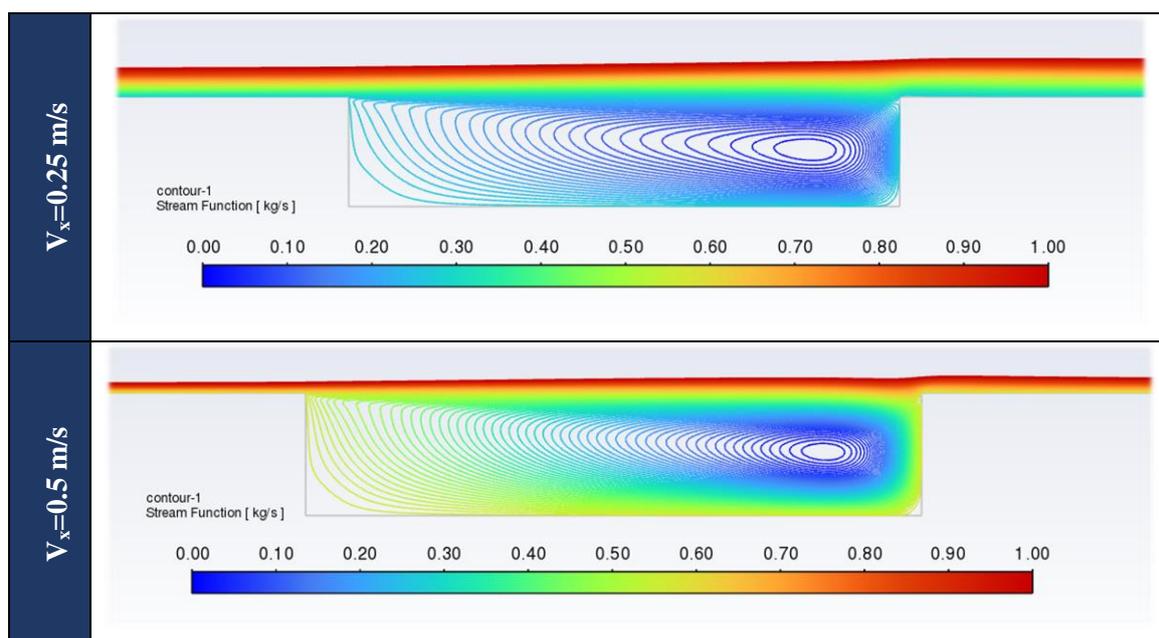
Tabla 3.8. Número de vórtices y posición del centro para tres casos de relación de aspecto en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.

H/W [-]	V _x [m/s]	Nº vórtices	Coordenadas centro	
			x [m]	y [m]
0.2	0.25	1	37.494	-4.284
	0.5	1	37.877	-4.287
	0.75	1	37.887	-4.285
	1.5	1	38.109	-4.268
	3	1	37.960	-4.284
	5	1	38.130	-4.222
	7.5	1	38.187	-4.283
	10	1	38.154	-4.268
1.0	0.25	1	4.665	-4.410
	0.5	1	4.637	-4.412
	0.75	1	4.652	-4.416
	1.5	1	4.623	-4.402
	3	1	4.607	-4.438
	5	1	4.607	-4.449
	7.5	1	4.603	-4.454
	10	1	4.600	-4.440

H/W [-]	V_x [m/s]	Nº vórtices	Coordenadas centro	
			x [m]	y [m]
3.0	0.25	2	1.684	-3.404
			1.378	-7.848
	0.5	2	1.534	-2.785
			1.304	-7.793
	0.75	2	1.563	-2.848
			1.355	-7.071
	1.5	2	1.571	-2.957
			1.395	-7.152
	3	1	1.802	-3.765
5	1	1.806	-3.783	
7.5	1	1.802	-3.855	
10	1	1.794	-3.889	

Finalmente, en la Tabla 3.9, Tabla 3.10 y Tabla 3.11 se han agrupado los contour de líneas de corriente para los casos de relación de aspecto 0.2, 1.0 y 3.0 con cada una de las velocidades objeto de estudio del presente apartado. En las figuras inferiores se puede observar el número y posición de los vórtices formados, siendo esta la justificación de los resultados recogidos en este apartado. Se ha decidido representar cada figura con una escala de color personalizada del caudal de aire en kg/s, recogida en la parte inferior de cada una de ellas, con el objetivo de permitir una mejor visualización de los resultados.

Tabla 3.9. Líneas de corriente para relación de aspecto 0.2 en función de la velocidad del aire de entrada. Fuente: Elaboración propia.



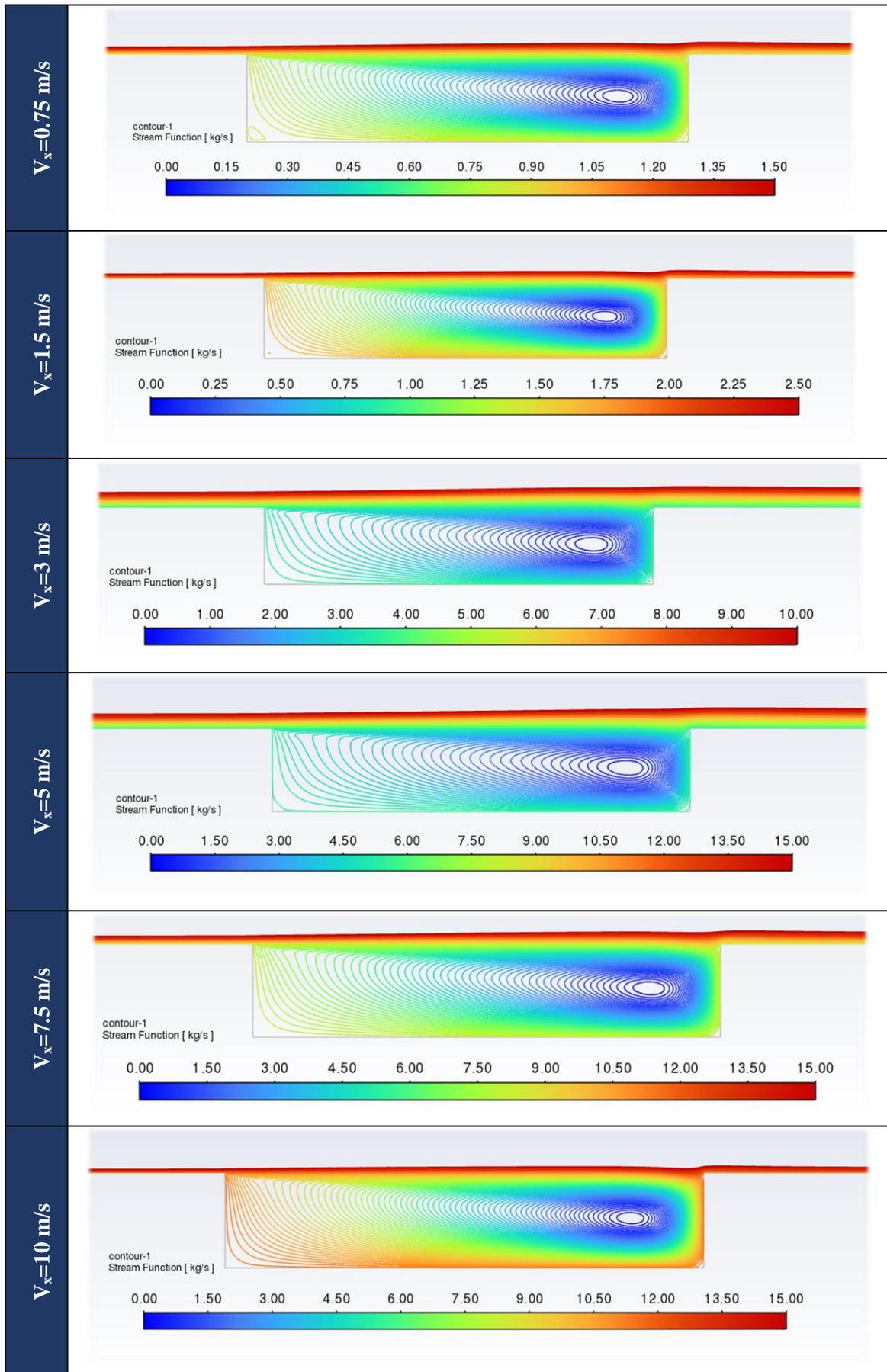
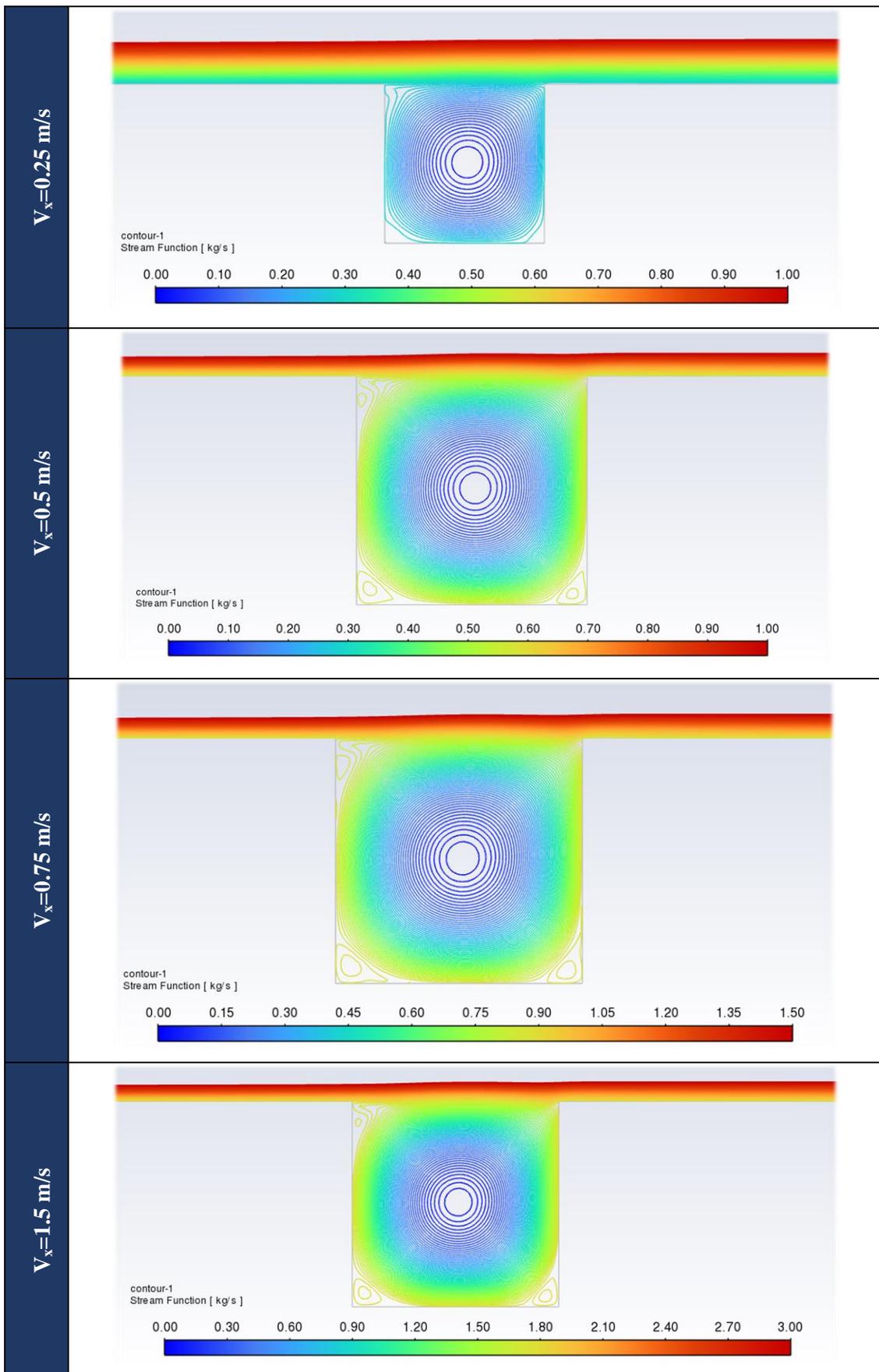


Tabla 3.10. Líneas de corriente para relación de aspecto 1.0 en función de la velocidad del aire de entrada.
Fuente: Elaboración propia.



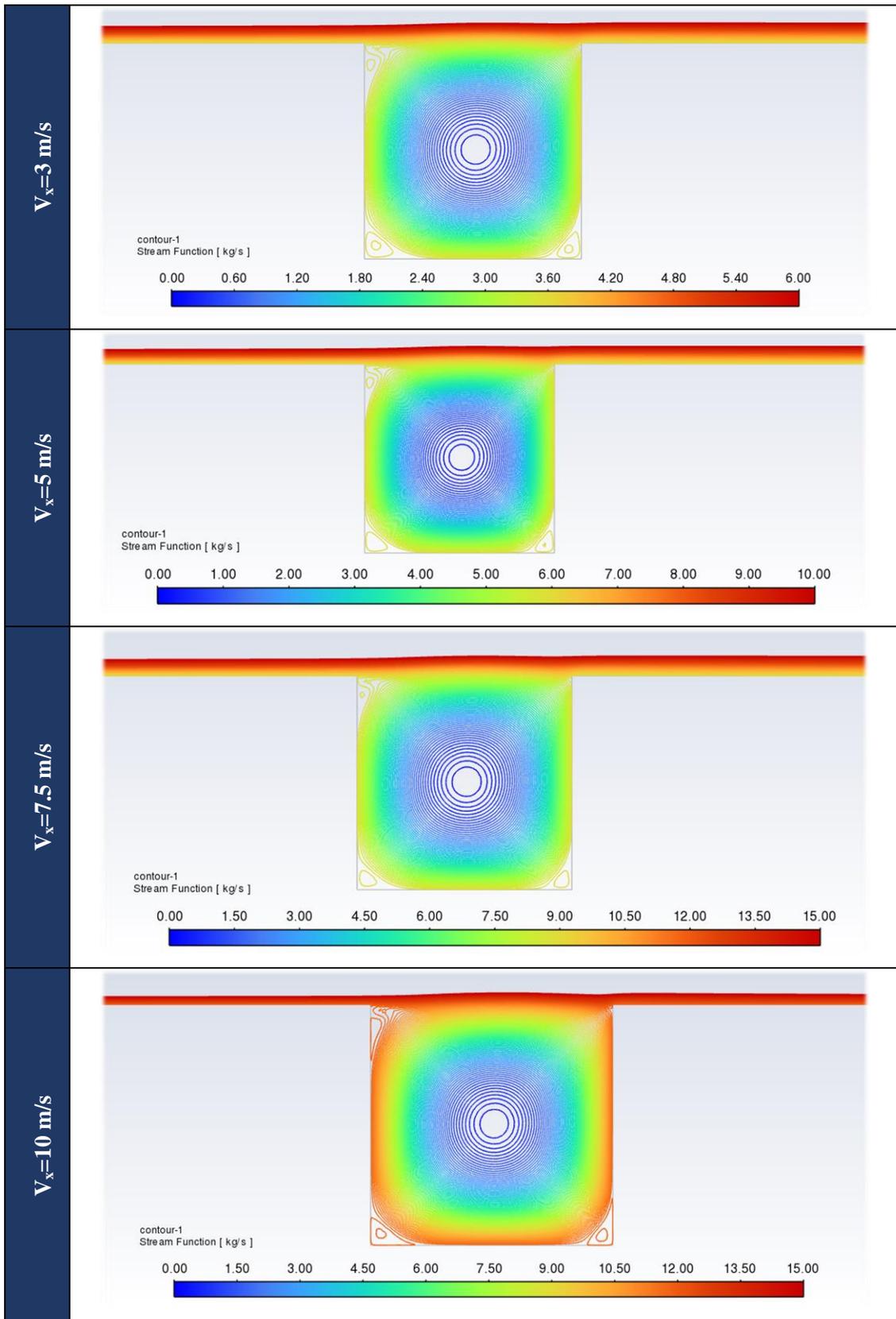
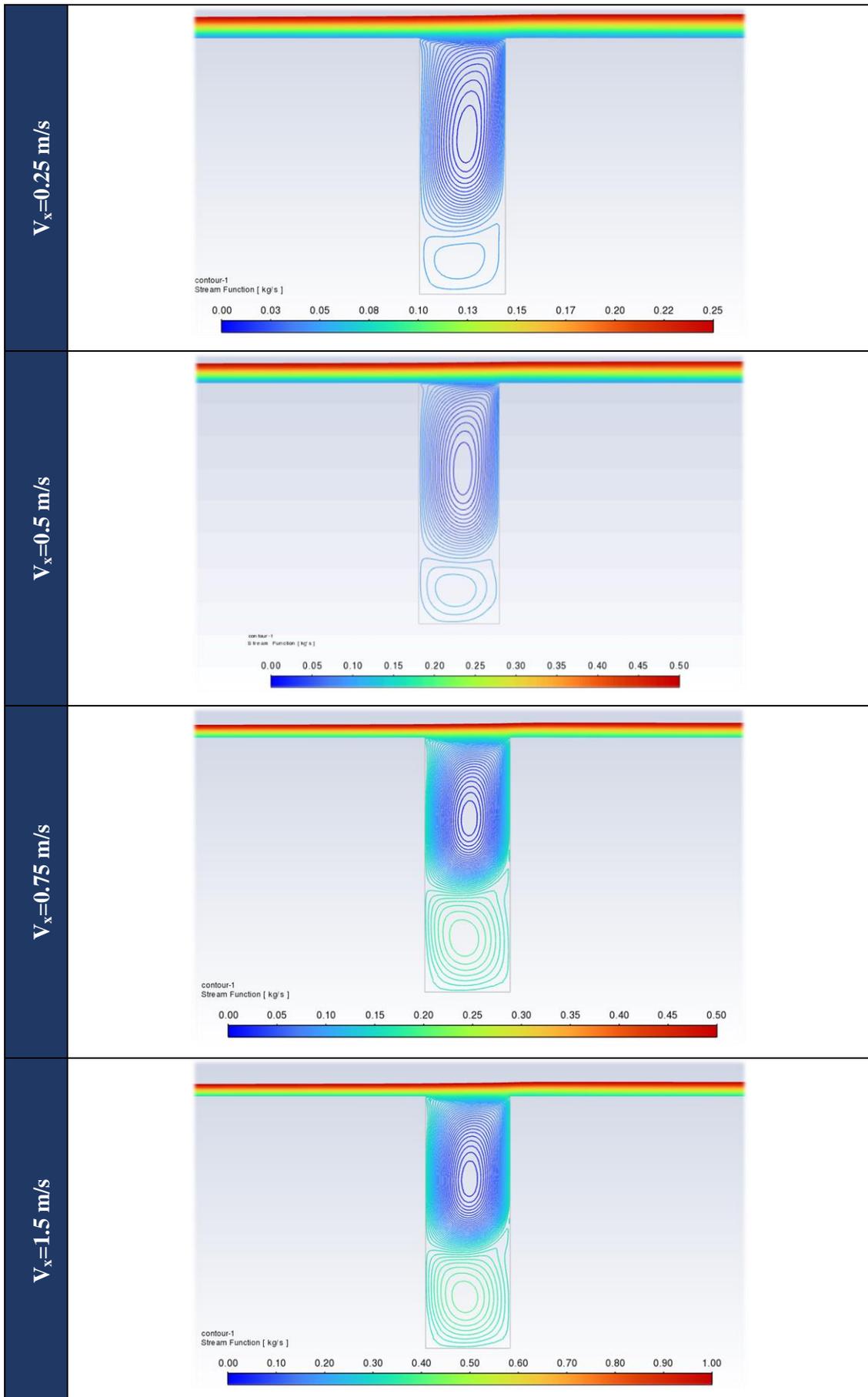
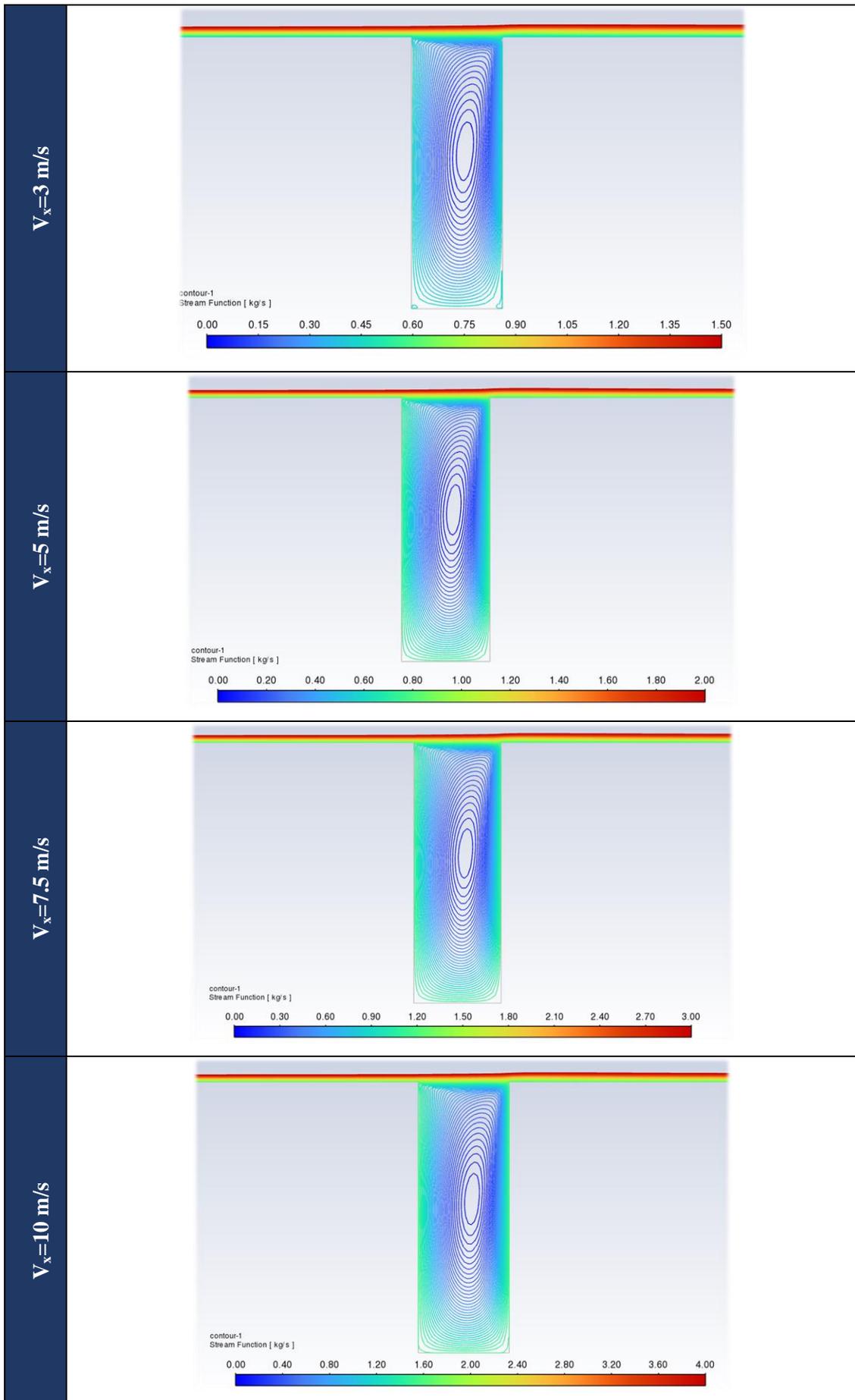


Tabla 3.11. Líneas de corriente para relación de aspecto 3.0 en función de la velocidad del aire de entrada.
 Fuente: Elaboración propia.





Del análisis de las líneas de corriente del estudio de velocidades mostradas en las tablas anteriores, se puede concluir lo siguiente:

- La distribución espacial del flujo de aire se mantiene con respecto a la obtenida en el apartado anterior para el caso base con velocidad de 1 m/s, siendo bastante similar al variar la velocidad y dependiendo principalmente de la relación de aspecto del cañón.
- En el caso correspondiente a $H/W=0.2$, las líneas de corriente se encuentran mucho más próximas en la zona lateral derecha, es decir, la región a barlovento o de cara a la dirección desde la que incide el viento; mientras que, en la región a sotavento, el caudal de aire es menor.
- En la depresión con relación de aspecto 1.0, las líneas de corriente presentan características similares en las paredes a sotavento y barlovento (ver Figura 3.3). No obstante, las esquinas inferiores izquierda y derecha, que corresponderían a las zonas de tránsito de los peatones en la calle, no se ven afectadas por el vórtice central. Esto provocará una menor renovación del aire de estas zonas que en el resto, al quedar el aire atrapado en pequeños remolinos más localizados.
- Como se ha comentado anteriormente, el efecto más notorio del aumento de la velocidad para relaciones de aspecto altas es la disminución del número de vórtices formados. El gran vórtice que se forma en la parte central del cañón para velocidades a partir de 3 m/s, supone que toda la depresión se vea afectada por la recirculación del mismo flujo de aire, desde la zona superior a la zona inferior.

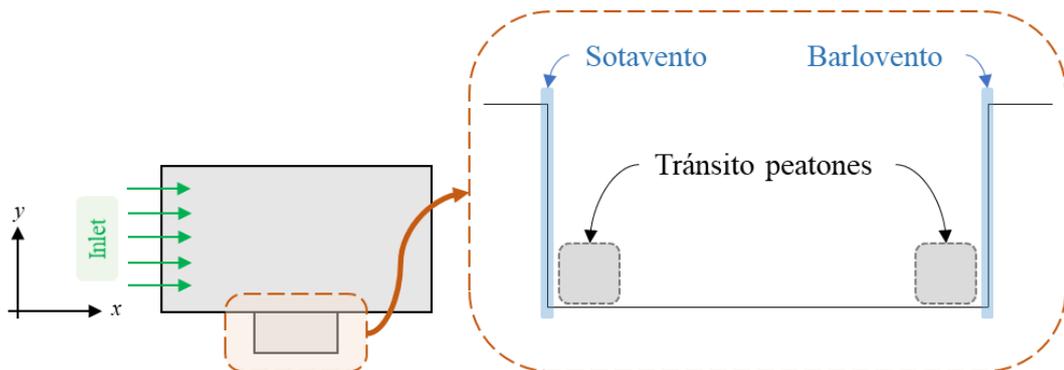


Figura 3.3. Identificación de paredes de edificios a barlovento y sotavento en un cañón urbano. Fuente: Elaboración propia a partir de [26].

En síntesis, la velocidad del aire de entrada influye significativamente en el número de vórtices formados para relaciones de aspecto altas a partir de un cierto valor de la velocidad, mientras que, para relaciones de aspecto bajas, solo influye en el caudal de aire que entra a la depresión. En apartados posteriores se explorará la influencia de la velocidad del aire de entrada en combinación con la generación de calor en el subvolumen de la depresión y cómo afecta a la concentración de contaminantes en las zonas de tránsito de peatones.

3.3 CASO CON GENERACIÓN DE CALOR

En este apartado se presentan los contornos de temperatura obtenidos como resultado de la simulación realizada, además de los valores de las variables de interés tales como caudales y número de renovaciones por hora del volumen de aire contenido en la depresión.

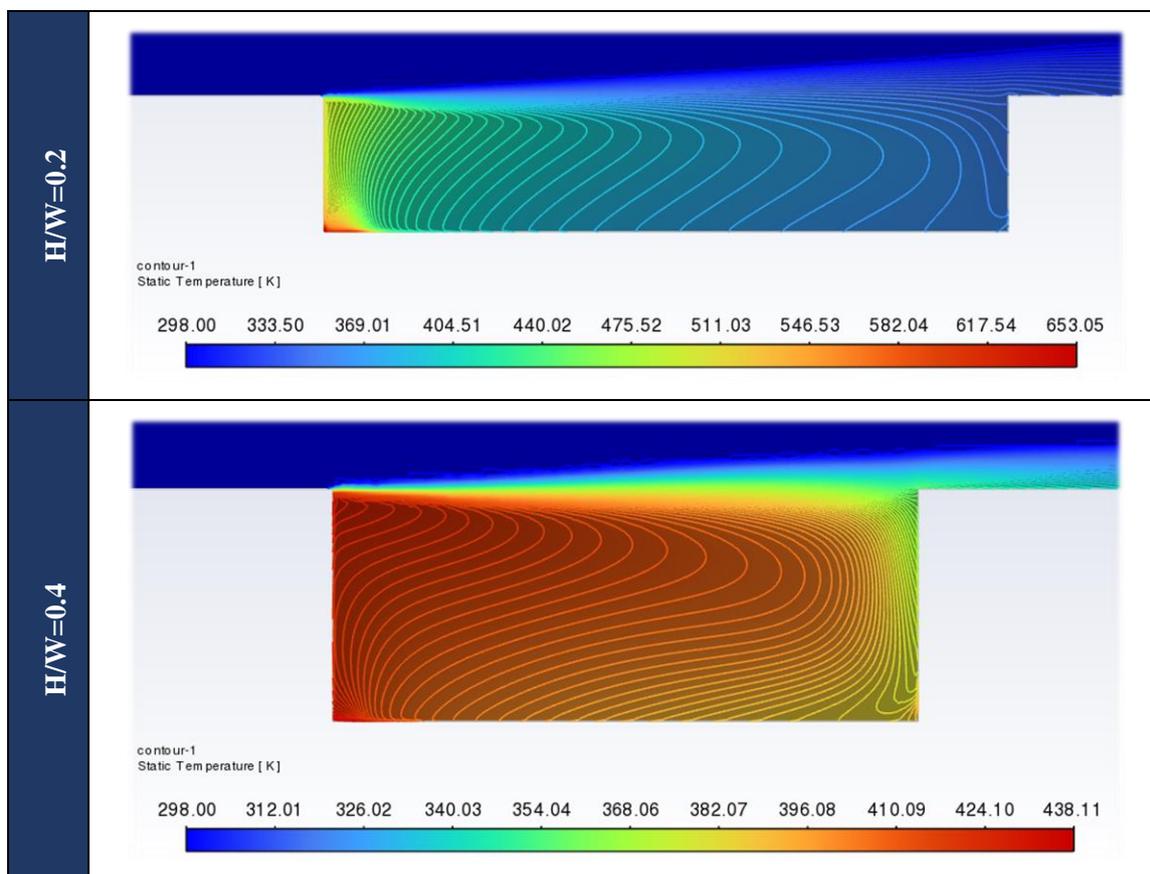
3.3.1 CONTORNOS DE TEMPERATURA

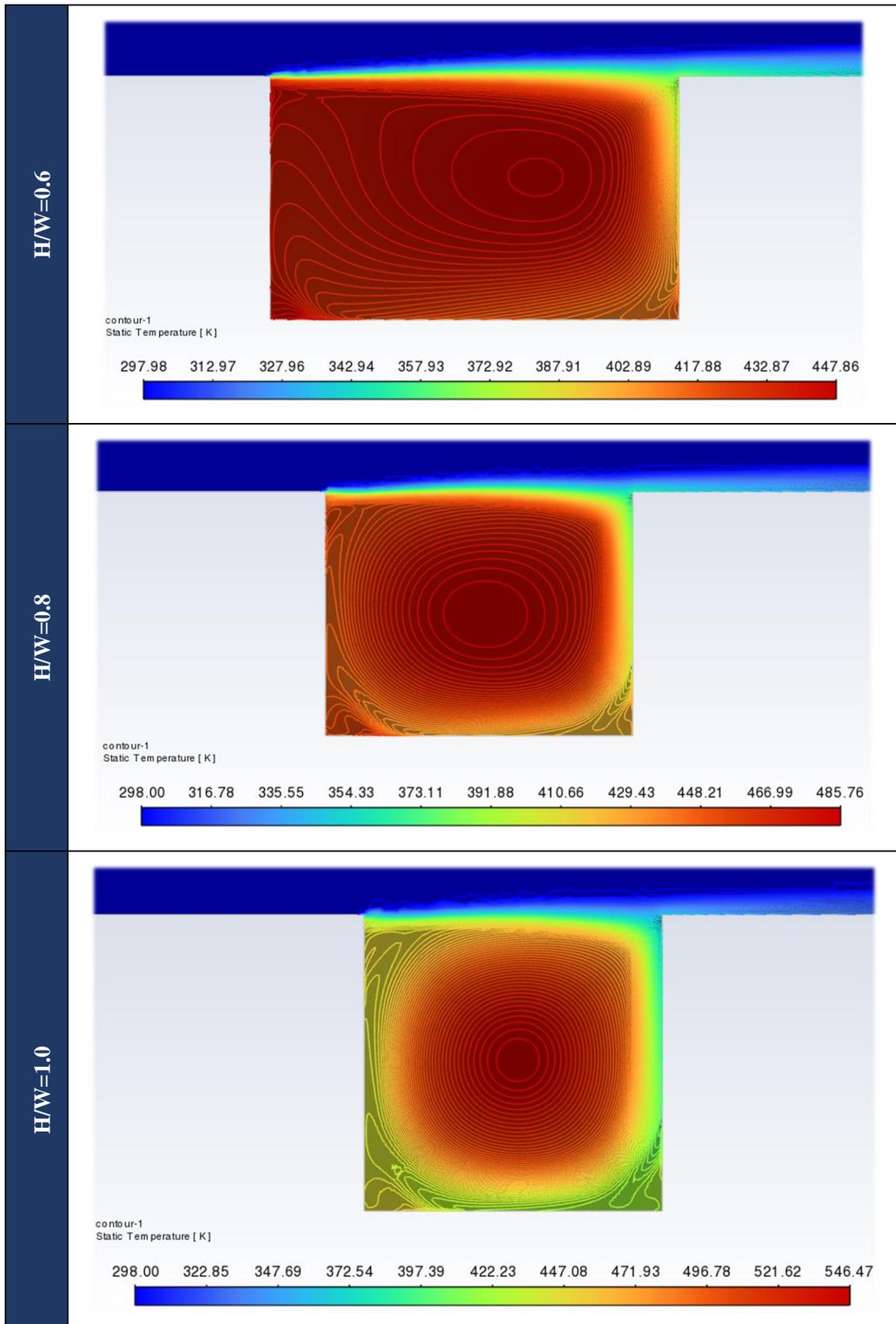
En primer lugar, se presentan los contornos de temperatura en la depresión, con objeto de visualizar la distribución de temperaturas en la zona del cañón urbano y su relación con la geometría de este.

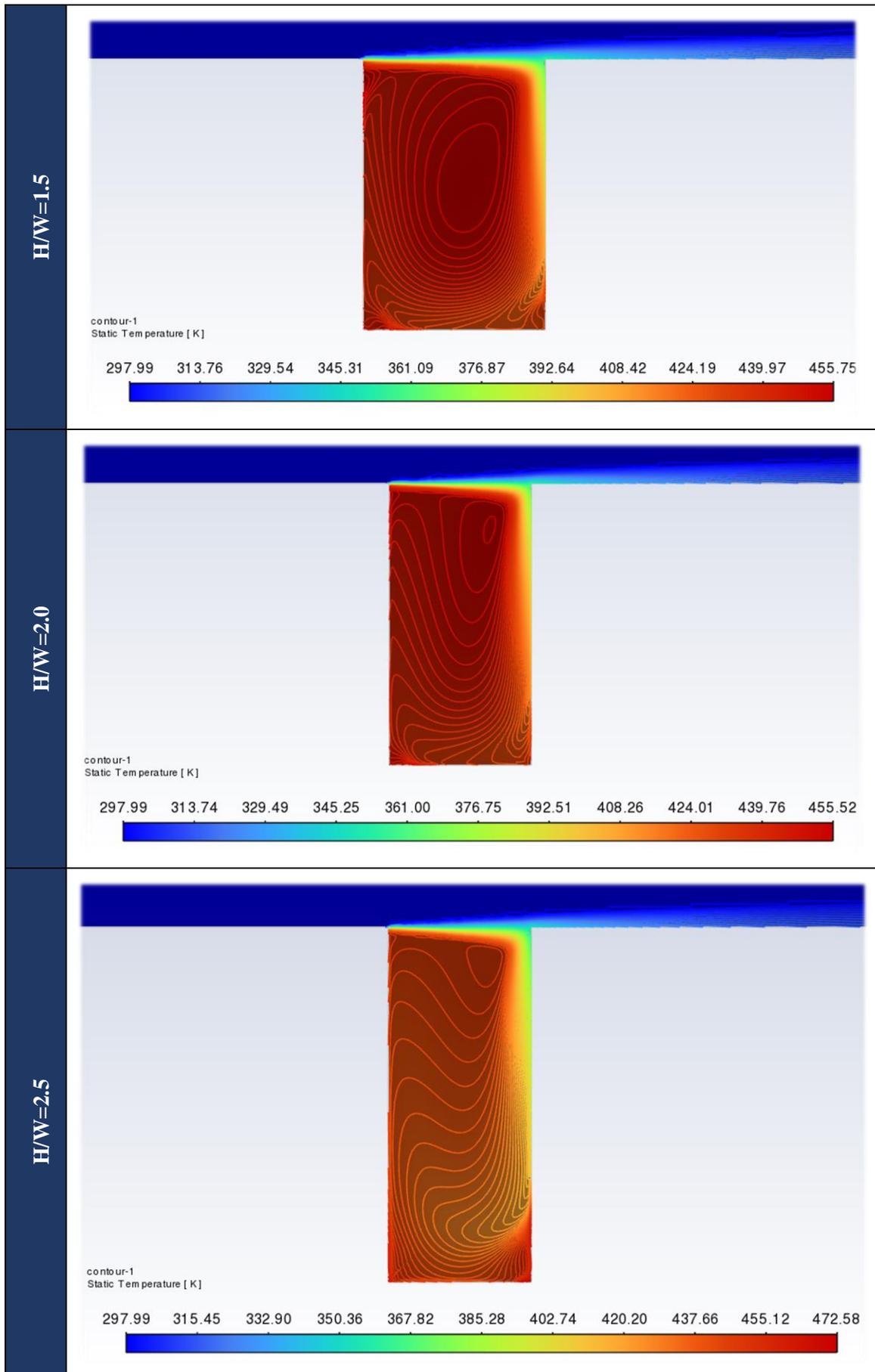
La visualización de la influencia de la temperatura en el volumen de aire de la depresión se realizará mediante la representación gráfica de los contornos de temperatura estática. El trazado de contornos es una de las múltiples opciones de las que dispone el postprocesador de *Ansys Fluent* para la representación gráfica de los resultados obtenidos tras la simulación y representa, en definitiva, las curvas de nivel o líneas de magnitud constante para una variable seleccionada. En este caso, la variable que se va a representar es la temperatura estática o de estancamiento, es decir, aquella que sólo depende de la energía interna del aire. La temperatura de estancamiento también se define como aquella a la que se encuentra el fluido tangente a la superficie donde se produce el encuentro o choque entre el fluido y el objeto, que en este caso serían las paredes de la depresión, siendo la velocidad de ese punto nula.

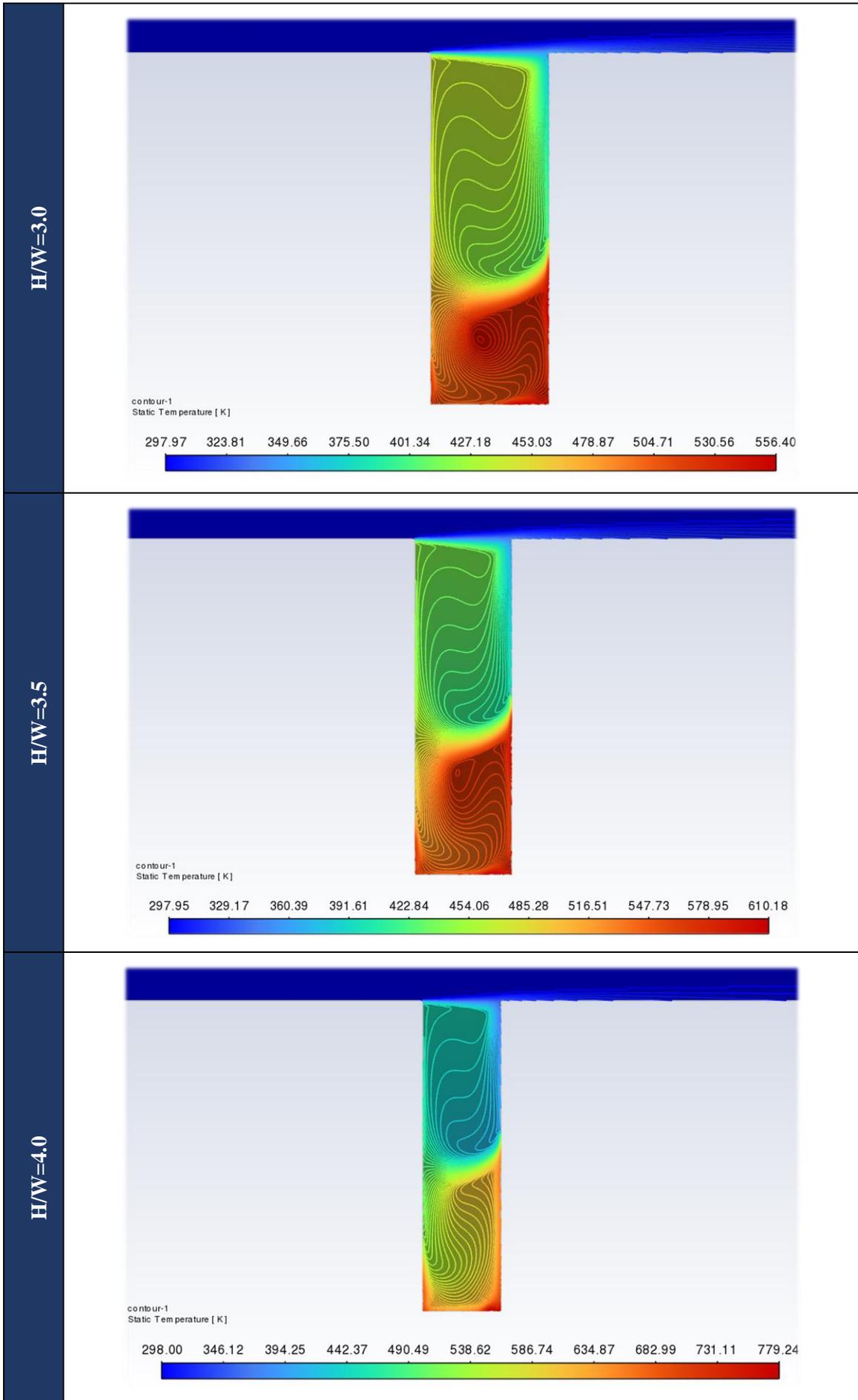
En la siguiente tabla se pueden observar las gráficas generadas al representar la temperatura estática para las diferentes relaciones de aspecto estudiadas. En la parte inferior de cada una de las figuras se recoge la escala de color que permite identificar los valores máximo y mínimo de la temperatura alcanzada en la depresión, así como las zonas en las que se alcanza la mayor temperatura.

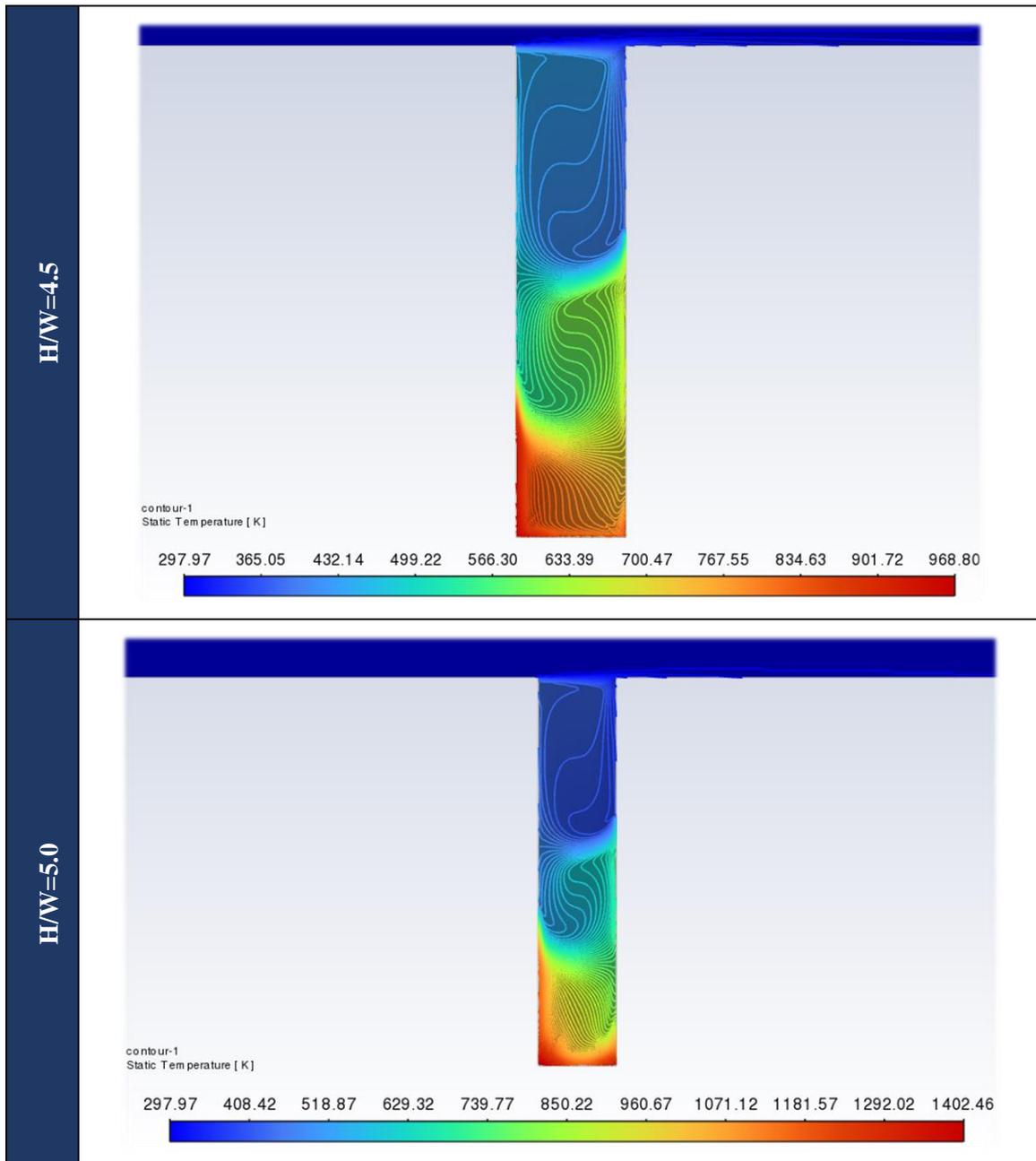
Tabla 3.12. Contornos de temperatura para cada relación de aspecto. Fuente: Elaboración propia.











De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- La temperatura del aire en el subvolumen interior se mantiene constante e igual al valor establecido como condición del aire de entrada de 25 °C.
- Una vez que se produce la entrada a la depresión, el punto con menor temperatura dentro de esta se localiza en la esquina superior derecha, perteneciente a la pared a barlovento, siendo este el lugar desde el que se produce la incidencia del viento.
- En el caso $H/W=0.2$, pese a alcanzar una temperatura bastante alta en la esquina inferior izquierda, se trata de un punto localizado, siendo la temperatura en el resto de la depresión bastante homogénea y del mismo orden de magnitud que la presentada en los siguientes casos con relaciones de aspecto próximas. Esto puede deberse a que el aire exterior no llega a esa región al ser el cañón muy ancho, impidiendo así la refrigeración de esta zona y dando como resultado una temperatura tan elevada.

- La temperatura máxima en los cañones con relaciones de aspecto 0.4, 0.6 y 0.8 se produce también en la esquina inferior izquierda. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, el resto de puntos de la depresión presentan una menor variación en su temperatura.
- Para la relación de aspecto unitaria, la mayor temperatura se da en el centro del cañón, siendo este un aspecto bastante diferenciador del resto de geometrías, ya que como se aprecia, esta temperatura suele presentarse en una de las esquinas inferiores. Este hecho provoca que la temperatura en esas zonas inferiores, correspondientes a las zonas de circulación de los peatones, sean menores, lo que conduciría a un mayor confort térmico en las calles con esta relación de aspecto.
- Las geometrías con relación de aspecto a partir de 3.0, presentan un comportamiento similar y ponen de manifiesto los resultados obtenidos en el apartado anterior en lo referente a los vórtices formados. Se puede apreciar la correspondencia entre la distribución de temperaturas en la depresión y la localización de los vórtices, ya que en las figuras anteriores se evidencia claramente cómo las líneas de corriente rodean a los vórtices. Pese a que supone adelantarse a los resultados sobre ACH que se presentarán en el siguiente apartado, es necesario para justificar los puntos en los que se alcanza la mayor temperatura. De esta forma, a medida que el cañón es más profundo, mayor es el número de renovaciones por hora o ACH, lo que provoca que la mayoría del aire que se renueva sea perteneciente al vórtice superior. Sin embargo, el aire de la recirculación inferior no se ve tan afectado por esa renovación de aire, lo que se traduce en el sobrecalentamiento del aire de esa zona, y, por tanto, justifica temperatura tan elevada que se alcanza en la misma.

En la Figura 3.4 se puede apreciar la evolución de las temperaturas mínima, media y máxima en el subvolumen de la depresión para cada una de las relaciones de aspecto objeto del presente proyecto. La temperatura mínima permanece constante puesto que es la establecida en las condiciones del aire a la entrada. Como se puede observar y siguiendo con lo comentado líneas arriba, la temperatura máxima aumenta acorde al aumento de la relación de aspecto, llegando a alcanzar 1129 °C en la geometría con $H/W=5$. Este valor tan elevado de la temperatura se debe al elevado valor de generación volumétrica considerado, el cual ha permitido realizar un análisis cualitativo, pero no siendo fiel a la realidad.

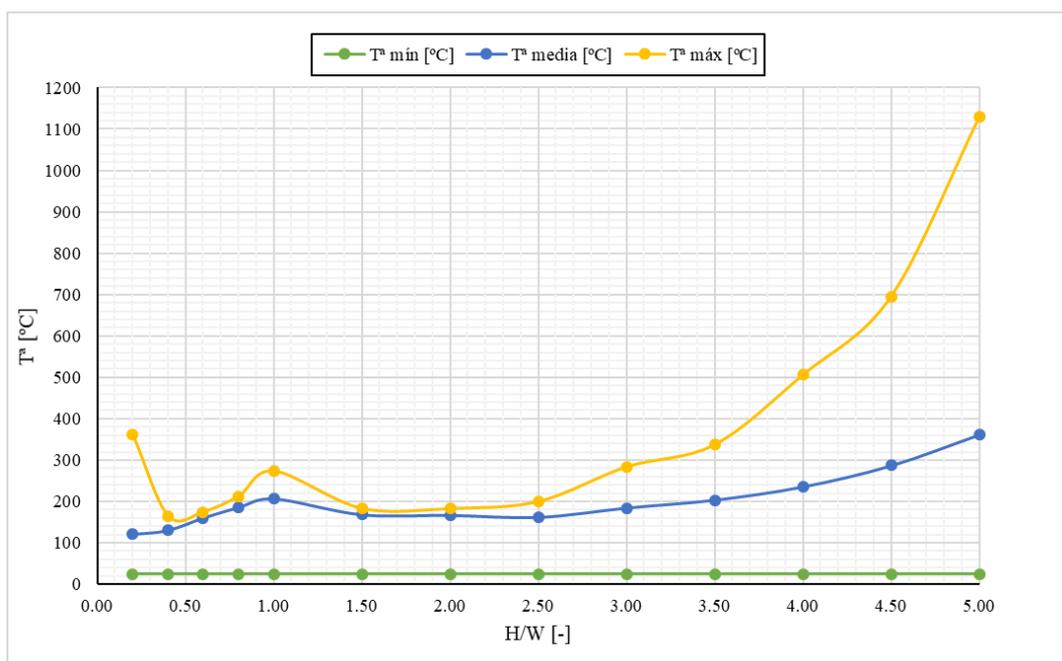


Figura 3.4. Evolución de las temperaturas mínima, media y máxima en el subvolumen de la depresión para el caso con generación de calor. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 CAUDALES Y NÚMERO DE RENOVACIONES POR HORA

En este punto se recogen los resultados obtenidos de la aplicación de las expresiones reflejadas en el capítulo anterior para el cálculo de caudal real, caudal equivalente y número de renovaciones por hora o ACH en el caso con generación de calor. Los resultados numéricos son los recogidos en la tabla inferior.

Tabla 3.13. Caudal real total, ACH real, caudal equivalente y ACH equivalente en el caso con generación de calor. Fuente: Elaboración propia.

H/W [-]	$Q_{\text{real,tot}}$ [kg/s]	ACH_{real}	$Q_{\text{eq,tot}}$ [kg/s]	ACH_{eq}
0.2	0.20091	0.00364	0.08650	0.00157
0.4	0.18822	0.00683	0.07374	0.00268
0.6	0.15438	0.00840	0.06890	0.00375
0.8	0.15343	0.01113	0.07961	0.00578
1.0	0.10259	0.00931	0.06414	0.00582
1.5	0.03153	0.00429	0.01867	0.00254
2.0	0.01783	0.00323	0.01064	0.00193
2.5	0.01473	0.00334	0.00883	0.00200
3.0	0.01183	0.00322	0.00791	0.00215
3.5	0.00996	0.00316	0.00703	0.00223
4.0	0.00867	0.00314	0.00641	0.00233
4.5	0.00741	0.00302	0.00592	0.00242
5.0	0.00676	0.00306	0.00572	0.00259

En la Figura 3.5 se puede apreciar la representación gráfica de los valores numéricos tabulados en la Tabla 3.13, en la que los caudales aparecen con línea continua y respecto al eje vertical primario, y el número de renovaciones por hora o ACH se representa mediante línea discontinua y con los valores según el eje vertical secundario.

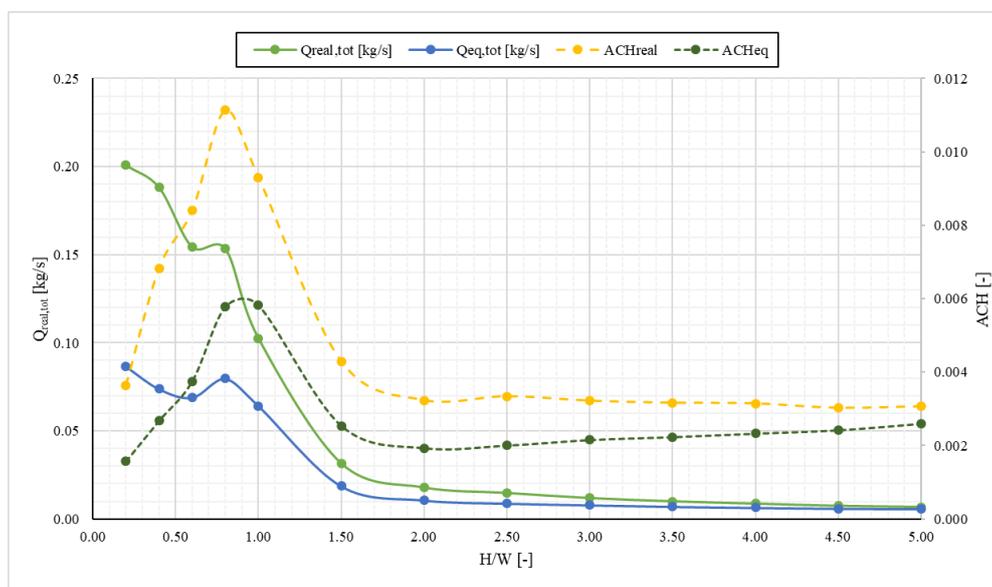


Figura 3.5. Evolución de los caudales real y equivalente y las renovaciones por hora real y equivalente para el caso con generación de calor. Fuente: Elaboración propia.

De los valores reflejados en la gráfica anterior, se puede concluir lo siguiente:

- El parámetro que indica la renovación del aire del cañón (ACH) presenta una tendencia constante para cañones con relaciones de aspecto a partir de 2.0. Además, el valor de este parámetro alcanza su valor máximo para en el caso de la relación de aspecto unitaria, lo que viene a confirmar los resultados obtenidos en la Figura 3.2, donde la línea correspondiente al ACH para esta relación de aspecto también era la más elevada. Este hecho supone una renovación del volumen de aire de la depresión mejor y más frecuentemente para cañones con esta geometría, lo que se traducirá en la eliminación de contaminantes y el desplazamiento de masas de aire a mayor temperatura por otras más frías.
- El caudal de aire que entra a la depresión tiene una tendencia decreciente, partiendo de un valor máximo de 0.2009 kg/s para la primera relación de aspecto y llegando a un valor final de 0.0067 kg/s en la última relación de aspecto analizada. Los valores obtenidos son coherentes, puesto que en al comparar un cañón profundo y otro más ancho, el aire tendrá más difícil su entrada en el primero, justificando así el menor valor del caudal real obtenido para las últimas relaciones de aspecto. Un ejemplo real de la zona objeto de estudio sería una calle del barrio de Santa Cruz en Sevilla, con calles estrechas en las que el caudal de aire que entra por la parte superior es muy pequeño con respecto a otras geometrías urbanas, al estar muy confinadas, siendo aún más difícil que ese aire llegue a la zona inferior de la calle.
- Respecto a las diferencias entre los parámetros real y equivalente, es lógico que el caudal y ACH equivalente sean inferiores al caudal y ACH real, puesto que como ya se comentó en la definición de estos parámetros recogida en el capítulo anterior, los parámetros “equivalentes” son debidos únicamente al caudal de aire exterior que renueva el espacio; mientras que los parámetros “reales” computa también el caudal que se recircula debido a la formación de los vórtices, siendo por tanto siempre mayor.

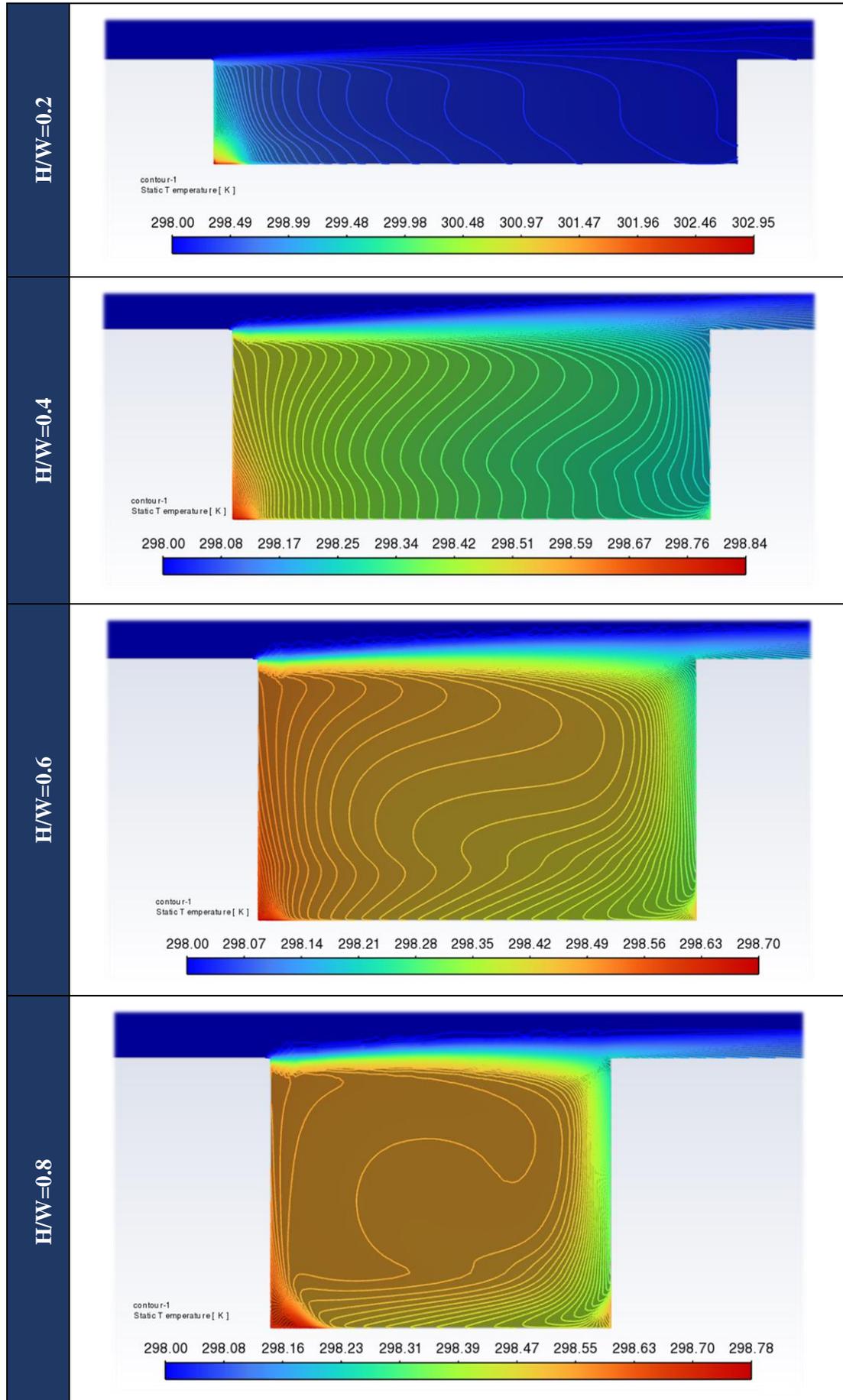
Cabe mencionar que los parámetros representados tienen una tendencia correcta acorde a la bibliografía y datos consultados para la realización de este proyecto. Sin embargo, pese a que los resultados son aceptables cualitativamente, los valores de caudal obtenidos no son numéricamente exactos, al tener un orden de magnitud superior a lo esperado. La limitación del número de celdas máximas marcada por la versión de estudiantes empleada y, por consiguiente, el tamaño de mallado que se ha establecido para las distintas regiones de la geometría pueden estar detrás de este problema, al ser el mallado demasiado grande.

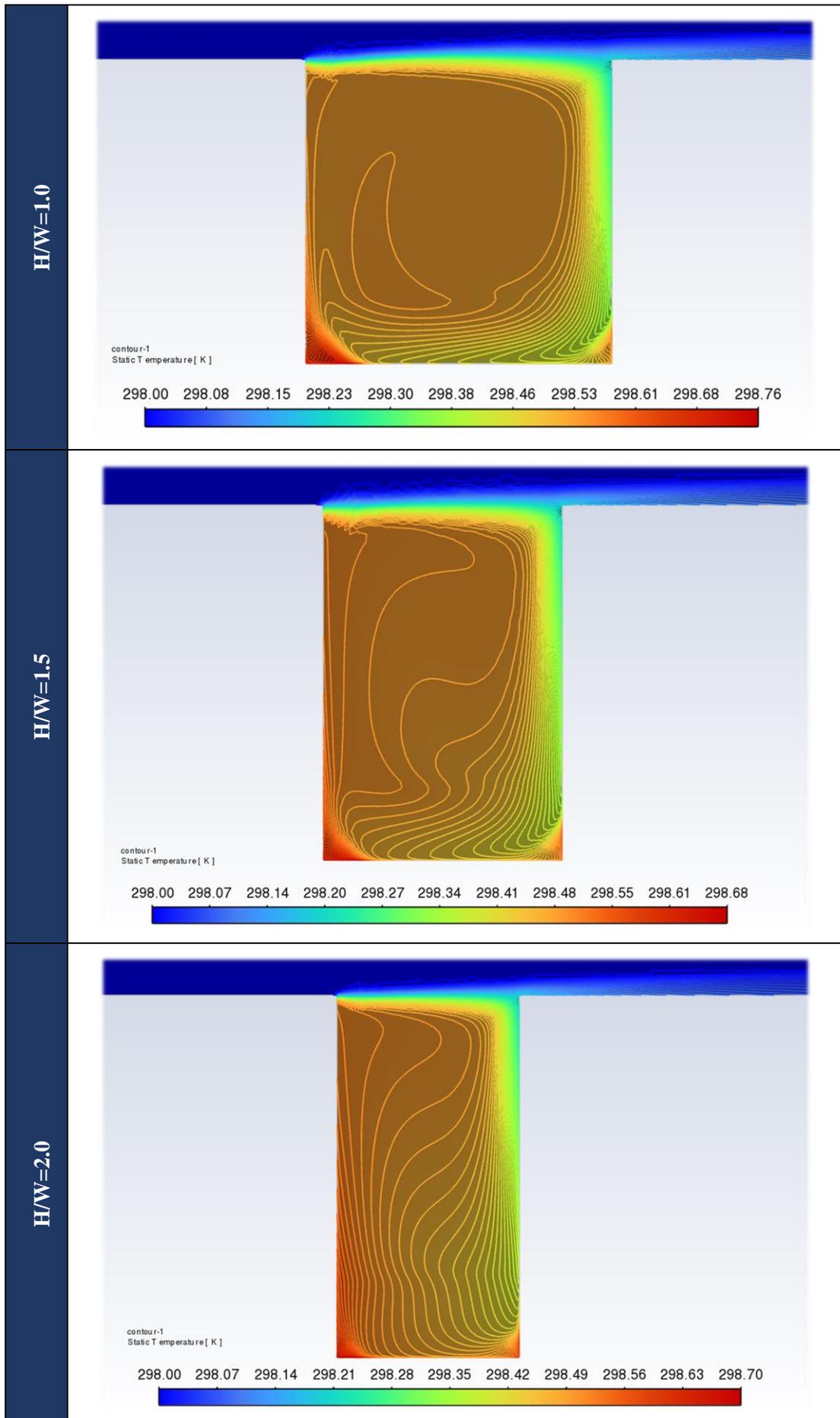
3.4 CALOR ANTROPOGÉNICO REAL

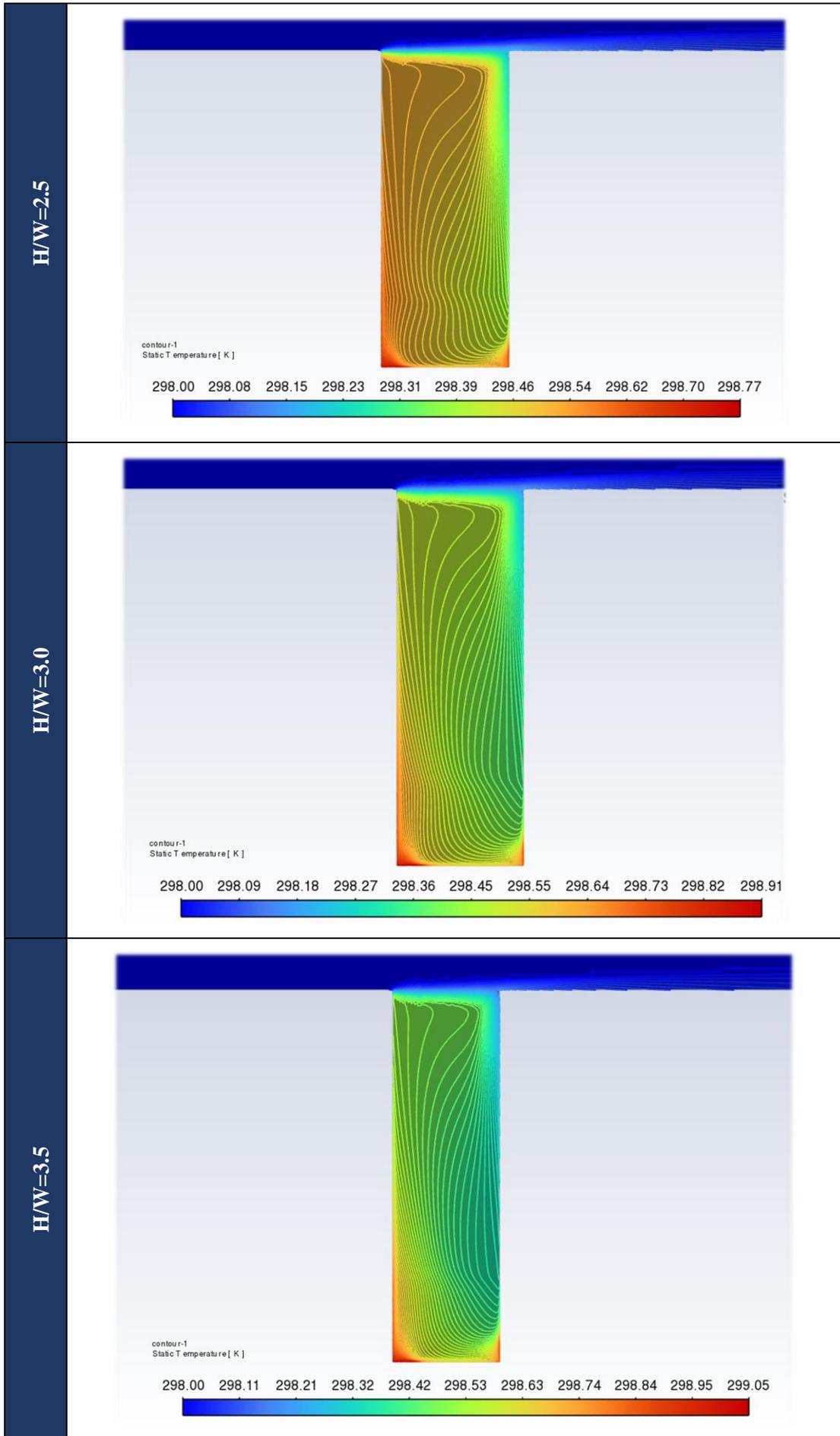
El objetivo de este apartado es comparar los resultados gráficos obtenidos en los dos casos con generación de calor: el mostrado en el apartado anterior con generación de 200 W/m^3 en toda la zona de la depresión; y el nuevo caso, en el que la generación de calor se concentra únicamente en la zona inferior del subvolumen de la depresión y tiene un valor más acorde a la realidad, siendo este de 6 W/m^3 .

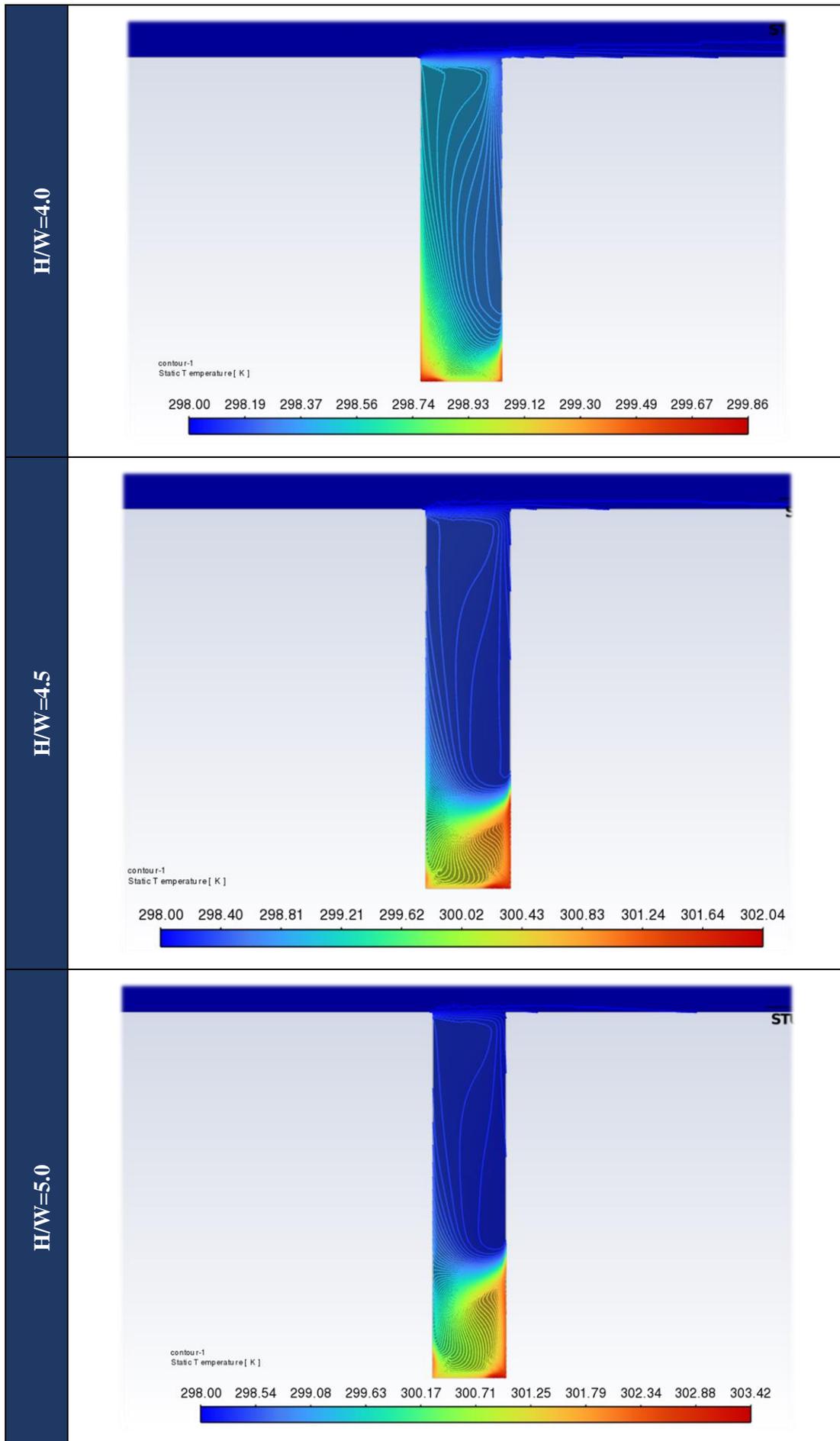
Al igual que en el caso anterior, se han obtenido los contornos de temperatura para cada una de las geometrías simuladas, siendo los resultados los mostrados en la Tabla 3.14. En las siguientes figuras se muestra el contorno de temperatura acompañado en la parte inferior de la escala de colores representativa de esa gráfica en concreto, lo cual permite visualizar rápidamente dónde se produce la temperatura máxima en la depresión, y la temperatura que experimentan los diferentes puntos de esta.

Tabla 3.14. Contornos de temperatura en el caso calor antropogénico real. Fuente: Elaboración propia.









Las principales conclusiones obtenidas del análisis de los contornos de temperatura de los dos casos con generación de calor son las enumeradas a continuación:

- Para las geometrías iniciales, con relaciones de aspecto menores, la temperatura máxima se produce en la esquina inferior izquierda, mientras que el resto de los puntos presentan poca variación en su temperatura con respecto a la del aire de entrada (25 °C). Se puede apreciar cómo la zona a barlovento de estas geometrías es la que presenta menor temperatura, debido a que en esta zona es donde se produce la incidencia de la corriente de aire exterior, siendo por tanto la región más refrigerada del cañón.
- A medida que aumenta la relación de aspecto, la acumulación de calor se produce por igual en las dos esquinas inferiores, siendo en estos puntos donde se alcanza la temperatura máxima.
- El número de vórtices formados tiene una relación estrecha con el desplazamiento del calor generado en la depresión. En relaciones de aspecto para las que se forma un único vórtice, el aire exterior desplaza bien el calor generado. Sin embargo, en cañones más profundos en los que el número de vórtices aumenta, el caudal de aire exterior sólo refrigera el sector superior de la depresión, dando como resultado una temperatura máxima mayor que la alcanzada en casos anteriores.

Las temperaturas media y máxima en el subvolumen de la depresión para el caso con generación de calor antropogénico real se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Temperaturas media y máxima en el subvolumen con generación de calor antropogénico real. Fuente: Elaboración propia.

H/W [-]	T ^a _{media} [°C]	T ^a _{máxima} [°C]
0.2	25.38	29.8
0.4	25.23	25.69
0.6	25.28	25.55
0.8	25.35	25.63
1.0	25.35	25.61
1.5	25.30	25.53
2.0	25.33	25.55
2.5	25.32	25.62
3.0	25.36	25.76
3.5	25.39	25.90
4.0	25.59	26.71
4.5	27.17	28.89
5.0	27.77	30.05

Pese a lo obtenido para la primera relación de aspecto, la tendencia de la temperatura máxima es aumentar a medida que el cañón es más profundo, debido a la acumulación de calor que se produce en la zona inferior de este para este tipo de geometrías. En el caso con relación de aspecto 0.2, se observa que la temperatura máxima es más elevada que el resto, no siguiendo la tendencia descrita, sin embargo, la temperatura media es similar a la presentada en los casos con geometría próxima, por lo que este valor tan elevado de la temperatura máxima queda justificado al ser un único punto localizado al que no llega bien el caudal de aire y no permite su

refrigeración. En el caso de la temperatura media, se mantiene constante y cercana a los 25 °C de la corriente de aire exterior. Este hecho se debe a que las temperaturas máximas se producen en puntos concretos de la geometría, estando el resto a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, y, en consecuencia, manteniendo la media cercana a 25 °C. Por último, la temperatura máxima se da en la relación de aspecto de 5.0, siendo esta temperatura de 30.05 °C, es decir, el calor generado por la actividad antropogénica supone un aumento de 5 °C en la temperatura del aire ambiente.

De la comparación de los dos casos analizados con generación de calor, se puede concluir que la tendencia seguida por ambos es muy similar. Los puntos de mayor temperatura están localizados en las esquinas inferiores de la depresión, debido a que estas zonas no se ven tan afectadas por la entrada de aire exterior, y, por tanto, no se produce el desplazamiento del calor generado y la consiguiente refrigeración del volumen. Por otra parte, aunque resulte un aspecto de carácter obvio, el valor del calor volumétrico generado tiene una influencia significativa en las temperaturas máximas que se registran en el espacio. Extrapolando este aspecto a la vida real, se puede pensar en cómo calles con mayor concentración de vehículos, equipos exteriores de los sistemas de climatización en las fachadas de los edificios o afluencia de personas, son menos agradables térmicamente que otras con características diferentes a estas. En muchos casos, esto se ve agravado por la insuficiencia de zonas verdes en las calles o los materiales empleados en las construcciones urbanas. Finalmente, se ha podido comprobar que un aumento de la velocidad del aire exterior contribuye a desplazar más fácilmente el calor generado en el interior de la depresión, es decir, el caudal de aire exterior actúa como ventilación de los cañones urbanos.

4 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este capítulo se exponen las principales conclusiones obtenidas acerca de los aspectos desarrollados en este proyecto, junto con una serie de desarrollos futuros o ideas que se podrían llevar a cabo al realizar un trabajo de características similares a este.

4.1 CONCLUSIONES

La elaboración de este proyecto ha permitido obtener una serie de conclusiones, las cuales se exponen a continuación.

Respecto a la influencia de la velocidad del aire de entrada a la depresión, se ha comprobado cómo el caudal que entra a la depresión aumenta a medida que se produce un aumento de esta velocidad. Sin embargo, para cañones más angostos o profundos, esa corriente de aire ve dificultada su entrada en la zona de la depresión al encontrarse con edificios más próximos entre sí, por lo que el caudal de ventilación es menor, afectando este caudal mayoritariamente a la recirculación o vórtice superior. La consecuencia directa de este hecho es una mayor concentración de contaminantes y calor en la calle a nivel de peatones y cerca de la fachada de los edificios.

En cuanto a la generación de calor en la depresión, los resultados obtenidos demuestran el impacto derivado de la actividad antropogénica en las condiciones climáticas exteriores percibidas en cualquier calle. En este sentido y como consecuencia de lo expuesto en el párrafo anterior, las temperaturas máximas se alcanzan en las esquinas inferiores de la depresión, en las que se produce la acumulación del calor generado por vehículos, sistemas de climatización, etc., y que no pueden refrigerarse con la corriente de aire incidente tanto como otras zonas de la depresión. Además, se ha podido concluir que la temperatura máxima alcanzada en la depresión aumenta para relaciones de aspecto mayores, es decir, en calles con edificios de mayor altura.

Por otra parte, destaca la formación de vórtices en todas las geometrías analizadas en este proyecto, dando como resultado uno o varios flujos de recirculación del aire en la zona de la depresión. El estudio de velocidades realizado ha permitido concluir que el número de vórtices formados aumenta a medida que lo hace la relación de aspecto, llegando incluso a presentarse tres vórtices en algunas geometrías. Además, para cañones con relaciones de aspecto altas, a partir de una velocidad crítica del aire de entrada, el número de vórtices formados disminuye, presentándose solo uno. En todas las geometrías analizadas se ha comprobado que la zona más afectada por el caudal de aire incidente es la región a barlovento del cañón.

Finalmente, cabe señalar que este proyecto ha supuesto un notable aporte de conocimientos en el manejo del software de simulación de dinámica de fluidos computacional *Ansys Fluent*, del que no se tenían nociones previas a la realización de este trabajo.

4.2 DESARROLLOS FUTUROS

En el transcurso de la elaboración del presente TFM se han identificado diversas opciones de desarrollos futuros que podrían incorporarse en otros proyectos cuya temática sea el estudio de la isla de calor urbana. Los aspectos en los que se considera que se podría trabajar son los siguientes:

- Aumento de la calidad del mallado utilizado en las simulaciones, consiguiendo un mallado más fino que daría lugar a unos resultados de mayor precisión numérica. Esta mejora supondría la utilización del software completo, y no de la versión de estudiantes que se ha empleado para la realización de este proyecto, y que, como ya se ha comentado en repetidas ocasiones a lo largo del presente documento, supone una limitación en el número máximo de celdas que forman el mallado. Además, este aumento de la calidad de la malla de la geometría a simular se consigue a costa de un importante aumento en el tiempo de computación, que puede ser aceptable para estudios en los que se requiera mayor calidad en los resultados.
- Respecto a la división en subvolúmenes realizada para considerar el efecto de la temperatura introduciendo en uno de estos un valor de generación de calor volumétrica, se plantea la posibilidad de dividir en mayor número de subvolúmenes para conseguir resultados más precisos. De esta forma, se obtendrían las temperaturas medias en cada uno de los subvolúmenes y se podría analizar de dónde procede el caudal que entra a la región de la depresión.
- Simular conjuntamente varias calles pertenecientes a la manzana de una ciudad, para ver cómo influye la geometría y ordenación de estas calles entre sí en los patrones de viento formados, y su traslado a la temperatura que se alcanza en los cañones de cada calle. En este proyecto solo se ha analizado un cañón aislado del resto, pero se considera que la ordenación urbana de una ciudad en su conjunto también es un factor determinante en la dispersión y dirección del flujo de viento, que puede verse afectada, por ejemplo, con una concentración muy alta de rascacielos o edificios de gran altura.
- Valorar la influencia de la temperatura y velocidad del aire de entrada en la capacidad para desplazar el calor generado en la depresión a consecuencia de la actividad antropogénica. De esta forma, se podría analizar cómo el caudal de aire de entrada puede o no desplazar el calor generado en distintas épocas del año y para diferentes valores de intensidad del viento.

REFERENCIAS

- [1] Abd Elraouf, R., Elmokadem, A., Megahed, N., Abo Eleinen, O., & Eltarabily, S. (2022). The impact of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot-humid climate. *Building and Environment*, 225, 109632. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109632>
- [2] Ai, Z. T., & Mak, C. M. (2017). CFD simulation of flow in a long street canyon under a perpendicular wind direction: Evaluation of three computational settings. *Building and Environment*, 114, 293–306. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.12.032>
- [3] Battista, G., de Lieto Vollaro, E., Ocloń, P., & de Lieto Vollaro, R. (2023). Effects of urban heat island mitigation strategies in an urban square: A numerical modelling and experimental investigation. *Energy and Buildings*, 282, 112809. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.112809>
- [4] Cañón urbano. *Geometría, clasificación y efectos*. (n.d.). Retrieved March 22, 2023, from https://hmong.es/wiki/Urban_canyon
- [5] Faragallah, R. N., & Ragheb, R. A. (2022). Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101609. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2021.10.004>
- [6] Gago, E. J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., & Ordóñez, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 749–758. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.05.057>
- [7] Hang, J., & Chen, G. (2022). Experimental study of urban microclimate on scaled street canyons with various aspect ratios. *Urban Climate*, 46, 101299. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101299>
- [8] Iberdrola. (n.d.). *Las islas de calor urbanas y sus efectos adversos para sus habitantes*. Retrieved March 14, 2023, from <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/isla-de-calor#:~:text=QU%C3%89%20ES%20UNA%20ISLA%20DE,debido%20a%20la%20actividad%20humana>.

- [9] Khalvandi, R., & Karimimoshaver, M. (2023). The optimal ratio in the street canyons: Comparison of two methods of satellite images and simulation. *Building and Environment*, 229, 109927. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109927>
- [10] Li, X., Zhou, Y., Yu, S., Jia, G., Li, H., & Li, W. (2019). Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 174, 407–419. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.02.183>
- [11] Mazzeo, D., Matera, N., Peri, G., & Scaccianoce, G. (2023). Forecasting green roofs' potential in improving building thermal performance and mitigating urban heat island in the Mediterranean area: An artificial intelligence-based approach. *Applied Thermal Engineering*, 222, 119879. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.119879>
- [12] Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2018). THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 157–168. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2017.09.007>
- [13] Ovacen. (n.d.). *Cubiertas vegetales o verdes. Ventajas y desventajas de la cubierta ajardinada*. Retrieved March 18, 2023, from <https://ovacen.com/como-construir-cubiertas-vegetales-o-verdes-manuales-guias/>
- [14] Romero Rodríguez, L., Sánchez Ramos, J., Guerrero Delgado, M. del C., & Álvarez Domínguez, S. (2022). Implications of the Urban Heat Island on the selection of optimal retrofitting strategies: A case study in a Mediterranean climate. *Urban Climate*, 44, 101234. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101234>
- [15] Schwaab, J., Meier, R., Mussetti, G., Seneviratne, S., Bürgi, C., & Davin, E. L. (2021). The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26768-w>
- [16] Wang, X., Li, H., & Sodoudi, S. (2022). The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Building and Environment*, 217, 109082. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109082>
- [17] WARREN L. MAC CABE. (1968). *Operaciones básicas de ingeniería química* (Vol. 1).
- [18] RNG k-epsilon model. (n.d.). Retrieved May 28, 2023, from <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node59.htm>
- [19] Enhanced Wall Treatment. (n.d.). Retrieved May 28, 2023, from <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node101.htm>

- [20] ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. (n.d.). Retrieved May 28, 2023, from https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- [21] Abu-Zidan, Y., Mendis, P., & Gunawardena, T. (2021). Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings. *Heliyon*, 7(4), e06723. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06723>
- [22] Karimimoshaver, M., Khalvandi, R., & Khalvandi, M. (2021). The effect of urban morphology on heat accumulation in urban street canyons and mitigation approach. *Sustainable Cities and Society*, 73, 103127. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103127>
- [23] Barlow, J. F. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, 10(P2), 216–240. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2014.03.011>
- [24] Richards, Peter & Norris, Stuart. (2011). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics - J WIND ENG IND AERODYN.* 99. 257-266. [10.1016/j.jweia.2010.12.008](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.008).
- [25] Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, 219–245. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.02.015>
- [26] Hang, J., Chen, X., Chen, G., Chen, T., Lin, Y., Luo, Z., Zhang, X., & Wang, Q. (2020). The influence of aspect ratios and wall heating conditions on flow and passive pollutant exposure in 2D typical street canyons. *Building and Environment*, 168, 106536. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106536>
- [27] Chan, T. L., Dong, G., Leung, C. W., Cheung, C. S., & Hung, W. T. (2002). Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *Atmospheric Environment*, 36(5), 861–872. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00490-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00490-3)
- [28] Li, X. X., Liu, C. H., & Leung, D. Y. C. (2005). Development of a k-ε model for the determination of air exchange rates for street canyons. *Atmospheric Environment*, 39(38), 7285–7296. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2005.09.00>