



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

TÍTULO DE TESIS

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN LA MORFOLOGÍA URBANA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CHETUMAL

ARQ. IVÁN ALEXANDER WONG GONZÁLEZ
TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN URBANISMO

DIRECTORA DE TESIS: MTRA. GABRIELA ROSAS CORREA
TECNM – INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

COMITÉ TUTORIAL

SECRETARIO: DR. RICARDO ENRIQUE VEGA AZAMAR
TECNM – INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

VOCAL: MTRA. LAURA ISABEL GUARNEROS URBINA
TECNM – INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

DICIEMBRE 2022
CHETUMAL, Q. ROO. MX.



Instituto Tecnológico de Chetumal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Chetumal, Quintana Roo, 15/noviembre/2022
OFICIO: W- 516/2022

ASUNTO: Autorización de impresión

ARQ. IVÁN ALEXANDER WONG GONZÁLEZ
ESTUDIANTE
MAESTRÍA EN URBANISMO
PRESENTE

Habiendo cumplido con los requisitos para obtención del grado de MAESTRO EN URBANISMO, establecidos en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México y que competen a la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunico que:

SE LE CONCEDE LA AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE LA TESIS

"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN LA MORFOLOGÍA URBANA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CHETUMAL"

Sin otro particular quedo de Usted.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica ®
Cultura, Ciencia y Tecnología para la Superación de México ®*

DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.c..p. Minutario.
ACB*Gaby



Av. Insurgentes #330, esq. Andrés Quintana Roo, Col. David Gustavo Gutiérrez, Apdo. Postal 67
C.P. 77013, Chetumal, Quintana Roo. Tel. (983) 8322330 ext. 101 tecnm.mx | chetumal.tecnm.mx



2022 Flores
Año de Magón
PRELADOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



Chetumal, Quintana Roo, a 3/octubre/2022
Asunto: Aprobación de Tesis

MTRA. LAURA ISABEL GUARNEROS URBINA
COORDINADORA
MAESTRÍA EN URBANISMO

PRESENTE

Por este medio tenemos a bien comunicarle que el trabajo de tesis "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN LA MORFOLOGÍA URBANA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CHETUMAL", del alumno "IVÁN ALEXANDER WONG GONZÁLEZ" (No. Control M12390647), ha sido revisado y aprobado por el Comité Tutorial, por lo que puede continuar con los trámites para la obtención del grado de Maestro en Urbanismo.

Sin otro particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE

COMITÉ TUTORIAL

M. en Arq. Gabriela Rosas Correa
DIRECTORA DE TESIS

MD. Laura Isabel Guarneros Urbina
ASESORA DE TESIS

Dr. Ricardo Enrique Vega Azamar
ASESOR DE TESIS





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Chetumal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

FORMATO TD3-2022

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en este documento titulado “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN LA MORFOLOGÍA URBANA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CHETUMAL” proviene de las actividades de investigación durante el periodo que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis dentro del programa de MAESTRÍA EN URBANISMO en el Instituto Tecnológico de Chetumal del Tecnológico Nacional de México y que dicha información le pertenece en términos de la Ley de Propiedad Industrial, por lo que no me reservo ningún derecho sobre ello.

ATENTAMENTE

IVÁN ALEXANDER WONG GONZÁLEZ

Chetumal, Quintana Roo, a 03 de OCTUBRE de 2022.



Av. Insurgentes #330, esq. Andrés Quintana Roo, Col. David Gustavo Gutiérrez, Apdo. Postal 67
C.P. 77013, Chetumal, Quintana Roo. Tel. (983) 8322330 ext. 101 tecnm.mx | chetumal.tecnm.mx



2022 **Ricardo Flores**
Año de **Magón**
PEREGRINACIÓN DE LA REFORMACIÓN MEXICANA



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y AUTENTICIDAD

Por medio de la presente, IVÁN ALEXANDER WONG GONZÁLEZ declaro que el trabajo de investigación titulado "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN LA MORFOLOGÍA URBANA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CHETUMAL" y dirigido por GABRIELA ROSAS CORREA como tema de tesis para la obtención del Título de MAESTRO EN URBANISMO, es original. El presente trabajo de investigación es el resultado de mi trabajo personal, el cual no ha sido copiado de investigaciones previas publicadas en medios digitales y/o impresos. Las ideas, definiciones y/o ilustraciones tomadas de trabajos previos han sido citadas de la manera correcta para dar crédito a los autores originales. Declaro que el presente trabajo de investigación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, y tampoco ha sido publicado en sitio alguno. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y cometer plagio es objeto de sanciones legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el presente documento, así como de los derechos sobre la obra presentada. Asimismo, me hago responsable ante el Instituto Tecnológico de Chetumal o terceros de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello y sometiéndome a las normas vigentes del Instituto Tecnológico de Chetumal y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

ATENTAMENTE

IVÁN ALEXANDER WONG GONZÁLEZ

Chetumal, Quintana Roo, a 03 de OCTUBRE de 2022.



DEDICATORIA

A DIOS, POR PERMITIRME CUMPLIR MIS IDEALES Y POR DARMEN LA FORTALEZA EMOCIONAL, MENTAL Y PSICOLÓGICA PARA ALCANZAR MIS OBJETIVOS.

A MI MADRE LOURDES.

MAMÁ, GRACIAS POR TUS ORACIONES Y POR APOYARME EN EL CAMINO DE MI CRECIMIENTO Y FORMACIÓN PERSONAL, ACADÉMICA Y PROFESIONAL. NO HUBIERA SIDO FÁCIL SIN TU AYUDA. TÚ SABES MEJOR QUE NADIE POR LO QUE HE PASADO DESDE QUE EMPECÉ CON ESTA LOCURA.

A MI HERMANO, DORIAN POR AYUDARME TAMBIÉN A CONCLUIR ESTE PROYECTO Y FUNGIR COMO SERVICIO SOCIAL PARA LA REALIZACIÓN DE ALGUNAS ACTIVIDADES DE ESTA INVESTIGACIÓN.

A MI ABUELITA BERTHA QUE ME DABA MIS GASTADAS.

¡GRACIAS A USTEDES!

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO EL APOYO RECIBIDO DURANTE EL PROCESO DE FORMACIÓN A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DE LA MAESTRÍA EN URBANISMO DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL.

ESPECIALMENTE A MI DIRECTORA Y ASESORES DE TESIS, LA MTRA. GABRIELA ROSAS CORREA, A LA MTRA. LAURA ISABEL GUARNEROS URBINA Y AL DR. RICARDO ENRIQUE VEGA AZAMAR, QUIENES ESTUVIERON ACOMPAÑÁNDOME Y APOYÁNDOME DURANTE TODO EL PROCESO DE FORMACIÓN E INVESTIGACIÓN. POR SUS PALABRAS DE ALIENTO Y ANIMO EN LOS MOMENTOS DE INCERTIDUMBRE.

IGUALMENTE AGRADECER AL MTRO. ALBERTH FABIAN VELASCO SANDOVAL POR COMPARTIR SU CONOCIMIENTO EN EL MANEJO DEL SOFTWARE CFD Y ESTUDIOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS.

AGRADEZCO TAMBIÉN A MI PEQUEÑA PERO GRAN FAMILIA ACADÉMICA POR SU ACOMPAÑAMIENTO, ESPECIALMENTE A LA ARQUITECTA LAURA, COMO TAMBIÉN A SANTIAGO AJA, EDUARDO DENIS, JONATHAN SOLIS Y JONATHAN QUEZADA.

“En la ciudad lo primero son las calles y plazas, los espacios colectivos, después vendrán los edificios y las vías. El espacio público define la calidad de la ciudad, porque indica la calidad de vida de la gente y la calidad de la ciudadanía de sus habitantes.”

Jordi Borja.

Resumen

La investigación tiene la finalidad de determinar si la orientación de la traza urbana del Centro Histórico de Chetumal en base a su relación de aspectos, la disposición y forma de los edificios en conjunto con las características climáticas de la ciudad, modifican la dirección y velocidad del viento que fluye en las secciones viales; disminuyendo su aceleración, desfavoreciendo el confort térmico del peatón que circula en los espacios urbanos. Por consiguiente, el estudio tiene el objetivo de analizar el comportamiento del viento mediante la dinámica de fluidos computacional (simulaciones CFD).

La metodología experimental empleada expone cuatro etapas; la primera corresponde a la revisión de literatura en relación al crecimiento de la mancha urbana de Chetumal y la descripción morfológica del centro histórico. En segundo lugar, para la selección y levantamiento del sitio se realizaron visitas de campo y se emplearon orto-fotografías. Asimismo, se establecieron las características climáticas del sitio a partir del Climate Consultant 6.0. Seguidamente, se ejecutaron simulaciones para el análisis mediante el módulo CFD exterior del DesignBuilder v6 y se utilizó la escala de Beaufort para describir la acción del viento. Por último, se establecen las variables morfológicas que inciden en la modificación del flujo del viento que circula en las secciones viales. Finalmente, los resultados del análisis CFD aislado establecen que no es posible precisar los efectos del viento. Por tal motivo, se realizó una simulación CFD total del Centro Histórico de Chetumal, donde se corroboró que la velocidad máxima del viento corresponde a 7.68 m/s con velocidades de 28.4 km/h procedente del Sureste. Igualmente, se determina que el viento es adecuado, ya que sus efectos apenas se pueden percibir y los fenómenos manifestados corresponden: al efecto esquina, rodillo y el efecto de aceleración.

No obstante, a pesar de que la zona posee un flujo de viento adecuado, existen elementos y fenómenos climáticos en el sitio que modifican el confort del individuo.

Palabras clave: CFD, Comportamiento del viento, Morfología Urbana, Centro Histórico.

Abstrac

The purpose of the research is to determine if the orientation of the urban layout of the Historic Center of Chetumal based on its relationship of aspects, the layout and shape of the buildings together with the climatic characteristics of the city, modify the direction and speed of the wind circulating in road sections; decreasing its acceleration, disfavoring the thermal comfort of the pedestrian who circulates in the urban spaces of the Historic Center of the city of Chetumal. Therefore, the study aims to analyze the behavior of the wind through computational fluid dynamics (CFD simulations).

The experimental methodology used exposes four stages; The first corresponds to the literature review in relation to the growth of the urban area of Chetumal and the morphological description of the historic center. Secondly, for the selection and survey of the site, field visits were made and ortho-photographs were used. Likewise, the climatic characteristics of the site were established from the Climate Consultant 6.0. They were then run for analysis using the exterior CFD module of DesignBuilder v6 and the Beaufort scale was used to describe the action of the wind. Finally, the morphological variables that affect the modification of the wind flow that circulates in the road sections are established. The results of the isolated CFD analysis establish that it is not possible to pin down the effects of the wind. For this reason, a total CFD simulation of the Historic Center of Chetumal was carried out, where it was confirmed that the maximum wind speed corresponds to 7.68 m/s with speeds of 28.4 km/h coming from the Southeast.

Likewise, it is determined that the wind is adequate, since its effects can hardly be perceived and the manifested phenomena correspond: to the corner effect, roller and the

acceleration effect. However, despite the fact that the area has adequate wind flow, there are climatic elements and phenomena on the site that modify the individual's comfort.

Keywords: CFD, Wind behavior, Urban Morphology, Historic Center.

INDICE

1.	Capítulo 1. Problema de Investigación y Fundamentación	3
1.1.	Planteamiento del Problema	3
1.1.1.	Pregunta de Investigación	6
1.2.	Hipótesis	6
1.3.	Justificación	6
1.4.	Objetivo General.....	9
1.4.1.	Objetivos Específicos.....	9
2.	Capítulo 2. Revisión de Literatura	10
2.1.	Estado del Arte	10
2.2.	Marco Conceptual.....	25
2.2.1.	Morfología Urbana.....	26
2.2.2.	Conceptos Básicos del Viento.....	27
2.2.2.1.	Viento	27
2.2.2.2.	Efecto Coriolis.....	29
2.2.2.3.	Regiones y Depresiones Anticiclónicas	30
2.2.2.4.	Patrones de Circulación Regional o Cinturones de Viento	31
2.2.2.5.	Gradientes de Presión.....	32
2.2.2.6.	Fuerza Centrifuga.....	32

2.2.2.7.	Medición del Viento.....	33
2.2.2.8.	Dirección del Viento	33
2.2.2.9.	Rosa de los Vientos.....	34
2.2.3.	Velocidad	35
2.2.3.1.	Escala Beaufort	36
2.2.3.2.	Vientos Locales.....	37
2.2.3.3.	Viento Laminar – Capa Límite.....	39
2.2.3.4.	Viento Convectivo.....	39
2.2.3.5.	Brisa de Tierra y Mar	40
2.2.3.6.	Vientos Urbanos.....	42
2.2.4.	Efectos del Viento sobre la Morfología Urbana.....	42
2.2.4.1.	Efecto Rodillo – Efecto Esquina	43
2.2.4.2.	Efecto Aceleración o Efecto Venturi	44
2.2.4.3.	Efecto Pilotes.....	46
2.2.4.4.	Vórtices de Circulación.....	47
2.2.5.	Flujos de Viento A través de la Morfología Urbana	48
3.	Capítulo 3. Metodología	52
4.	Capítulo 4. Estudio de la Morfología Urbana de la Ciudad de Chetumal	57
4.1.	Antecedentes del Crecimiento Urbano de la ciudad de Chetumal.	57
5.	Capítulo 5. Resultados y Discusión	68

5.1.	Análisis Morfológico del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal.....	68
5.1.1.	Análisis Vial de las Secciones del Centro Histórico de Chetumal.....	70
5.1.2.	Análisis de la Relación de Aspectos del Centro Histórico de Chetumal.	85
5.2.	CFD - Centro Histórico de la ciudad de Chetumal.....	95
5.3.	Análisis de Resultados - Estudios de Caso.....	96
5.4.	Discusión	111
6.	Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones	115
6.1.	Recomendaciones	117
7.	Referencias Bibliográficas	122
8.	Anexo.....	137

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Escala de Fuerzas del Viento de Beaufort	36
Tabla 2 Tipografía Vial - Manual de Calles – Diseño Vial para Ciudades Mexicanas ...	72
Tabla 3 Caracterización Morfológica Sección 1	86
Tabla 4 Caracterización Morfológica Sección 2.....	87
Tabla 5 Caracterización Morfológica Sección 3.....	88
Tabla 6 Caracterización Morfológica Sección 4.....	89
Tabla 7 Caracterización Morfológica Sección 5.....	90
Tabla 8 Caracterización Morfológica Sección 6.....	91
Tabla 9 Caracterización Morfológica Sección 7.....	92
Tabla 10 Caracterización Morfológica Sección 8.....	93
Tabla 11 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV1	97
Tabla 12 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV2.....	98
Tabla 13 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV3.....	99
Tabla 14 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV4.....	100
Tabla 15 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV5.....	101
Tabla 16 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV6.....	102
Tabla 17 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV7.....	103
Tabla 18 Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV8.....	104
Tabla 19 Efectos del Viento en el Centro Histórico de Chetumal.....	109

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema Conceptual Urbanismo Aerodinámico	25
Figura 2. Movimiento de Rotación Terrestre.....	28
Figura 3 Efecto Coriolis.....	29
Figura 4 Fuerza Centrifuga.....	33
Figura 5 Rosa de los vientos	35
Figura 6 Brisa Diurna	41
Figura 7 Brisa Nocturna.....	41
Figura 8 Efecto Rodillo – Efecto Esquina	44
Figura 9 Efecto Aceleración	45
Figura 10 Efecto Venturi	46
Figura 11 Efecto Pilotes.....	47
Figura 12 Vórtices de Von Kármán	48
Figura 13 Patrones del Flujo de Viento en Fachadas.....	50
Figura 14 Diagramas de las variables de investigación.....	51
Figura 15. Levantamiento del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal.....	53
Figura 16 Esquema Metodológico.....	56
Figura 17 Ubicación Geográfica de Chetumal	57
Figura 18 Trazo Vial de Payo Obispo 1902	58
Figura 19 Traza vial de Payo Obispo en 1922.....	59
Figura 20 Poblado de Payo Obispo en 1928.....	60
Figura 21 Plano de Chetumal 1946.....	61
Figura 22 Plano de Chetumal con la Propuesta de Reubicación Urbana 1956.....	62
Figura 23 Plano de Chetumal 1972.....	63

Figura 24 Área Urbana de Chetumal 1977	64
Figura 25 Área Urbana de Chetumal 1993	64
Figura 26 Mapa de Chetumal 2003.....	65
Figura 27 Expansión Urbana de Chetumal	66
Figura 28 Comparación de la Mancha Urbana de Chetumal entre 1989 y 2020.....	67
Figura 29 Traza y Tejido de la Mancha Urbana de Chetumal.....	68
Figura 30 Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal.....	69
Figura 31 Secciones del Sector Norte del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal ..	70
Figura 32 Secciones del Sector Sur del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal	71
Figura 33 Sección Vial Esquemática 1	74
Figura 34 Fotografía Sección Vial 1	74
Figura 35 Sección Vial Esquemática 2	75
Figura 36 Fotografía Sección Vial 2.....	76
Figura 37 Sección Vial Esquemática 3	77
Figura 38 Fotografía Sección Vial 3.....	77
Figura 39 Sección Vial Esquemática 4.....	78
Figura 40 Fotografía Sección Vial 4.....	79
Figura 41 Sección Vial Esquemática 5	80
Figura 42 Fotografía Sección Vial 5.....	81
Figura 43 Sección Vial Esquemática 6	82
Figura 44 Fotografía Sección Vial 6.....	82
Figura 45 Sección Vial Esquemática 7	83
Figura 46 Fotografía Sección Vial 7.....	83

Figura 47 Sección Vial Esquemática 8.....	84
Figura 48 Fotografía Sección Vial 8.....	85
Figura 49 Relación de Aspectos Sección 1.....	86
Figura 50 Relación de Aspectos Sección 2.....	87
Figura 51 Relación de Aspectos Sección 3.....	88
Figura 52 Relación de Aspectos Sección 4.....	89
Figura 53 Relación de Aspectos Sección 5.....	90
Figura 54 Relación de Aspectos Sección 6.....	91
Figura 55 Relación de Aspectos Sección 7.....	92
Figura 56 Relación de Aspectos Sección 8.....	93
Figura 57 Cañón Urbano Esquemático.....	94
Figura 58 Levantamiento 3D del Centro Histórico de Chetumal Design Buidar v6.....	95
Figura 59 Wind Vheel Chetumal.....	96
Figura 60 Simulación CFD - Sección Vial 1.....	97
Figura 61 Simulación CFD - Sección Vial 2.....	98
Figura 62 Simulación CFD – Sección Vial 3.....	99
Figura 63 Simulación CFD – Sección Vial 4.....	100
Figura 64 Simulación CFD – Sección Vial 5.....	101
Figura 65 Simulación CFD – Sección Vial 6.....	102
Figura 66 Simulación CFD – Sección Vial 7.....	103
Figura 67 Simulación CFD – Sección Vial 8.....	104
Figura 68 Simulación CFD Sector Norte.....	106
Figura 69 Simulación CFD Sector Sur.....	107

Introducción

El sol y el viento; son los dos elementos esenciales que rigen el urbanismo bioclimático, sin embargo, el sol ha sido el más estudiado en todas sus escalas y dimensiones. Esto se debe principalmente a que el viento por su comportamiento es complejo de analizar.

En un principio los saberes del viento se basaban en la intuición y en la observación de sus manifestaciones visibles como, por ejemplo, en la lluvia, los remolinos o los objetos que arrastra. Esto permitió desarrollar criterios para el diseño de ciudades con principios eólicos. Del mismo modo, los avances científicos acerca del viento permitieron incorporar innovaciones metodológicas, herramientas e instrumentos, posibilitando la realización de estudios acerca de su proceder desde diferentes disciplinas, tales como la geografía, la meteorología, la climatología, la bioclimática, la arquitectura y el urbanismo.

En la actualidad, es fundamental reunir estos conocimientos para alcanzar avances interdisciplinarios que permitan entender la importancia del viento en la planificación de ciudades, debido a que de acuerdo con el diseño del área urbana se pueden percibir variaciones significativas en la temperatura, precipitación, humedad y el flujo del aire en los microclimas creados en las zonas edificadas afectando positiva o negativamente la habitabilidad térmica del usuario en el espacio público.

Por tal motivo, la presente investigación tiene el objetivo de analizar a través de simulaciones de Dinámicas de Fluidos Computacionales (CFD) el comportamiento del viento en un escenario volumétrico del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal, realizado adimensionalmente a una escala 1:10, considerando principalmente la disposición - forma de los edificios y su relación de aspectos (ancho vial [W] y la altura de los edificios [H]), así como también sus características climáticas del sitio con relación a la velocidad y dirección del viento.

Esto con la finalidad de determinar; si la orientación de la traza urbana presente en las secciones viales del Centro Histórico de la Chetumal en conjunto con la disposición y forma de los edificios modifican la dirección y velocidad del viento disminuyendo su aceleración.

Agregado a lo anterior, la investigación se divide a cuatro etapas, la primera, tiene la finalidad de conocer los antecedentes históricos del crecimiento exponencial de la mancha urbana de Chetumal y la caracterización morfológica del Centro histórico de la ciudad. En segundo lugar, se realizó la selección y levantamiento de ocho secciones viales del centro histórico considerando sus características morfológicas – geométricas, como también se determinaron las características climáticas del sitio. En tercer lugar, con la información obtenida durante la caracterización y levantamiento de campo se ejecutaron simulaciones CDF para analizar el comportamiento del viento a través de elementos adimensionales a escala de las ocho secciones viales seleccionadas. Por último, el análisis CFD permitió definir el comportamiento del viento en cada uno de los sectores seleccionados. Además de establecer cuáles son las variables morfológicas que inciden para modificar de manera positiva o negativa el flujo del viento que circula a través de las secciones.

Cabe mencionar que, en la actualidad la planificación de una urbe se debe adaptar a la realidad local para balancear el diseño de una ciudad con las variables climáticas y territoriales del sitio, con la finalidad de mejorar las áreas urbanas de forma sustentable. De esta manera “el urbanismo bioclimático tiene como punto de partida el recoger las condicionantes meteorológicas del clima de la región para, desde allí, trazar las relaciones con los espacios urbanos y con la masa edificatoria” (C. Bustamante *et al.*, 2014, p. 33).

Capítulo 1. Problema de Investigación y Fundamentación

1.1. Planteamiento del Problema

En la actualidad, la generación de conocimiento acerca del comportamiento del viento en la ciudad se enfoca sustancialmente en el desarrollo de estrategias de ventilación urbana con el propósito de mejorar el confort térmico. Asimismo, el viento siendo de los principales factores que determinan el confort térmico interior y exterior es de los menos estudiados por su complejidad (Bustamante, 2015; Bustamante e Higuera, 2013).

No obstante, uno de los motivos principales del desarrollo de las ciudades se encuentra íntimamente ligados a sus características climatológicas y a la actividad del ser humano, ya que busca la manera de adaptarse; modificando su entorno con la finalidad de concebir y establecer un ambiente favorable para su progreso (Cordero, 2014). Asimismo, se ha determinado que estas modificaciones repercuten negativamente en la habitabilidad de los espacios públicos de una ciudad. La ocupación del espacio urbano se ve influenciada por las características espaciales de su morfología y del clima; similar ocurre con las condiciones de habitabilidad exterior en ciudades del trópico húmedo¹, ya que por encontrarse debajo de los 1,000 metros de altitud, las temperaturas superan los 20°C anualmente (González, 2003).

Igualmente, las ciudades que muestran una baja latitud, se exponen significativamente a la formación y a los efectos de las Islas de Calor Urbanas [ICU]², lo que contribuye a que el peatón experimente sensaciones de incomodidad en el espacio urbano durante el verano (Rajagopalan & Wong, 2005). Las islas de calor urbano son principalmente ocasionadas por la sustitución de los entornos naturales y el uso excesivo de materiales impermeables cuyas propiedades

¹Se caracterizan por una enorme franja continua en los hemisferios norte y sur. Posee una variación mínima hasta 25° en temperatura media anual (Haffer, 2001, P.126).

²Conocida en Inglés como Urban Heat Island [UHI].

termodinámicas favorecen su incremento en la acción solar. Cabe añadir que las ICU causan alteraciones en la temperatura, humedad, ventilación y calidad de aire (Chargoy, 2016; Romero *et al.*, 2010; Sepúlveda, 2016).

México es un país que posee una gran diversidad bioclimática con relación a las características de cada ciudad. Un caso en particular es el estado de Quintana Roo que se encuentra en una zona ubicada al sur del país, donde para efectos de la investigación se tendrá como punto de referencia a la capital del Estado. Chetumal al ser uno de los tres núcleos urbanos³ del Estado presenta fenómenos urbanos que repercuten en la habitabilidad del individuo en el exterior e incluso en los espacios interiores, provocando un incremento del consumo energético; que de acuerdo a la Secretaría de Energía [SENER] (2018), para el año 2032 el consumo energético del Estado de Quintana Roo se incrementará en un 70%, equivalente a un consumo del 3.8% anual⁴.

Ahora bien, el centro urbano⁵ de Chetumal se caracteriza por tener cuerpos edificados con alturas irregulares entre los 3 a 8 metros aproximadamente, como también, una variación en el ancho de sus vialidades que oscilan entre 15 y los 20 metros. Además, de que la disposición y forma de sus edificios se debe principalmente al diseño ortogonal en su traza urbana. Sin embargo, se observa que el clima no forma parte del diseño del área, esto ocasiona que las corrientes de viento que circulan dentro de los espacios públicos disminuyan, además de que su comportamiento con relación a su orientación se desconoce. Lo que influye negativamente en el

³Es el conjunto de edificaciones y espacios libres a los que se le reconocen las funciones propias de la ciudad (Zoido *et al.*, 2000).

⁴Dicha afirmación se puede encontrar también en una iniciativa elaborada por el Grupo Legislativo del Partido Verde Ecologista de México (Grupo Legislativo del Partido Verde Ecologista de México, 2019)

⁵ Su localización puede corresponder a una porción del casco antiguo; coincidir con él o sobrepasarlo. Se caracteriza por ser en principio, el más animado y frecuentado. Cumple un papel de sitio central de la ciudad. No por la posición geográfica por ser un rico caudal de equipamientos y servicios cualificados e infrecuentes que alcanzan su máxima intensidad (Zoido *et al.*, 2000).

microclima que rodea a los edificios. De modo que, la morfología urbana que se observa en el sitio es compacta, irregular y predecible.

Otro problema es la falta de confort térmico urbano que se genera en la Av. Héroes, debido al empleo desmesurado de materiales impermeables y el uso insuficiente e inadecuado de vegetación que se observa en varias zonas del centro histórico. Esto incrementa los índices de temperatura entre los meses de mayo y octubre que de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2021), rondan entre los 28 °C y 33 °C. Sin embargo, el peatón por necesidad circula en los espacios públicos experimentando sensaciones de incomodidad, afectando así su habitabilidad térmica exterior⁶. En consecuencia, esto provoca afectaciones directas a la actividad peatonal y a la salud, disminuyendo la productividad, la competitividad y la calidad de vida; repercutiendo directamente al enfriamiento evaporativo que naturalmente produce el ser humano (Organización Mundial de la Salud, 2018). Aunado a los problemas sociales que se originan como, por ejemplo: un incremento significativo en la inseguridad, la delincuencia y el vandalismo que se genera por la falta de ocupación de los espacios públicos urbanos.

Así pues, es fundamental realizar investigaciones considerando al viento como un elemento importante, del cual es necesario aprovechar sus cualidades planteando directrices a nivel normativo de diseño urbano, considerando las variables de orientación, dirección y velocidad del viento para aprovechar las corrientes dominantes de aire que posee el área geográfica del territorio. Cabe mencionar, que la particularidad del viento y su direccionalidad permite acotar las variables y sintetizar su complejidad a la hora de analizarlo (C. Bustamante, 2015).

⁶Se conoce por indicar el porcentaje de tiempo en el que individuo se puede mantener en condiciones críticas, tolerantes o de confort en función de las propiedades que presentan los materiales, la configuración espacial y las condiciones del microclima que se percibe en el espacio público (Cabezas, 2013).

Por tal motivo se plantea la siguiente pregunta de investigación;

1.1.1. Pregunta de Investigación

¿Cómo se comporta el viento en la Morfología Urbana del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal?

1.2.Hipótesis

La orientación de la traza urbana presente en las secciones viales del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal en conjunto con la disposición y forma de los edificios, modifica la dirección y velocidad del viento disminuyendo su aceleración.

1.3.Justificación

Un estudio sobre el comportamiento del viento con relación a la morfología urbana tiene un valor significativo, ya que, en conjunto con el sol, son los dos factores más relevantes del urbanismo bioclimático. De la misma forma, el viento es parte de los elementos que determinan la habitabilidad de un lugar, permitiendo una sana adaptabilidad al entorno urbano. Las motivaciones que complementan el estudio del comportamiento del viento en la Morfología Urbana del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal, es la generación de directrices de diseño urbano para corregir el aprovechamiento del viento en ciudades con características tropicales, mejorando la calidad de vida del individuo y contribuir con los planes de desarrollo en el ámbito urbano-ambiental. Asimismo, el estudio aporta información acerca del clima y el comportamiento del viento, que desde un aspecto urbano se ha establecido que el viento es uno de los elementos menos estudiados debido a su complejidad y comportamiento, ya que este es difícil de medir y predecir (Higueras & Bustamante, 2013).

Agregado a lo anterior, la traza urbana y la orientación de los volúmenes edificados se deben proyectar de acuerdo con su zona climática. Los ejes viales se deben trazar de acuerdo con el

curso del viento, generando así el efecto Venturi. De ser así, el aire al circular por la misma dirección del cañón de encauzamiento provocaría un efecto de aceleración, incrementando la intensidad del viento (C. Bustamante *et al.*, 2014; C. A. S. Bustamante, 2020; Guzmán & Ochoa, 2014; Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos [ONU-HABITAT], 2014).

Si bien es cierto, el confort térmico tiene un efecto sustancial en satisfacer mentalmente al usuario, también permite que los individuos les den un uso adecuado a los espacios exteriores de una ciudad. Cordero (2014) considera que los espacios exteriores que presentan condiciones desfavorables para la salud del habitante; no podrán dar respuesta a un escenario de vida pública en la ciudad.

El presente trabajo tiene la finalidad de coadyuvar con los diferentes planes de desarrollo a nivel Latinoamérica, nacional y local que contribuyan a una perspectiva sustentable para mejorar la calidad de vida de los habitantes y es así como se inserta en el apartado 13 de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2019); “Acción por el Clima”; que tiene como objetivo; adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. A nivel nacional, se consideran dos de los diez aspectos del “Programa de Ciudades Sustentables” realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2018), incluyendo el aire y la habitabilidad. De igual forma, se toma en cuenta el Manual de Calles (2019), elaborado por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), el cual permitió contextualizar las principales características de la traza urbana del sitio a estudiar y atribuir mejoras en aspectos de bienestar del habitante en el entorno e imagen urbana de la ciudad desde una perspectiva sustentable.

A nivel local se pretende colaborar con el Plan de Desarrollo Urbano de Othón P. Blanco [PDU] (2021), implementando directrices medioambientales que regulen la habitabilidad térmica exterior del Centro Urbano de Chetumal como en las demás áreas urbanas de la ciudad, aportando información importante a las Estrategias para el Centro Urbano de esta ciudad presentes en el PDU (2021), ya que considera siete aspectos de índole: turística, cultural, educativa, comercial, recreativa, gobierno y habitacional, pero no se considera alguno a nivel ambiental. Se beneficia a la mayor parte de la población de Chetumal, equivalente a un aproximado de 169, 028 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020), y de esta forma aportar conocimientos sustentables a los planes de desarrollo en aspectos urbano-ambientales, implementando lineamientos para el centro urbano de Chetumal y mejorar la calidad del medio físico natural.

Del mismo modo, el estudio tiene la finalidad de aportar información significativa al Reglamento de Imagen Urbana del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal (2016) y proponer directrices de diseño dentro del Catálogo de Anexos del mismo, donde se presentan los criterios de dimensiones, diseño de vialidades, alturas de edificios y paleta vegetal que deben ser utilizados.

Es así como se determina la importancia de llevar a cabo investigaciones considerando al viento como una de las principales variables al concebir una ciudad, permitiendo generar directrices de diseño urbano que servirán para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, aprovechando los espacios urbanos dándoles un uso adecuado. Incluso dichas directrices podrán ser replicadas en ciudades tropicales con características similares a las de Chetumal.

1.4.Objetivo General

Analizar el comportamiento del viento en la morfología urbana del centro histórico de la ciudad de Chetumal, a través de la simulación de Dinámicas de Fluidos Computacional [CFD].

1.4.1. Objetivos Específicos

- Analizar las características viales del Centro Histórico de Chetumal en base al Manual de Calles: Diseño Vial para Ciudades Mexicanas.
- Analizar la velocidad y dirección del viento en la Morfología Urbana a través de Dinámicas de Fluidos Computacional [CFD].
- Comparar la relación que existe entre la Morfología Urbana y la velocidad del Viento, considerando la relación de aspectos, la disposición y forma de los edificios.
- Proponer directrices de diseño y orientación del espacio Urbano en ciudades con características morfológicas similares a Chetumal.

Capítulo 2. Revisión de Literatura

2.1. Estado del Arte

El viento como elemento sustancial del diseño urbano, tiene origen en la observación de los fenómenos climáticos y la manera en cómo estos incurren dentro de las ciudades. Por lo que, al estudiar el viento se deben considerar los factores climáticos que se relacionan con el sol, la temperatura, la humedad y la precipitación. Estas variables climáticas funcionan de manera íntegra y varían de acuerdo a la región, relieves, altitud y vegetación (Bustamante Oleart, 2020).

El presente apartado expone una serie de trabajos e investigaciones en el campo de estudio internacional para conocer el comportamiento del viento en el espacio urbano. Igualmente, se delimitan los conceptos relacionados a la Morfología urbana y el Viento, tal como: la Traza Urbana, la Disposición y Forma de los Edificios, el Efecto Venturi y la Velocidad.

Vitruvio inicialmente demostró en sus libros de arquitectura un interés y preocupación por el viento como un elemento esencial en el planteamiento de una ciudad. Sin embargo, esta ideología no fue considerada en tiempos posteriores, dado que la mayor parte de las ciudades fueron edificadas con un evidente desprecio por la acción del viento (de Terán, 1963, p. 39).

Un claro ejemplo de esto, son los resultados obtenidos por Helmut Landsberg⁷ en 1947, demostrando los efectos adversos del diseño urbano. Landsberg comparó la configuración desértica de los nuevos barrios residenciales norteamericanos con las características topográficas, el viento y la orientación solar en la planificación de Stalingrado, concluyendo, que:

“Una de las maneras más seguras de mejorar el desempeño del individuo en edificios y ciudades enteras sería incorporar conocimientos microclimáticos en su diseño (...) Los edificios deben mezclarse armoniosamente con el paisaje visible, pero también deben reconocer la

⁷Landsberg H E (1947) Microclimatology Architectural Forum 86, 3, 114-9 (M Hebbert & MacKillop, 2011).

importancia de lo invisible en la configuración de su microclima” (Bustamante Oleart, 2020; M Hebbert & MacKillop, 2011).

Posteriormente, en la segunda mitad del siglo XX, los científicos que investigan el estrato de aire directamente afectado por la superficie de la tierra manifestaron variaciones en la temperatura, las precipitaciones, la humedad y el movimiento del aire en el microclima de zonas edificadas. Sin embargo, dichas variaciones se manifiestan en la capa atmosférica donde el usuario interactúa. Incluso, la zona tiene una consecuencia inmediata para la salud y bienestar humano (C. Bustamante, 2015).

Cabe mencionar que los estudios del clima y su relación con la ciudad han tomado relevancia debido a que los investigadores han sabido integrar distintos saberes que provienen desde sus distintas disciplinas. Igualmente es posible entender individualmente cómo los conocimientos sobre el comportamiento del viento inciden en la comprensión de los fenómenos que se manifiestan en la ciudad a distintas escalas. Agregado a lo anterior, las primeras disciplinas en relacionarse al estudio de los fenómenos meteorológicos y climáticos son el urbanismo y el diseño de las ciudades. No obstante, la historia del diseño urbano y de la climatología son campos que se desarrollan a la par y a pesar de compartir antecedentes históricos, fueron conectadas a mediados del siglo XX debido a la relevancia que tuvo en el último siglo el cambio climático (C. Bustamante, 2015; Michael Hebbert & Jankovic, 2011).

En los años ochenta se realizaron mediciones considerando la velocidad del viento y se presentaron algoritmos en relación a las condiciones de temperatura con respecto al viento en cañones urbanos⁸ (DePaul & Sheih, 1986; Nakamura & Oke, 1988).

⁸Al espacio entre edificios que se ordenan continuamente a lo largo de una vialidad; se conoce como cañón urbano. Sin embargo, el término se utiliza de manera más amplia, categorizando los detalles geométricos del cañón, considerando una relación de aspectos; la altura del cañón [H] y el ancho del cañón [W] (Nicholson, 1975).

En los años noventa, los efectos que modifican la superficie urbana ya se encontraban documentados, pero seguía habiendo la necesidad de propuestas rentables que puedan ser aplicadas al diseño urbano con relación a los fenómenos que modifican el confort térmico en el espacio público. A principios del siglo XXI se determina que el viento es un elemento benéfico en las zonas urbanas. Sin embargo, existen pocas referencias que demuestran sus efectos destructivos en las ciudades, a partir de su morfología (Coca Rodríguez, 2009).

De la misma forma, se debe considerar que a medida que el tiempo avanza se han desarrollado instrumentos auxiliares que facilitan la comprensión del comportamiento del aire en entornos arquitectónicos y urbanos, como es el caso del Túnel de viento⁹, el cual permite entender lo que ocurre en estos espacios en términos de ventilación, tomando en cuenta también la importancia de este cuando se pretende trabajar considerando el confort ambiental y térmico de los individuos en los diferentes entornos. Del mismo modo, la evaluación de las distintas formas de establecerse en los lotes y otros espacios urbanos demuestra y auxilia la identificación de zonas donde hay poca ventilación natural, incluso, esta acción puede dar seguimiento a estudios relacionados con la radiación solar, permitiendo evaluar la probabilidad de formación de islas de calor. Es así como el túnel de viento es una herramienta esencial para el uso inteligente de la ventilación en edificaciones y espacios urbanos (da Silva *et al.*, 2012).

Por otra parte, Bustamante *et al.* (2013), expone que las ciudades que son persistentes en sus variaciones de viento en relación a la fuerza, dirección y velocidad dentro de un cañón urbano hacen del viento un campo de estudio complejo. No obstante, esto permite proponer estrategias meteorológicas multidimensionales que permitan el buen funcionamiento del viento en entornos urbanos.

⁹Herramienta proyectual fundamental para el uso inteligente del viento en edificaciones y espacios urbanos, considerando al confort ambiental como uno de sus principales objetivos (da Silva *et al.*, 2012).

Dicha investigación se realizó en Punta Arenas, donde el viento viene en un 90% de la misma dirección con velocidades que oscilan entre los 128 km/h. Cabe mencionar que el comportamiento direccional del viento permite ubicar los fenómenos aerodinámicos, como es el caso de los perfiles de viento, influencias por la rugosidad urbana, aunado al comportamiento aerodinámico de fluidos estratificados sobre el volumen edificado a nivel morfológico, provocando un patrón regular entre sólidos y fluidos. Finalmente, los fuertes vientos en ciudades con climas fríos influyen en el uso de los espacios públicos, que al no estar correctamente diseñados no desarrollan niveles adecuados de confort térmico.

Bustamante *et al.* (2014), tienen el objetivo de conocer los principios del Urbanismo Aerodinámico¹⁰ y su relación entre la morfología urbana, su entorno geo-climático y el diseño del espacio público. Se identifican las dificultades y condicionantes al momento de ejecutar una intervención en el espacio urbano en una ciudad con clima extremo. Se concluye que la presencia y acción del viento se ve reflejada por la forma de su vegetación y ciertamente en su habitar. Además de que su localización territorial permite que el viento descienda por el trazado urbano generando corredores de viento y exista una sobre ventilación en la ciudad. Así pues, el viento en espacios exteriores es uno de los elementos más difíciles de manipular y controlar, ya que se ve influenciado por factores globales, regionales y locales debido a que adquieren una velocidad y dirección que se generan de manera natural por el clima, sin embargo, este es influenciado también por la tipología del paisaje regional y local. Cabe mencionar que la conglomeración edificada de cada ciudad condiciona las características del viento, haciendo imposible establecer generalizaciones de comportamiento.

¹⁰Surge de la conjunción de tres campos de avances; la urbana, la geográfica y climatológica y finalmente la ingeniería. El vínculo de estos saberes es fundamental. De allí el nombre “Urbanismo Aerodinámico” (Higueras, 2013).

En cambio para Cordero (2014), la ciudad es una manifestación radical del paisaje natural, ya que esta cambia la morfología del terreno y es constituida por edificios, calles y superficies pavimentadas. Además, crea condiciones medioambientales concretas, conocidas como microclima urbano. Su investigación se centra en un estudio empírico en los barrios del Raval y Gracia en Barcelona. El objetivo del estudio es analizar el impacto de las variables morfológicas que conforman el cañón urbano en la generación de microclimas, con la finalidad de determinar cuáles son las geometrías desfavorables desde la perspectiva del confort térmico urbano.

La combinación de estos factores tiene un significado en la creación de microclimas que pueden postergarse, incluso a distancias cortas. Es importante resaltar que un cañón urbano se compone por los aspectos de altura de edificios (h) y la distancia que los separa (w), incluyendo orientaciones y el factor de cielo visible (SFV). Considerándose como las variables clave en la alteración del microclima urbano. Por otro lado, dichos parámetros repercuten directamente en la absorción y emisión de radiación solar y térmica de las superficies, así como la dirección y velocidad del viento. Tanto es así que, el impacto en las variables climáticas tiene un valor significativo, los cuales contribuyen en el balance energético del ambiente y del cuerpo humano, lo que influye directamente en la sensación térmica de los usuarios.

Agregado a lo anterior, se considera que estudiar el viento implica costos elevados, ya sea por el trabajo de campo y la instalación de estaciones meteorológicas, como también en el desarrollo de experimentos con túnel de viento. Incluso, se cuestiona los métodos para medir el viento, su interpretación de datos y la representación en simuladores o en modelación 3D. Por tal motivo todos estos factores han provocado que exista una insuficiente bibliografía en materia del comportamiento del viento desde una perspectiva urbanística. Cabe mencionar que las investigaciones existentes se presentan más en artículos y actas de congresos que en los propios

libros, aunado a que este material es abordado desde las disciplinas como: la climatología o la ingeniería y la aerodinámica civil de cuerpos romos. Así como que el material posee un alto porcentaje de inglés. Pero también se pueden identificar situaciones particulares del reconocimiento de alguna ciudad como caso de estudio, que permita disminuir las dificultades expuestas (Oleart, 2015, p. 26).

No obstante, Bustamante (2015) estudia el comportamiento y fluidez del viento al viajar entre los edificios y la trama urbana, así como sus efectos en la ciudad. Igualmente se examinan metodologías ya existentes para entender, medir y analizar la proporción y modelación a través de túnel de viento, como también el empleo de la dinámica de fluidos (CFD). El caso de estudio permite analizar el viento como un factor aislado. Punta Arenas, ciudad que posee parámetros morfológicos aerodinámicos característicos, se considera como la ciudad más austral del mundo con vientos que corren desde la misma dirección (oeste) con un rango de 33.3 m/s, lo que equivale a 120 Km/h.

La hipótesis plantea que la morfología del casco histórico de Punta Arenas genera patrones aerodinámicos que condicionan el bienestar en el espacio público. Tiene como objetivo general, estudiar los efectos aerodinámicos presentes en la morfología urbana para mejorar la permanencia en los espacios públicos, proponiendo estrategias para el desarrollo morfológico y volumétrico de los cuerpos edificados.

Por un lado, el estudio reconoce que, al interior del cañón urbano, las temperaturas, los índices de asoleamiento y sus conos de sombra, la dirección del viento y la visualización del vórtice al interior del cañón impactan en el espacio público. Las conclusiones señalan que los patrones aerodinámicos conducen el viento hacia los espacios públicos que se encuentran desprotegidos del viento o con excesivas turbulencias. Por lo tanto, el patrón aerodinámico

presente en la morfología urbana incide en el uso estancial de los espacios públicos, generando problemas de mecanismo peatonal e incide en la sensación térmica de dicho espacio. Finalmente, el estudio permite confirmar la posibilidad de modificar, modelar y mejorar el uso del espacio público, reorientando los patrones aerodinámicos.

Se concluye que el uso de espacios públicos no diseñados bajo condiciones definidas provoca que estos no se utilicen, generando poca actividad y en definitiva su abandono social.

Con respecto al viento, la ventilación urbana exterior es importante para un entorno urbano sano y habitable. Ya que se encuentra influenciado directamente con la velocidad y la dirección del viento. Pero, al mismo tiempo estos factores se ven perjudicados por la morfología urbana. Por tal razón, Ramponi *et al.* (2015), proporcionan una revisión detallada de literatura del estudio de las dinámicas de flujo computacional (CFD) de ventilación exterior para configuraciones urbanas genéricas, donde no todas las calles paralelas poseen un ancho igual. El estudio expone simulaciones de CFD de ventilación exterior para vialidades paralelas con dimensiones distintas. Se analiza la influencia de una vialidad central principal más ancha en relación con el patrón de velocidad del viento y en la medida local afectiva de aire del área circundante en diferentes direcciones.

De acuerdo con las ecuaciones 3D RANS¹¹ éstas permanecen estables con el modelo estándar $k - \epsilon$ ¹². De la misma forma las ecuaciones passive scalar transport se utilizan para calcular la medida local efectiva del aire a nivel peatonal como indicador de eficiencia en la

¹¹Reynolds-averaged Navier–Stokes por sus siglas en inglés (RANS). Se obtienen por medio del resultado de las ecuaciones de Navier – Stokes a una escala mayor que el de la turbulencia (Pedrozo & Torres, 2011; Richmond, 2019).

¹²Modelo semi - empírico que se basa en ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y para la disipación de la energía cinética turbulenta (ϵ) (Rodríguez Muñoz, 2009, p. 21).

eliminación de contaminantes. Es importante destacar que el estudio se basa en un análisis de convergencia de red y validación de datos empleando un túnel de viento.

Finalmente, la presencia del viento en la calle principal mejora la eficacia de la ventilación en las direcciones oblicuas o perpendiculares, ya que la vialidad principal actúa como un ducto de aire limpio, sin embargo, este fenómeno no ocurre en direcciones paralelas al viento.

A propósito de los componentes de la morfología urbana, el cañón urbano es un medio significativo para comprender el flujo atmosférico local y la variedad de procesos relacionados con el medio construido. De modo que, estudios previos han centrado sus objetivos en relación con la dirección del viento perpendicular a lo largo del cañón, ya que, coexisten fenómenos que se consideran dañinos para el peatón, como por ejemplo el estancamiento del viento y la acumulación de contaminantes. Si bien, las simulaciones CFD son empleadas para investigar el desarrollo atmosférico en los cañones, la adaptación computacional es un factor valioso que repercute en la credulidad predictiva. Por tal motivo, Ai & Mak (2017), exponen una investigación basándose en datos recopilados de experimentos realizados con túneles de prueba hidráulica para cañones relacionando los aspectos de altura y ancho (H/W). El estudio evalúa la influencia de tres configuraciones computacionales CFD del flujo isotérmico dentro del cañón. Así pues, los flujos dentro del cañón no se pueden intuir comprensiblemente usando un cañón aislado incorporado metodológicamente en un software especializado. Pero, si se utiliza un medio computacional en forma de T con flujo ascendente, donde el cañón se conecte por una capa de flujo libre en la parte superior de este, entonces se puede predecir de manera adecuada. Incluso es razonable utilizar entradas uniformes para representar la capa libre sobre los cañones viales.

Por el contrario, Liu *et al.* (2017), afirma que la ventilación urbana juega un papel relevante a la hora de regular el clima y la calidad de aire de una ciudad. Por tal motivo, tiene la finalidad de realizar un estudio numérico para examinar la efectividad de la ventilación en el microclima y la eliminación de contaminantes en los cañones urbanos en la región de Southern New Town en Nanjing, China.

Dicha investigación utilizó el modelo de turbulencia RNG¹³ $k - \epsilon$, específicamente en la dinámica de fluidos computacional (CFD), bajo la dirección paralela y perpendicular al viento. Es así como dicho experimento proporciona la velocidad dentro del cañón y la temperatura en las envolventes de los edificios. Igualmente, se definió un coeficiente de presión, aplicando tres métodos para evaluar la efectividad de la ventilación urbana.

Se expone que bajo dos patrones de ventilación del cañón había poca diferencia de confort en el cuerpo humano. En cuanto al estancamiento de aire, éste se produjo por la densa presencia de cuerpos edificados, especialmente en dirección perpendicular al viento. También los grandes coeficientes de presión se hicieron presentes en la región del Barlovento, lo que contribuye a una adecuada ventilación. Se encontró que el aire renovado se dispersaba donde la ventilación es favorable y la velocidad del viento incrementaba. Incluso los resultados pueden ser útiles en la renovación de la ciudad para la construcción y diseño de los cañones urbanos y la planificación urbana.

Por otra parte, Becerra (2017) pretende dar una visión cualitativa y cuantitativa de los efectos del viento en edificaciones de diferentes tipologías. Los fenómenos son estudiados desde el punto de vista normativo, los cuales son comparados con los estudios de túnel de viento

¹³Del inglés Re-Normalisation Group. Se trata de las ecuaciones de Navier Stokes que toman en cuenta los efectos de las escalas más pequeñas de movimiento. Se determina que RNG en el modelo estándar de viscosidad como la única escala de longitud (Richmond, 2019).

realizados a tales edificaciones, permitiendo mostrar en qué medida y como actúa el viento. Cabe subrayar que los estudios de túnel de viento en relación con las edificaciones se encuentran fuera de lo convencional. Así mismo, para el trabajo se emplea la herramienta Flow Design¹⁴ como una alternativa real.

Los resultados ofrecen dos perspectivas de investigación con relación al empleo del software especializado Flow Design: en primer lugar, aumenta y completa el estudio realizado, además de incluir nuevos casos de estudio, con los que se pueden realizar comparación de resultados del Flow Design, ensayos de túnel de viento real y el cálculo normativo del CTE¹⁵ y Euro-código¹⁶, tal como se realizó en la investigación. Y, en segundo lugar, es el de realizar la misma investigación, pero con una herramienta diferente al Flow Design, de este modo habría otra línea con la que se podría comparar los resultados del Software empleado.

En cuanto a la expansión urbana, Guo et al. (2017), mencionan que la ciudad de Dalian en China posee una alta densidad, lo que ocasiona que el patrón céntrico morfológico se vea afectado, provocando que la velocidad del viento tienda a disminuir. Por lo tanto, mejorar el rendimiento del viento urbano es fundamental para la planificación urbana.

Por otra parte, la evaluación del rendimiento de la ventilación natural del centro de Dalian, se realizó un estudio del viento *In Situ*. Cabe señalar que la utilidad de la ventilación natural en las diferentes alturas edificadas se evaluó más a fondo mediante herramientas de simulación CFD PHOENICS 2012.

¹⁴Software fabricado por Autodesk® especializado en simulación de túnel de viento virtual. Permite simular las características del flujo de aire en edificios, vehículos, bienes de consumo entre otros objetos. Sin embargo, desde 2018 el software ya no está disponible para su compra (Autodesk®, n.d.).

¹⁵Código Técnico de la Edificación. Es el marco normativo que determina las exigencias que deben cumplir las edificaciones de acuerdo con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad en España (Código Técnico de la Edificación, n.d.).

¹⁶Son un conjunto de normas europeas de carácter voluntario que proporcionan una serie de métodos comunes para el cálculo de resistencia mecánica de los elementos estructurales en obras de construcción. La Comisión Europea se la encarga al Comité Europeo de Normalización (CEN) (Máster en Ingeniería sísmica, 2019).

Estos resultados indican que los edificios urbanos, como las manzanas cerradas, los apartamentos en hileras, los edificios de gran altura con gran volumen son desfavorables para la circulación del viento urbano. El aplicar estrategias como el uso de canales ventilados y el aumento de altura en edificios reduciendo la cobertura del suelo podrían mejorar el rendimiento de la ventilación urbana.

Por otro lado, Roxon *et al* (2018), mencionan que las simulación CFD a pesar de ser muy precisas estas requieren tiempo y datos a escala “prohibitivamente intensos”, lo que provoca que las simulaciones CFD en relación a los fenómenos meteorológicos extremos a nivel ciudad no funcionen. A pesar de esto, las simulaciones CFD siguen siendo un instrumento sustancial para comprender la acción del viento a nivel urbano. Asimismo, los autores mencionan que en su modelo de textura urbana¹⁷ existen determinadas variables en la configuración de las ciudades que permiten con una “relativa precisión” evaluar los coeficientes de arrastre y determinar las zonas vulnerables y de riesgo ante los fenómenos meteorológicos, para luego realizar una simulación CFD para establecer donde ocurrirán los daños, esto permitirá hacer ciudades más resilientes.

Por lo que concierne al rápido crecimiento de las ciudades, He *et al.* (2019), indican que el desarrollo urbano en curso, ocasiona que las urbes experimenten una variedad de climas significativos en comparación de las áreas rurales o suburbanas. La modificación que sufren las superficies urbanas queda como una evidencia y explicación de las variaciones en el clima de una ciudad. Afirmando así el significado del estudio de la morfología urbana y la gestión del clima urbano. La morfología urbana que se centra en la homogeneidad de la forma de la ciudad es siempre muy complicada, por lo que es fundamental describir y diferenciar las interacciones

¹⁷Se refiere a la configuración local de los edificios adyacentes (Roxon *et al.*, 2018)

entre la morfología y las condiciones climáticas. Es así, como la investigación tiene como objetivo orientar la planificación basada en el rendimiento de la ventilación, además de caracterizar las estructuras de la superficie urbana para estudios sistemáticos del rendimiento de la ventilación local. Utilizando un método pluridisciplinario, el trabajo desarrolló el protocolo para la caracterización de la ventilación del recinto, derivándose de acuerdo con la compacidad + altura de edificios + estructura de la calle. Presentando así 20 zonas distintas de ventilación en Sydney, Australia.

El sistema de clasificación proporciona a los investigadores, ingenieros, diseñadores y planificadores una comprensión intuitiva del rendimiento de la ventilación urbana, para regular la planificación urbana con la inclusión del viento.

Cabe mencionar que entender los perfiles del viento en un cañón urbano significa lidiar las turbulencias de la corriente y la presencia del intercambio de flujos de la atmósfera dentro del dosel urbano¹⁸ (Mauree *et al*, 2019).

A propósito de los estudios acerca del viento en Regiones Tropicales, Carrillo *et al*. (2009), analizaron las características hidrometeorológicas y batimétricas de la bahía de Chetumal donde establecen que la velocidad del viento máxima es de 7.6 m/s. No obstante, también determinan que la rapidez del viento puede alcanzar una máxima hasta de 28 m/s con dirección este-noreste. Asimismo, mencionan que Gallegos & Czitrom (1997) y Mooers y Maul (1998), establecen que los vientos de la región son alisios y durante el año predominan perturbaciones de escala sinóptica. Cabe mencionar que entre octubre y enero se perciben vientos del Norte y una asiduidad entre noviembre y diciembre, ya que, en invierno el Caribe se ve influenciado bajo los

¹⁸Es la capa de aire de la ciudad, que se encuentra más cercana a la superficie. Se extiende principalmente hasta la altura media de las edificaciones (Zepeda Garrido, 2015).

vientos del norte (Frentes Fríos) conocidos principalmente como “Nortes” (Mooers & Maul, 1998).

Por el contrario, Cámara *et al.* (2020), determinan que la velocidad y dirección del viento se estima en los 6.5 m/s hacia el sureste con respecto a la bahía de Chetumal considerando una altura de 50 metros. Dichos datos se obtuvieron entre el 2006 – 2010 utilizando la estación meteorológica NRG como también se emplearon anemómetros, paletas de direccionamiento de viento y sensores de temperatura. Los resultados de la investigación fueron precisos con lo establecido en el Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias de la secretaria de Energía. De la misma forma, se determinó que la bahía de Chetumal se valora como una zona de bajo viento o clase III en base a lo establecido con The International Electrotechnical Commission (IEC).

Ahora bien, para Gülten & Öztop (2020), la morfología interna y el contexto urbano de las ciudades son los principales factores que afectan la ventilación natural de un distrito urbano. La velocidad del viento se convirtió en un parámetro notable para evaluar la eficiencia de la ventilación natural de un área urbana. El trabajo se centra en la comparación de cuatro densas configuraciones ubicadas en Elazığ, ciudad situada en el lado este de Turquía.

Se clasificaron las configuraciones urbanas de acuerdo con el diseño genérico de antigüedad en áreas residenciales; A, B, C y D. La configuración A y B posee en un diseño de planta cuadrada, mientras C, su diseño consiste en planos de edificios rectangulares altos y D, presenta un diseño con patio en el centro de los bloques residenciales, mientras que los edificios en configuraciones se encuentran separados.

Se puede concluir que el estudio se basó principalmente en la relación del flujo de viento promedio y se empleó un análisis de dinámica computacional de flujos (CFD) para evaluar las

configuraciones urbanas. También se midió la velocidad del viento, el cual ronda entre los 2, 3 y 5 m/s con 0° y 45 ° con una dirección de 90 °. La clasificación se determina de mayor a menor rendimiento de ventilación: configuración B, configuración A, configuración D y configuración C, mientras que los parámetros se pueden clasificar de mayor a menor como I) configuración urbana, II) dirección del viento y III) velocidad del viento en términos de su efecto sobre la eficiencia de la ventilación.

A su vez, la tendencia de aplicar estrategias asistidas por computadora que permitan implementar condiciones ambientales al proceso de diseño puede contribuir a establecer soluciones arquitectónicas y urbanas sostenibles. Por tal motivo Kabošová *et al.* (2020), tienen la finalidad de mostrar que el medio construido puede diseñarse para mejorar el microclima eólico local, afrontando los efectos negativos del viento y establecer soluciones para transformarlas en ventajas. El estudio emplea un enfoque iterativo¹⁹ a través del diseño (RTD)²⁰ y la optimización de volúmenes orientados en dirección al viento impulsado por datos.

Los resultados de la investigación demuestran que el diseño digital basado en el viento permite a los arquitectos estimar la influencia del viento en el diseño en la fase conceptual. Asimismo, las herramientas CFD basadas en el viento pueden convertirse en parte de la rutina del diseño arquitectónico y urbano. La arquitectura puede a través de la forma, la proporción y la configuración urbana, aprovechar las ventajas del flujo del viento. Sin embargo, los límites que presentan las herramientas CFD, no consideran las propiedades del material. Así pues, el método solo se centra en un parámetro meteorológico que influye en el edificio. No obstante, se proponen investigaciones que tengan como objetivo combinar varios parámetros, como la

¹⁹Dicho de un procedimiento o de un método: Que llega a un resultado mediante aproximaciones sucesivas (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, 2020).

²⁰Por sus siglas en inglés Resistance Temperature Detector. Es un dispositivo para realizar mediciones de temperatura en una gran variedad de aplicaciones industriales (PR Electronics, n.d.).

radiación solar o el confort térmico alrededor de los edificios, esto llevaría a una optimización de la forma de los diseños arquitectónico o urbanos con varios criterios.

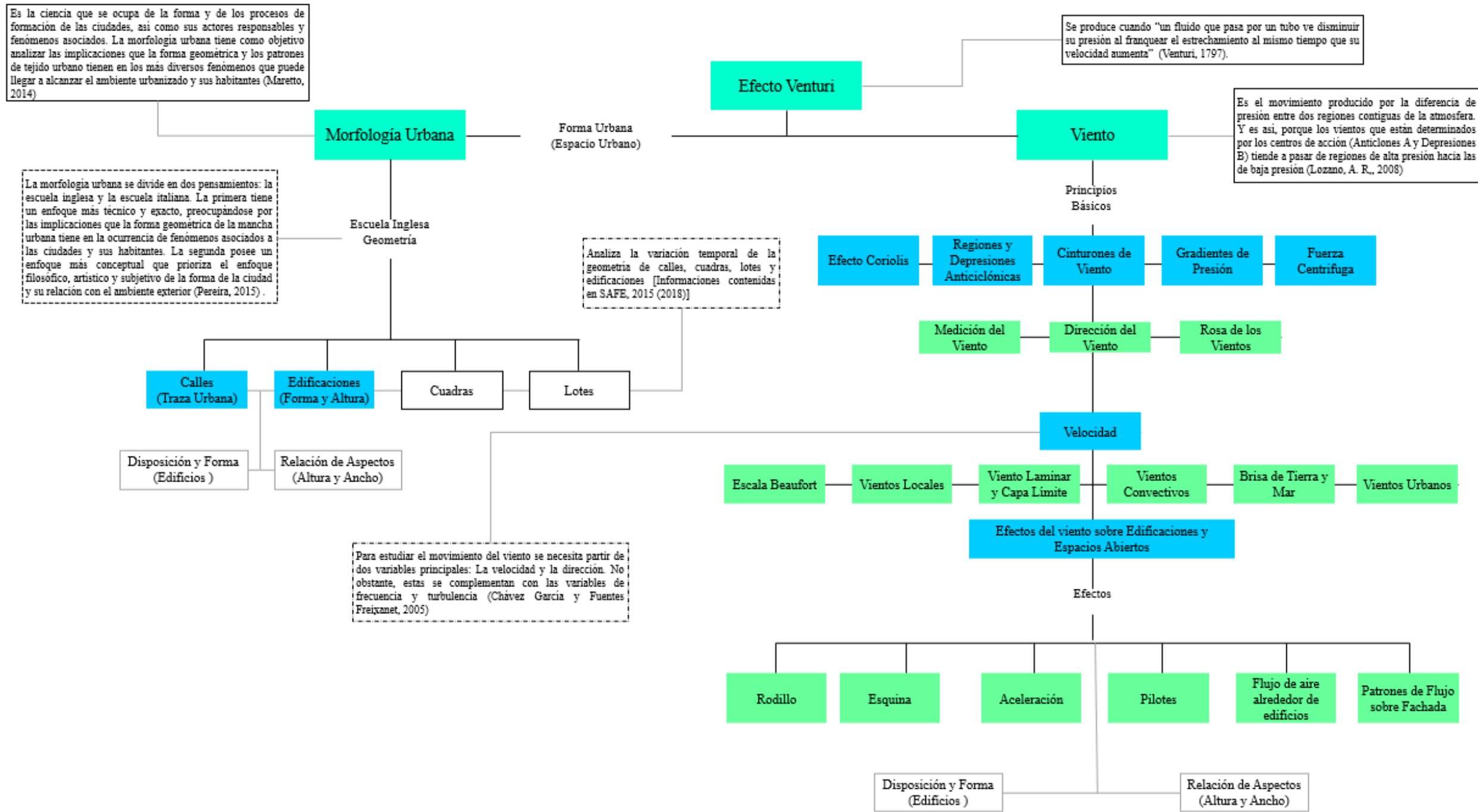
En definitiva, los estudios demuestran el proceso de utilidad del viento en la ciudad, ya que en un principio se consideró como un problema que se albergaba en las grandes ciudades, y se indagaba en métodos para minimizar su impacto. A principios del Siglo XXI, la manera de percibir el viento urbano cambió, sobre todo para entender su comportamiento y aprovechar sus beneficios sobre la habitabilidad de los espacios urbanos. Pero, con el crecimiento desenfadado de la ciudad se empezaron a originar fenómenos que repercutían directamente en la estabilidad del peatón, como, por ejemplo: las islas de calor, los microclimas, la disminución de la velocidad del viento, así como también el incremento de turbulencias, principalmente en los cañones urbanos que forman parte de la morfología urbana de una ciudad. Dichos fenómenos, se deben a la mala distribución de cuerpos edificados en la ciudad. Además de la concepción errónea de la geometría urbana, así como la devastación y sustitución de áreas naturales, por superficies secas y artificiales.

Esto no ha sido impedimento para estudiar el viento desde diferentes campos de estudio principalmente; el urbanismo, la climatología y la geografía y finalmente la ingeniería, aunque los estudios también demuestran que no ha habido mucha intervención por parte del urbanismo. Asimismo, se expone que la mayor parte de los estudios e intervenciones realizadas para comprender el viento urbano han sido de países asiático, europeos. Donde han implementado nuevas metodologías para estudiar el comportamiento del viento, ya sea por monitoreo en campo, o con experimentos en túneles de viento, así como el empleo de software especializado CFD.

2.2. Marco Conceptual

Figura 1

Esquema Conceptual Urbanismo Aerodinámico



Nota: La figura muestra la distribución y lógica de los conceptos a emplear en el presente estudio donde se relacionan términos de urbanos con términos aerodinámicos para comprender el comportamiento del Efecto Venturi en una ciudad. Fuente: figura de elaboración propia en base a la bibliografía consultada.

El marco conceptual (Fig. 1), expone los enfoques teóricos utilizados en estudios previos o relacionados a los conceptos que se abordan durante la investigación. Cabe mencionar que el marco conceptual no trata de recopilar un listado de conceptos y definiciones. Este por su parte debe conceptualizar y señalar lo importante de dichas investigaciones (Reidl-Martínez, 2012).

2.2.1. Morfología Urbana

La Morfología Urbana hace énfasis a la expresión cultural de una sociedad y la manifestación física en las dinámicas de la entidad, donde se permite reconocer las cualidades de una ciudad, los sectores, los lugares y su relación con el entorno natural; donde resalta la calidad del diseño urbano, además de una selección de morfologías y tipologías que contribuyen al desarrollo de sectores con una pluralidad de formas. Igualmente se genera el descubrimiento de lugares cuya especialidad con el contexto garantiza su vitalidad (Choconta, 2017).

La Morfología Urbana es la disciplina que se encarga del proceso de formación de las ciudades, involucrando a los autores y fenómenos asociados. Tiene la finalidad de analizar las diversas implicaciones que la geometría urbana, el tejido urbano y los habitantes pueden llegar a alcanzar en el ambiente urbanizado (Maretto, 2014 citado por de Oliveira Lázaro & Chuerubim, 2018).

Asimismo se define como; el estudio de producción y modificación de la forma urbana de una ciudad a través del tiempo, considerando la transformación, la interrelación de los espacios urbanos y los procesos sociales; definiendo y explicando la reciprocidad del individuo con el paisaje urbano y su estructura (Taracena, 2013).

La Morfología Urbana se divide con base en dos pensamientos; la escuela inglesa y la italiana. Donde la inglesa posee un enfoque técnico y exacto, considerando la forma geométrica de la mancha urbana y la manifestación de los fenómenos relacionados a la ciudad y su

población. La segunda tiene un enfoque más conceptual, priorizando aspectos filosóficos, artísticos y subjetivos de la forma urbana en relación con el ambiente exterior (Pereira, 2015 citado por de Oliveira Lázaro & Chuerubim, 2018).

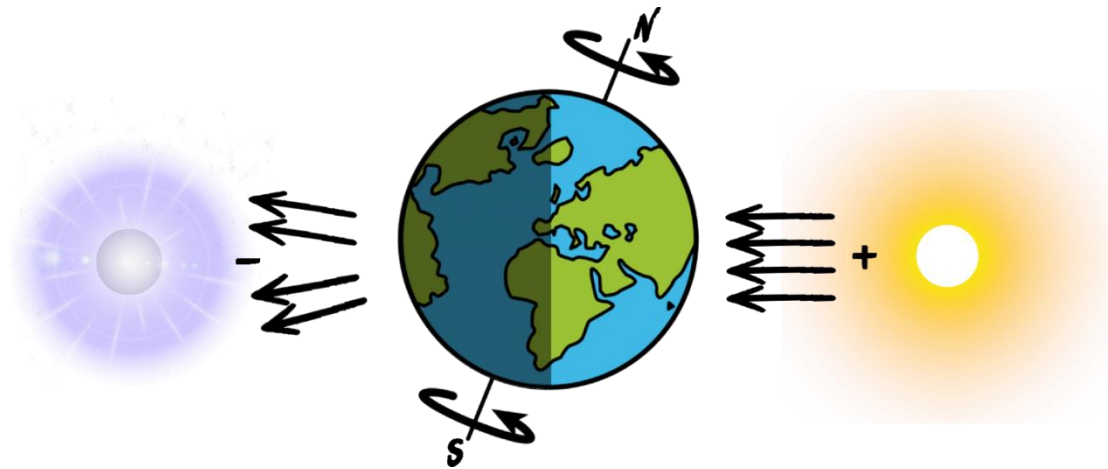
La morfología urbana posee elementos que modificando el curso y velocidad natural del viento en la ciudad. Higuera (1998), menciona que el viento al encontrarse con un obstáculo se desvía vertical u horizontalmente; esto provoca que se concentre mayor flujo del viento laminar incrementando su velocidad en la parte superior, pero en la parte inferior disminuye. Este fenómeno se puede implementar favorablemente; empleando barreras arquitectónicas o vegetales para moderar la velocidad del viento controlando sus índices de permeabilidad.

Así pues, la literatura permite entender que la Morfología Urbana es de carácter multidisciplinario y sistémico, permitiendo la intervención de diversos campos y áreas como la arquitectura, el urbanismo, la ingeniería, la geografía, antropología, sociología entre otros, puedan desarrollar investigaciones en relación con el ambiente de una ciudad. Incluso, la ciudad puede ser leída y analizada a través de su forma física, basándose en tres principios morfológicos; la forma, la resolución y el tiempo (Moudon & Oliveira, 2017; Safe, 2015).

2.2.2. *Conceptos Básicos del Viento*

2.2.2.1. Viento

Respecto al viento; se le conoce como un tipo de energía solar. “La acción del sol y el movimiento de rotación terrestre dan lugar a la presencia del viento en la tierra” (García & Fuentes, 2005, p. 15).

Figura 2.*Movimiento de Rotación Terrestre*

Nota: La figura muestra el movimiento de rotación que genera la tierra de Oeste a Este. Fuente:

Elaboración Propia.

Se define como el movimiento horizontal que genera las masas de aire en diversas proporciones de presión atmosférica, esto se debe principalmente porque los vientos establecidos por los centros de acción, anticiclones y depresiones pasan por regiones de alta presión hacia las de baja presión, la cuales son modificadas por las diferencias de temperatura en la superficie terrestre que se derivan principalmente del gradiente térmico, siendo más intensas las que provienen del ecuador que la de los Polos: “mientras una parte del globo terráqueo recibe radiación directa del sol y se calienta, la otra se enfría a causa de la radiación nocturna que sale al espacio” (García & Fuentes, 2005; Higuera, 1998; Lozano, 2008; Velasco, 2012, p. 30).

No obstante, para analizar el desplazamiento del viento es importante considerar dos variables: la velocidad y la dirección, las cuales se complementan con las variables de frecuencia y turbulencia. Sin embargo, para poder comprender el comportamiento del aire en la tierra es necesario exponer los conceptos básicos de los que el viento se compone (García & Fuentes, 2005).

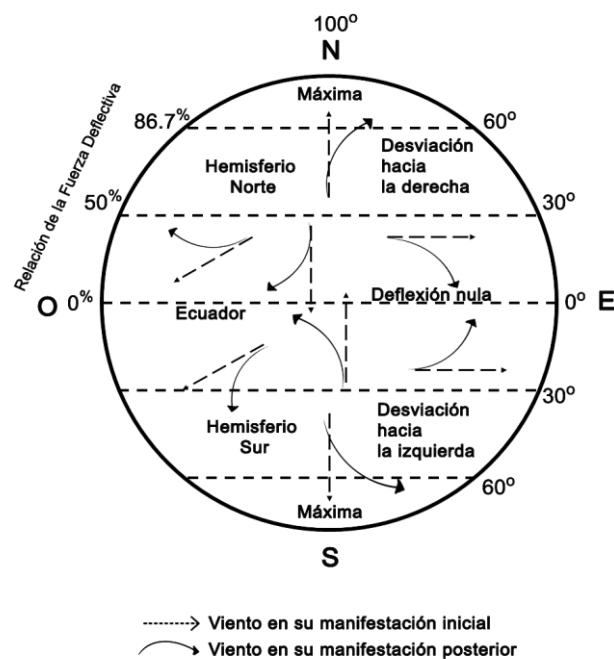
2.2.2.2.Efecto Coriolis

El Efecto Coriolis (Fig. 3), se origina a partir de la deflexión del viento que se genera por la rotación de la tierra. Velasco (2012) menciona que cualquier fluido con libre movimiento de forma horizontal hacia el hemisferio norte suele ser desviado a la derecha de su patrón de movimiento, mientras que el sur se desvía hacia la izquierda.

Agregado a lo anterior, una masa de viento ubicada en el hemisferio norte, procedente del sur que se desplaza al norte se desviará hacia la derecha transformándose en un viento del suroeste u oeste. De la misma forma, un viento que proviene del norte se convertirá en un viento noreste o este (García & Fuentes, 2005).

Figura 3

Efecto Coriolis



Nota: La figura muestra el Efecto Coriolis debido a la rotación de la tierra Fuente: figura tomada y editada del libro Arquitectura Bioclimática y Energía Solar – Viento y Arquitectura (García & Fuentes, 1985, p. 23).

2.2.2.3.Regiones y Depresiones Anticiclónicas

El desplazamiento del viento respecto al Efecto Coriolis es un proceso que se percibe bajo una variedad de patrones que dependen principalmente de la región del globo terráqueo en la que se ubique. Velasco (2012) expone que el aire al calentarse en la zona ecuatorial se vuelve más ligero y por ende asciende dirigiéndose por altura hacia los polos. Por el contrario, cuando el aire se enfría, tiende a descender hacia la superficie terrestre con dirección al ecuador, el cual es absorbido por las bajas presiones que genera esa zona donde tiende a ascender el aire caliente.

Debido a la fuerza que genera el Coriolis estos trayectos se desvían, generando los vientos alisios, los cuales al llegar a la región subtropical se convierte en vientos del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el sur. Por el contrario, en los polos el aire frío y denso, se mueve hacia la región polar a nivel de suelo hacia el ecuador. Es importante mencionar que el aire al descender de latitud, se calienta y asciende hacia la zona polar por arriba, donde es absorbido por la depresión en altitud que ocasiona el viento y de esta manera el polo se enfría, baja y termina el ciclo. “El ciclo ecuatorial abarca desde el ecuador hasta los grados 30° y 60° de latitud, ahí se origina un ciclo nuevo al tener contacto con el aire más caliente que el polar pero más frío que el subtropical” (Velasco, 2012, p. 32).

El viento proveniente de las regiones ecuatoriales se va hacia el polo para complementar el vacío que deja el aire que asciende hacia los 60° de latitud. No obstante, al desviarse por la fuerza del Coriolis obtiene una acentuada dirección al oeste en ambos hemisferios. Siendo los vientos provenientes del oeste los que predominan en la región templada generando así el cinturón del oeste (Velasco, 2012).

2.2.2.4. Patrones de Circulación Regional o Cinturones de Viento

García y Fuentes (2005) determinan que el desplazamiento de aire alrededor de la tierra genera una circulación regional o cinturones de viento, mismos que se establecen por una circulación primaria con variaciones en las presiones atmosféricas y se clasifican en:

- Calmas Ecuatoriales:
- Vientos Alisios
- Calmas Tropicales
- Predominantes del Oeste
- Zonas de Frente Polar
- Predominantes del Este Polar

La región ecuatorial donde las corrientes ascendentes del viento son cálidas y húmedas es conocida como calmas ecuatoriales. Esta es una zona de vientos ligeros y superficiales con una abundante actividad de lluvia y nubosidad. Por otra parte, la región donde la presión atmosférica incrementa es conocida como calmas tropicales. Esta zona se caracteriza por la presencia mínima de nubosidad y lluvia, además de generar corrientes débiles de aire. Esta región posee una presión alta que provoca un descenso en el viento cerca de la latitud 30° N.

Entre las regiones de calma ecuatorial y calma tropical se ubica el cinturón de vientos alisios con dirección noreste en el hemisferio norte y sureste en el sur. En cambio, el cinturón de vientos del oeste se encuentra entre las latitudes 30° y 55° N. Cabe mencionar, que más al norte aparecen los vientos polares del este. La zona de frente polar se encuentra en una región tormentosa con abundante nubosidad y precipitación, ubicándose entre los vientos dominantes del oeste y los polares del este. Es importante resaltar que la simple circulación genera áreas de alta presión alrededor del globo terráqueo en regiones ecuatoriales y de baja presión en el frente polar (Velasco, 2012).

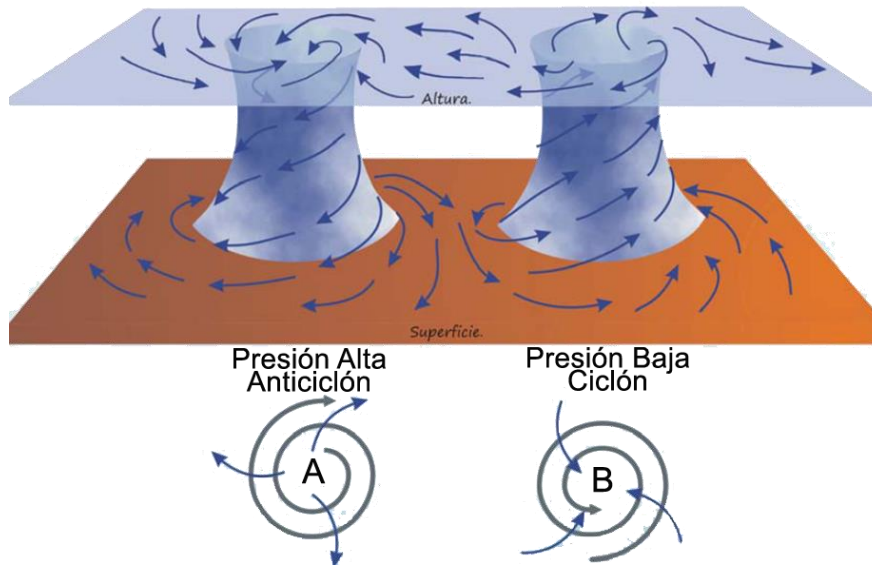
2.2.2.5. Gradientes de Presión

La presión se define como la magnitud física que se mide por unidad de superficie la fuerza en movimiento resultante por su dirección perpendicular (Velasco, 2012). García y Fuentes (2005) consideran que el viento se desplaza en respuesta a las variaciones de presión, donde la velocidad y la dirección se rigen a partir de una unión de fuerzan como, por ejemplo:

- **Fuerza Gradiente de Presión:** *Provoca que el aire cambie de una presión alta a una presión baja.*
- **Fuerza Coriolis:** *Genera una desviación hacia la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el sur debido a la rotación de la tierra.*
- **Fuerza Centrífuga:** *El aire circula en un patrón Curvo.*

2.2.2.6. Fuerza Centrífuga

La fuerza centrífuga (Fig. 4), en el hemisferio norte posee patrones de circulación en zonas de alta presión; conocidas como anticiclón, con un flujo de aire en dirección a las manecillas del reloj. Mientras que en las regiones de baja presión conocidas como ciclón; lo hagan en sentido inverso. Esto provoca que el aire pase de regiones con alta presión a zonas de baja presión, desplazándose en forma curva (García & Fuentes, 2005).

Figura 4*Fuerza Centrifuga*

Nota: La figura expone el fenómeno que provoca la fuerza centrífuga en regiones de presión alta (anticiclón) y regiones de presión baja (ciclón). Fuente: figura tomada y editada de Pardo (2018)

2.2.2.7. Medición del Viento

En cuanto a las mediciones del viento; se deben considerar las siguientes características:

- Dirección
- Velocidad
- Frecuencia
- Turbulencia y Ráfaga

Hay que destacar, que “la dirección, la velocidad y la frecuencia son usualmente medidas expresadas cuantitativamente, mientras que la turbulencia se expresa en términos cualitativos o relativos” (García & Fuentes, 2005, p. 21).

2.2.2.8. Dirección del Viento

Simultáneamente, la dirección del viento indica de dónde viene, más no, hacia dónde se dirige; solo define su origen. Velasco (2012), menciona que la dirección del viento se mide a

través de veletas o anemoscopios en relación a los puntos cardinales con sus divisiones y subdivisiones. Asimismo, las direcciones del viento respecto a las divisiones básicas se representan del siguiente modo:

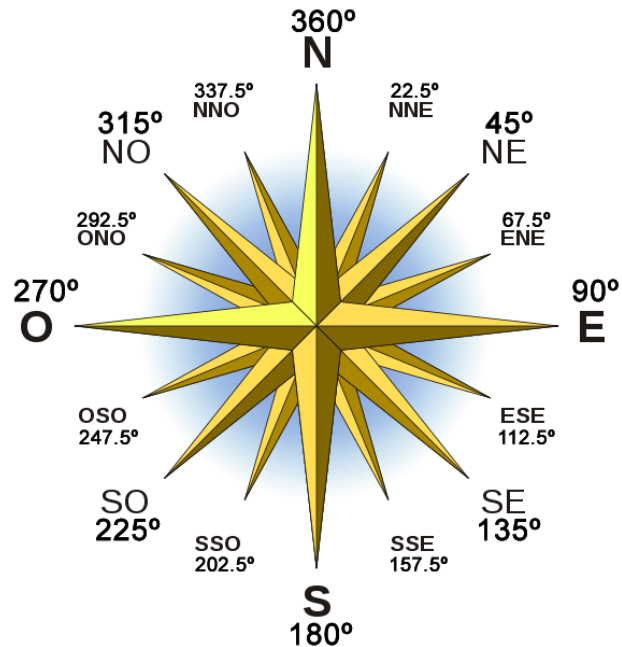
- N – Norte (0°)
- NNE – Nornoroeste (22. 5°)
- NE – Noreste (45°)
- ENE – Estenordeste (67. 5°)
- E – Este (90°)
- ESE – Estesudeste (112. 5°)
- SE – Sureste (135°)
- SSE – Sursureste (157. 5°)
- S – Sur (180°)
- SSO – Sursuroeste (202. 5°)
- SO – Suroeste (225°)
- OSO – Oeste Suroeste (247. 5°)
- O – Oeste (270°)
- ONO – Oeste noreste (292. 5°)
- NO – Noroeste (315°)
- NNO – Norte noreste (337. 5°)

2.2.2.9. Rosa de los Vientos

La rosa de los vientos (Fig. 5) forma parte importante en los estudios sobre el viento, esta se caracteriza por ser un paradigma simbólico internacional, el cual muestra las orientaciones del viento respecto a los puntos cardiales tomando como punto de partida el norte. La forma de la rosa de los vientos se proyecta dividiendo un círculo en 360° y se lee contando los grados en dirección a las manecillas del reloj (Velasco, 2012).

Figura 5

Rosa de los vientos



Nota: La figura muestra las direcciones del viento respecto a los puntos cardinales y los grados respecto al movimiento de las manecillas del reloj. Fuente: figura tomada y editada del Gobierno de Canarias - Consejería, Educación, Universidades, Cultura y Deporte (Suaréz, 2012).

2.2.3. *Velocidad*

La velocidad del viento generalmente se refleja en metros por segundo (m/s), como también en kilómetros por hora (km/h). Sin embargo, cuando la velocidad del aire es excesivamente fuerte esta se mide en nudos. Así mismo, se ha desarrollado una herramienta que permite medir la velocidad del viento; se le conoce como Anemómetro, el cual cuenta con diferentes modelos:

- Anemómetro de Copa/Molinete.
- Anemómetro de Hélice.
- Anemómetro de Hilo Caliente.
- Anemómetro de Rayo Láser.

Los centros de monitoreo científico poseen los Anemocinemógrafos; que son instrumentos que permiten medir y graficar la velocidad y dirección del viento entre los cuatro y diez metros de altura en terreno abierto (Velasco, 2012).

2.2.3.1. Escala Beaufort

La escala Beaufort es una herramienta que permite deducir la velocidad del aire cuando no se cuenta de herramientas técnicas de medición (Tabla 1). De la misma forma, la intensidad se mide de manera cualitativa en relación con sus efectos y la percepción del individuo. La escala Beaufort está compuesta por doce grados o fuerzas que van del 0 al 12, las cuales manifiestan la intensidad en velocidad y la potencia del viento sobre los objetos físicos. Es importante señalar que la escala Beaufort fue aprobada por el Comité Meteorológico Internacional con la finalidad de precisar los grados de influencia o la fuerza del viento (Velasco, 2012).

Tabla 1

Escala de Fuerzas del Viento de Beaufort

Grados	Descripción	Velocidad		Efectos en el Hombre	Efectos en Edificios y Vegetación
		m/s	Km/h		
0	Calma	0.0	0.0	Ninguno	El humo sube verticalmente y la superficie del agua es tranquila
		-	-		
		0.5	1.8		
1	Aire Ligero	0.6	2.2	Movimiento apenas percibido debido al efecto de enfriamiento	El viento mueve el humo, pero no las veletas.
		-	-		
		1.5	5.4		
2	Brisa Ligera	1.6	5.8	El aire fresco se siente en la cara	Murmullo de las hojas.
		-	-		
		3.3	11.9		
3	Brisa Suave	3.4	12.2	El cabello se mueve y la ropa se agita, inicia la incomodidad.	Las hojas y ramitas se mueven; ligera extensión de banderas y risos de agua.
		-	-		
		5.4	19.4		
4	Brisa Moderada	5.5	19.8	El pelo se despeina, algo incómodo.	El polvo se levanta y los papeles se vuelan, la arena se extiende sobre el terreno
		-	-		
		7.9	28.4		

5	Viento Fuerte	8.0 - 10.7	28.8 - 38.5	La fuerza del viento se siente incómodamente en el cuerpo.	Los árboles con follaje inician a ladearse, la arena es impulsada y extiende ondas de agua con cresta blanca. Las hojas se desprenden, la arena o la nieve soplan sobre la cabeza y las ramas grandes se mueven.
6	Viento muy Fuerte	10.8 - 13.8	39.9 - 49.7	Se escucha el viento y es difícil caminar firmemente.	Todos los árboles se Encuentran completamente en movimiento.
7	Vendaval	13.9 - 17.1	50.0 - 61.6	Caminar contra el viento equivale a subir una inclinación de 1/7	Las ramas grandes se doblan y las ramas pequeñas se rompen.
8	Ventarrón	17.2 - 20.7	61.9 - 74.5	Generalmente se impide el paso, lo que equivale a subir una inclinación de 1/5.	Las estructuras ligeras se dañan y las maderas y tejas se remueven
9	Ventarrón Fuerte	20.8 - 24.7	74.9 - 87.8	Las ráfagas empujan a lo que equivale a subir una cuesta de 1/4.	Las estructuras están considerablemente dañadas; los árboles partidos y arrancados.
10	Borrasca (Tormenta)	24.5 - 28.4	88.2 - 102.4	Caminar contra el viento equivale a subir una cuesta de 1/3, pero las ráfagas hacen prácticamente imposible moverse.	Edificios enteros destruidos y bosques enteros arrancados.
11	Borrasca Fuerte	28.5 - 29.0	102.6 - 104.4	Hombres y animales arrastrados y elevados.	Más fuerte que el anterior.
12	Borrasca muy Fuerte	29.1 - más	104.8 - más	Más fuerte que el anterior.	Más fuerte que el anterior.

Nota: La tabla expone una descripción completa de la velocidad del viento en m/s y Km/h, además de las escalas y los efectos del viento sobre el individuo y su entorno construido y natural. Fuente: tabla tomada y editada del libro Viento y Arquitectura – El viento como factor de Diseño Arquitectónico (García & Fuentes, 2005, pp. 165–166).

2.2.3.2. Vientos Locales

Otro aspecto en relación con la velocidad de aire, son los vientos locales; que a diferencia de la circulación regional (presión atmosférica) del viento estos se determinan por la diferencia de presión en la superficie terrestre. Se caracterizan principalmente por dos variables en su velocidad y dirección: la turbulencia y la topografía (Velasco, 2012).

La turbulencia tiene dos variantes: la mecánica y la térmica. La turbulencia mecánica se genera a partir del movimiento del viento al rozar elementos u objetos que interrumpen su flujo;

mientras más objetos encuentre a su paso, su intensidad aumenta. Por otro lado, la turbulencia térmica, se asocia principalmente con la inestabilidad y la actividad conectiva, la cual es semejante a la turbulencia mecánica en cuando a sus efectos en vientos superficiales, pero con la diferencia de que se prolonga a mayor altura sobre la atmosfera y es ocasionada por el calentamiento superficial (Buck, 1970; García & Fuentes, 2005).

La turbulencia térmica se establece especialmente por su intensidad; durante el día, ésta tiende a cambiar por la variabilidad en la atmosfera y por el incremento del calentamiento superficial. Por la tarde, las superficies alcanzan su mayor índice de calentamiento, aunado a que el movimiento del viento es inestable. Durante la noche la temperatura baja y el flujo de aire es estable. Asimismo, la turbulencia térmica se genera por la unión entre la convección y los vientos horizontales, esto provoca que haya un intercambio entre la superficie y el viento superior. Así pues, la turbulencia mecánica y térmica trabajan en conjunto, incrementando una a la otra (García & Fuentes, 2005; Velasco, 2012).

La formación de remolinos en la superficie terrestre es provocada por ambas turbulencias y se determinan por su fuerza y movimiento. Los remolinos se caracterizan por:

- La velocidad.
- La dirección del viento.
- La estabilidad e inestabilidad de la atmosfera baja.
- La forma y tamaño del objeto.

“Cada objeto sólido, dentro del patrón del viento, crea remolinos a los lados de sotavento, es la zona contraria en donde inciden directamente el viento o zonas bajas de presión” (García & Fuentes, 2005, p. 21).

La topografía tiene efectos particulares en los vientos locales debido al rose y fricción por contacto. Las montañas, debido a sus características respecto a sus curvas de nivel y topografía, presentan índices altos de rugosidad lo que provoca una mayor fricción en el desplazamiento de

vientos superficiales. Del mismo modo, las colinas, ladera y valles cambian la dirección y velocidad del aire cuando los flujos de viento se canalizan por las depresiones. Algo similar ocurre con la vegetación, pero a escala menor, influyendo en la velocidad, dirección y turbulencia (García & Fuentes, 2005).

2.2.3.3.Viento Laminar – Capa Límite

Debido a la circulación ordenada del aire en forma de capas paralelas o líneas horizontales a través de elementos u objetos se origina un flujo laminar, al cual se le conoce como capa límite laminar. Por el contrario, en las capas límite turbulentas, la circulación aire ya no es de forma paralela, ya que las moléculas de aire pasan de una capa a otra desplazándose en todas direcciones, provocando un movimiento caótico entre ellas (García & Fuentes, 2005; Velasco, 2012).

2.2.3.4.Viento Convectivo

Los vientos convectivos se caracterizan por no tener fuertes gradientes de presión, sus movimientos son habitualmente dominados por los vientos de menor escala, los cuales son generados por las diferencias de temperatura a nivel local; el aire se aligera por el calentamiento de la superficie y sube, no obstante, cuando el aire se enfría desciende, ya que este se vuelve más pesado. Esto provoca que el sistema de circulación convectiva tanto vertical como horizontalmente sean de la misma importancia. Así pues, el viento convectivo alude a todos los vientos que suben, bajan y se desplazan horizontalmente (García & Fuentes, 2005).

Los vientos convectivos se incrementan, se modifican y se eliminan por las corrientes de aire que generan los grandes sistemas de presión. Las modificaciones de los vientos convectivos dependen de la fuerza que ejercen los vientos generales y su dirección respecto a la circulación convectiva y la estabilidad atmosférica en capas inferiores. Es importante mencionar que los

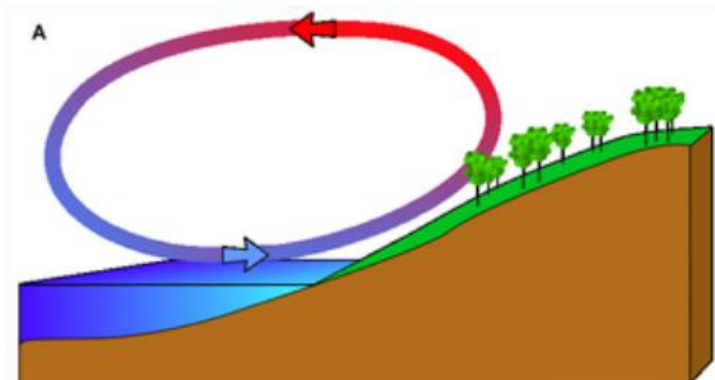
vientos convectivos, no solamente dependen de los factores que modifiquen el calentamiento o enfriamiento de la temperatura, también depende de factores relacionados a los cambios diarios y estacionales, la nubosidad y las características del terreno. Igualmente se debe considerar la estructura de la humedad y la temperatura atmosférica, destacando principalmente la brisa de tierra y mar, los vientos de ladera y los vientos de valle (García & Fuentes, 2005; Velasco, 2012).

2.2.3.5. Brisa de Tierra y Mar

La brisa costera es el aire que se genera por la diferencia de temperatura que existe entre el mar y la tierra. Esto se debe, a que el agua de mar se calienta lentamente y la superficie terrestre se calienta de forma acelerada. Esta disparidad provoca movimientos convectivos de aire (Velasco, 2012).

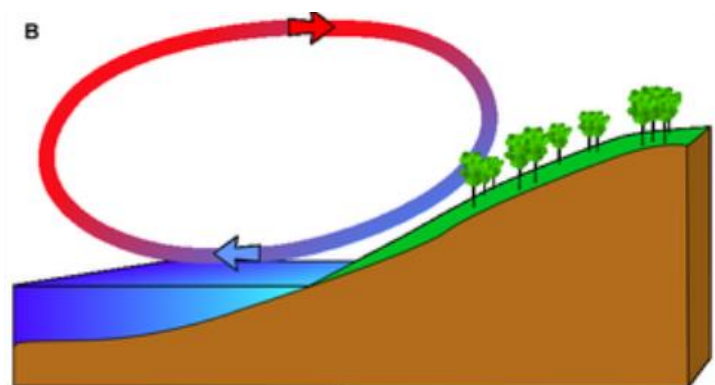
Por una parte, la radiación aumenta durante el día (Fig. 6) calentando la superficie terrestre a medida que el sol asciende, este efecto ocasiona que el mar pierda calor; lo que hace que la tierra se caliente, modificando la temperatura del aire que se desplaza sobre la superficie, además, pierde densidad, lo que provoca que el aire se vuelva ligero y suba. De la misma manera, el espacio que genera el aire al subir da lugar al aire frío que proviene del mar, originando gradientes térmicos.

Sin embargo, también se genera un gradiente de presión; ocasionando un flujo de viento fuera de la zona de mayor presión provocando la brisa mar (García & Fuentes, 2005; Velasco, 2012).

Figura 6*Brisa Diurna*

Nota: La figura muestra la circulación del viento durante el día entre un cuerpo de agua y la superficie terrestre. Fuente: Figura tomada y editada de Náuticajonkepa (2009).

Por otra parte, la radiación desaparece durante la noche (Fig. 7), provocando que el agua de mar conserve el calor que obtuvo durante el día, de esta forma la tierra pierde calor y la temperatura baja originando gradientes térmicos de presión distintos a los que se capturaron durante el día. Dando lugar a la brisa terrestre, ya que el aire caliente de mar sube y da lugar al aire frío proveniente de la tierra (García & Fuentes, 2005; Velasco, 2012).

Figura 7*Brisa Nocturna*

Nota: La figura muestra la circulación del viento durante la noche entre un cuerpo de agua y la superficie terrestre. Fuente: Figura tomada y editada de Náuticajonkepa (2009).

2.2.3.6. Vientos Urbanos

Otro aspecto para considerar en relación con las corrientes de aire generales a través de objetos sólidos o elementos naturales, se encuentran los vientos urbanos. Su origen proviene de los flujos de aire que se modifican con las características de viento local y convectivo, dando lugar a las diferencias entre la dirección, velocidad y turbulencias. De acuerdo con Bowen (1985), los vientos urbanos se generan por la morfología, el tamaño, la textura de las superficies, la contaminación, pero principalmente por los materiales empleados en las edificaciones, ya que la estructura recibe la radiación solar y la conserva en forma de calor. Lo que incide sobre estas estructuras ganando calor, lo que sobrecalienta el aire produciendo partículas de suspensión y generando así los domos térmicos o islas de calor (García & Fuentes, 2005).

Con la formación del Domo térmico o Isla de Calor, se originan los gases de efecto invernadero que durante algunos ciclos se prolongan, alterando las condiciones climáticas del sitio, aunado a que este fenómeno es nocivo para la salud del ser humano, debido a que se respiran las partículas contaminantes del entorno. Este efecto provoca modificaciones en la temperatura del sitio incrementándolas de 3° C a 3.5 ° C (Velasco, 2012).

2.2.4. Efectos del Viento sobre la Morfología Urbana

Los efectos del aire en la morfología urbana alteran el curso natural del viento. En 1986, Bedoya y Neila, exponen en su publicación, *Acondicionamiento y Energía Solar en Arquitectura*; que los efectos del viento pueden ser favorables o perjudiciales para las áreas naturales como también para las áreas construidas. Igualmente, consideran al confort como un tema importante para estudiar tanto en el interior como en el exterior de las edificaciones. Asimismo, mencionan que la variable más importante del viento es la velocidad, seguida del movimiento y describen que la dirección del viento de forma laminar es recta, por lo que, el

efecto Coriolis influye sobre ella. Por otra parte, cuando las láminas turbulentas se cruzan provocando giros y cambios de dirección, se le llama turbulencia. Todas estas variables influyen en los niveles de confort de manera negativa, ya que se ven afectadas por los obstáculos entre los que se mueve el aire (Bedoya & Neila, 1986; Velasco, 2012).

Agregado a lo anterior, el obstáculo más importante en los movimientos del aire son las edificaciones (tanto interior como exterior), ya que en estos espacios interactúan y se desarrolla la vida humana. Es importante considerar que los efectos que el viento provoca sobre las edificaciones se clasifican en:

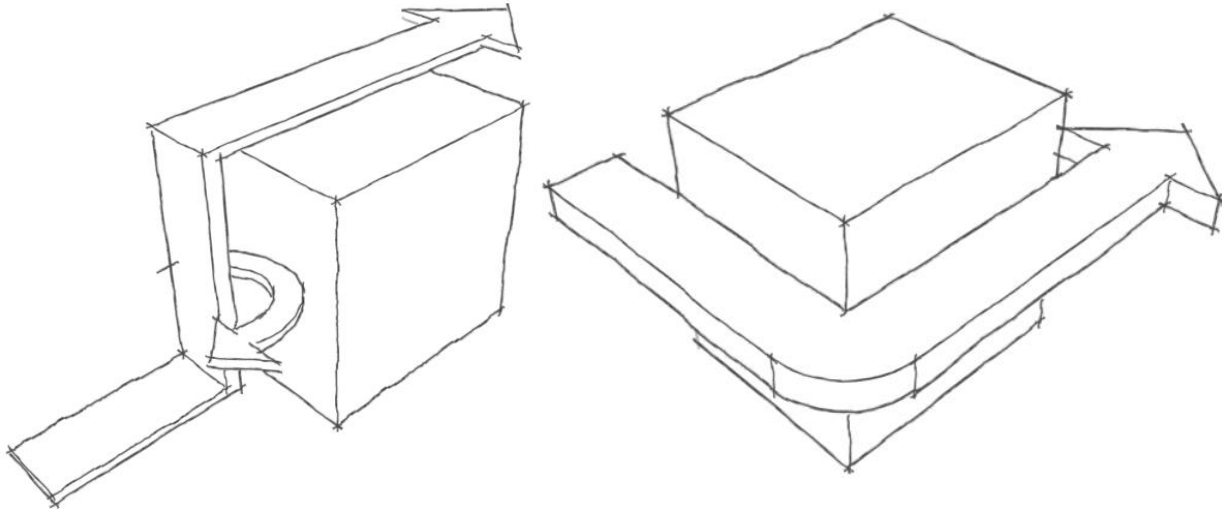
- Efecto Rodillo
- Efecto Esquina
- Efecto de Aceleración o Efecto Venturi
- Efecto pilotes

2.2.4.1.Efecto Rodillo – Efecto Esquina

En cuanto al efecto rodillo, este se crea por la exposición directa de las fachadas respecto a las corrientes de aire; provocando un giro proveniente de la masa de viento con dirección al suelo, generando turbulencias. Cabe mencionar, que el efecto incrementa dependiendo la altura de los edificios o si existe algún elemento de menor altura que interrumpa la circulación del viento (Bedoya & Neila, 1986; Velasco, 2012).

Por el contrario, el efecto Esquina, se produce al cambiar desapaciblemente la orientación del aire al acercarse a la lateral del elemento u objeto edificado (Bedoya & Neila, 1986; Velasco, 2012).

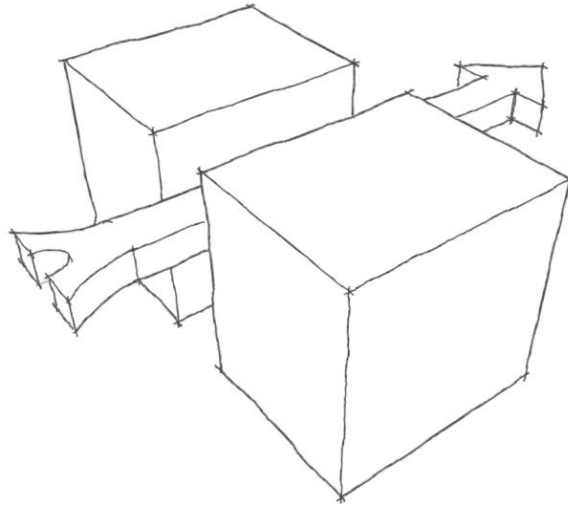
Dichos efectos se pueden observar de manera gráfica en la figura 8.

Figura 8*Efecto Rodillo – Efecto Esquina*

Nota: La figura de la izquierda muestra como el movimiento del viento es interrumpido por la fachada de un elemento edificado provocando un giro, generando turbulencias provocando el efecto rodillo. Por el contrario, la figura de la derecha muestra como el movimiento del aire cambia bruscamente al acercarse a un elemento edificado generando el efecto esquina. Fuente: Figura tomada y editada de Bedoya y Neila (1986).

2.2.4.2.Efecto Aceleración o Efecto Venturi

Respecto, al efecto de aceleración o efecto Venturi (Fig. 9); este se origina cuando la corriente de aire se encauza a través de un área reducida, provocando que el aire a nivel de piso incremente su velocidad al salir.

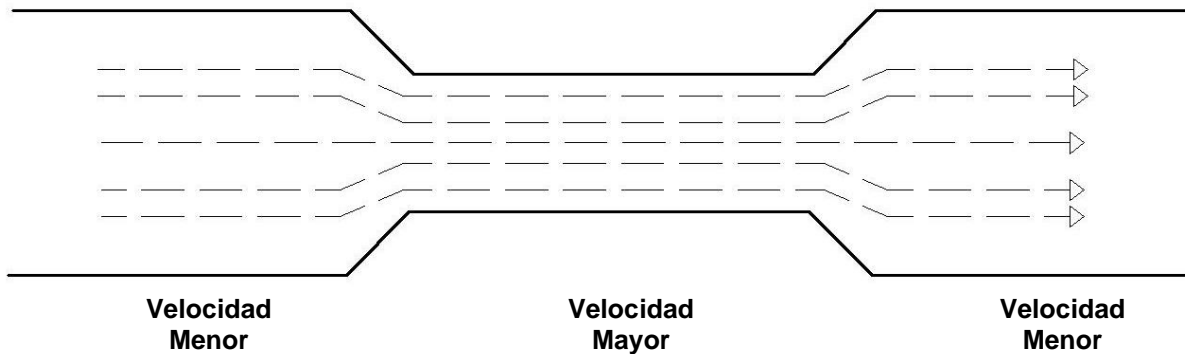
Figura 9*Efecto Aceleración*

Nota: La figura muestra como el flujo de aire aumenta de velocidad al pasar a través de un espacio reducido. Fuente: Figura tomada y editada de Bedoya y Neila (1986).

En términos generales el Efecto Venturi se define como la reducción de presión que se genera cuando un fluido circula a través de la sección estrecha de una tubería (Fig. 10). En la dinámica de fluidos²¹, la velocidad de un flujo debe aumentar a medida que atraviesa una construcción de acuerdo con el principio de continuidad de masa²² (Grau *et al.*, 2016). Dicho de otra manera, es cuando “un fluido que pasa por el tubo ve disminuir su presión al franquear el estrechamiento, al mismo tiempo que su velocidad aumenta” (Lozano, 2008, p.29).

²¹Es el estudio del movimiento de los fluidos, incluidas sus interacciones cuando dos fluidos entran en contacto entre sí. En este contexto, el término "fluido" se refiere a líquido o gases (Greelane, 2019).

²²Se conoce generalmente como el principio de conservación de la materia y establece que la masa de un objeto o colección de objetos nunca cambia con el tiempo, sin importar cómo se reorganicen las partes constituyentes. Este principio puede usarse en el análisis de fluidos que fluyen (Connor, 2019).

Figura 10*Efecto Venturi*

Nota: La figura muestra el desplazamiento de un fluido que ve disminuir su presión en el área más amplia al mismo tiempo que su velocidad aumenta en el área más estrecha. Fuente: figura tomada y editada del libro *Arquitectura Bioclimática y Energía Solar – Viento y Arquitectura* (García & Fuentes, 1985, p. 125).

García y Fuentes (2005) relacionan el concepto con las corrientes de aire generales tanto en espacios urbanos como en espacios arquitectónicos. Este efecto ha estado implícito de manera que no se ha considerado en estudios previos sobre el comportamiento del viento. Consiste en canalizar el aire a través de un área reducida, haciendo que la velocidad del viento aumente precisamente en el área menor. Por el contrario, si el área es más amplia la velocidad del viento reducirá.

2.2.4.3. Efecto Pilotes

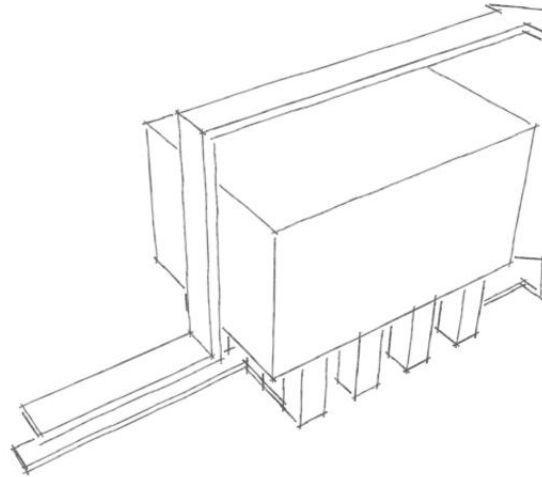
El efecto pilotes (Fig. 11), sucede cuando el viento se dispersa cubriendo todo un edificio. La acción del viento provoca presión en la fachada, generando zonas de turbulencia a nivel de piso; de la misma forma, se genera una depresión en la fachada opuesta.

Las áreas de presión y depresión provocan un flujo de aire entre las edificaciones cuando existe una brecha en ambas fachadas. Asimismo, cuando el aire pase de un lugar a otro, donde no exista un flujo o circulación de aire preciso, se podría originar una turbulencia y giros; del mismo modo, la abertura donde sale el aire puede generar un aumento de velocidad, habrá el efecto

Venturi. Cabe mencionar, que, si el vano de acceso de aire es de menor dimensión, este producirá una aceleración favorable, generando una renovación de aire, evitando una diferencia de temperatura.

Figura 11

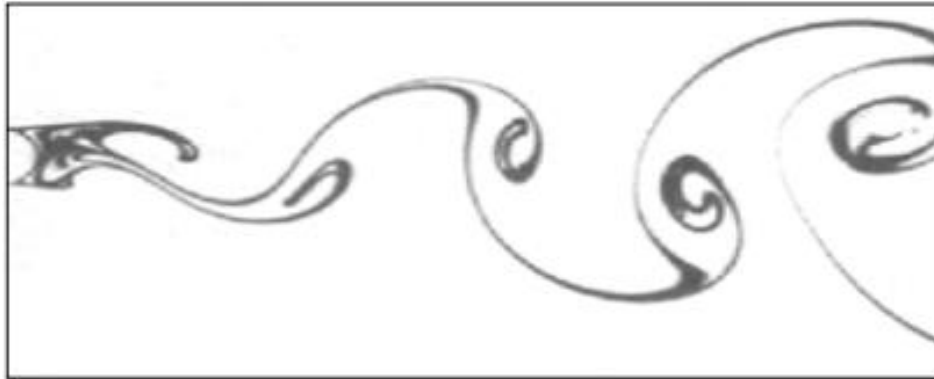
Efecto Pilotes



Nota: La figura muestra como el flujo de aire se reparte en todo el edificio. Fuente: Figura tomada y editada de Bedoya y Neila (1986).

2.2.4.4. Vórtices de Circulación

Otro efecto de las corrientes generales de aire que ocurre dentro de la morfología urbana, son los vórtices de circulación. De acuerdo con las características que poseen los vórtices, estos se clasifican en: vórtices forzados y vórtices libres. No obstante, para efectos de estudio solo se plantea el vórtice forzado; el cual se genera al chocar un fluido en movimiento con un obstáculo fijo. En términos prácticos sobre el viento, un vórtice (Fig. 12) se crea debido a que el flujo de aire se separa por el contacto con una pared fija, creando un desprendimiento periódico de torbellinos en sentido rotatorio; a los que se les denomina vórtices de Von Kármán (Gardea-Villegas, 2001; Maqui Santos, 2017).

Figura 12*Vórtices de Von Kármán*

Nota: La figura muestra un flujo en proceso de generación y desprendimiento. Los denominados vórtices Von Kármán. Fuente: Figura tomada y editada de Maqui, José (2017).

2.2.5. *Flujos de Viento A través de la Morfología Urbana*

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire; por sus siglas en inglés ASHRAE, es una asociación que se encarga de establecer los estándares en el diseño de edificios, particularmente en el flujo de aire que circula alrededor de ellos. Se entiende que los flujos de viento (Fig. 13), generan consecuencias que pueden afectar la seguridad del individuo, como también el modo de controlar las variaciones de temperatura, humedad y la renovación del aire, aunado al eficiente funcionamiento de los equipos empleados al interior de los edificios y la influencia en el confort del usuario. No obstante, las investigaciones desarrolladas por ASHRAE, también consideran como la fuerza del aire provoca presiones superficiales, creando condiciones que modifican el índice de entrada y salida del viento, considerando presiones interiores y la velocidad (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [ASHRAE], 2001; Velasco, 2012).

Con lo anterior, las investigaciones desarrolladas por ASHRAE, exponen que los flujos de viento al interactuar con diversas formas geométricas crean diferentes patrones de flujo. Al

respecto conviene mencionar que también las edificaciones con formas simples pueden generar patrones complejos en los flujos del aire. Asimismo, se deben hacer pruebas con modelos a escala a través de simulaciones físicas o digitales, para entender la influencia que generan los edificios adyacentes, incluso considerando las características topográficas, ya que estos crean patrones en de flujo en áreas determinadas del edificio. No obstante, si el edificio se encuentra orientado de forma perpendicular al viento; se le puede analizar con bloques rectangulares aislados unos de otros (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [ASHRAE], 2001; Velasco, 2012).

La altura en la que el viento influye en la edificación es directamente proporcional a la velocidad media del flujo de aire, ya que, la velocidad del viento proveniente del barlovento como la potencia que presenta la turbulencia incide en los patrones de flujo y las presiones superficiales (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [ASHRAE], 2001)

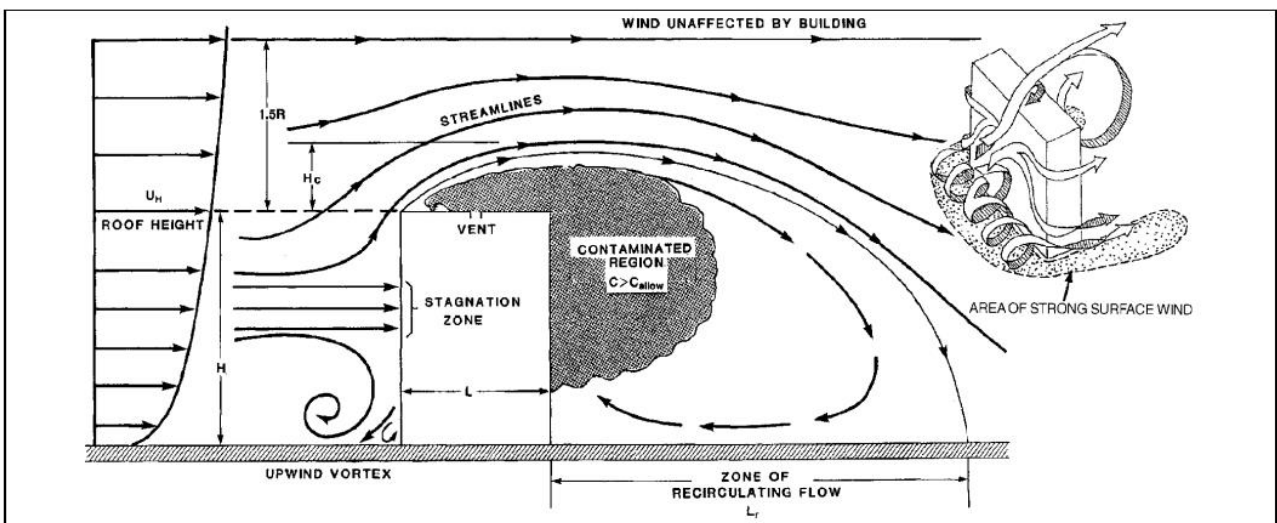
De la misma forma, el flujo de aire al golpear la esquina de un edificio se divide, provocando recirculaciones de aire en dirección al barlovento a lo largo del resto de la edificación. Si el volumen tiene una extensión considerable hacia el barlovento, el flujo regresa en dirección al mismo y se crean dos distintas zonas de recirculación. No obstante, los patrones que generan los flujos en la superficie que chocan contra el viento son influenciados por las variables de aproximación del viento (Velasco, 2012).

La velocidad del viento a nivel de techo en los edificios es alta, sin embargo, estas generan mayores presiones de estancamiento, provocando un descenso del flujo (Fig. 13). Por otro lado, un volumen que posee una altura de tres o más veces el ancho de una superficie con orientación al sotavento generará una zona intermedia donde el flujo de aire pasará horizontalmente en el

edificio, creando un vórtice que incrementará su velocidad. Esto se debe a que el flujo de aire que pasa por la superficie baja del edificio hacia el sotavento se aleja antes de llegar al suelo. Esta acción genera una acumulación de polvo que puede contaminar el aire que se encuentra cerca del nivel de suelo (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [ASHRAE], 2001; Velasco, 2012).

Figura 13

Patrones del Flujo de Viento en Fachadas

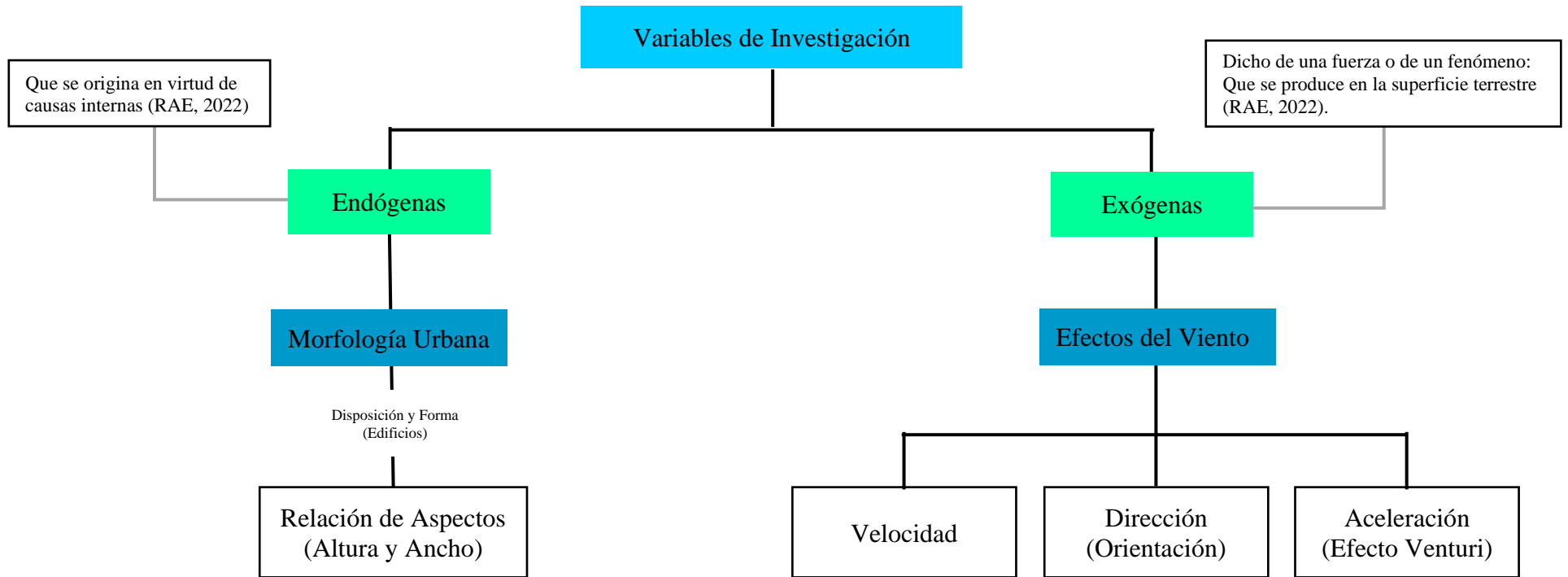


Nota: La figura muestra la velocidad del viento sobre el techo de un volumen, causando un estancamiento en la superficie generando presión en la parte alta ocasionando un descenso del flujo entre la mitad y los dos tercios bajos de la superficie. Fuente: Figura tomada y editada de ASHRAE (2001).

Para terminar, se pueden establecer las variables endógenas y exógenas (Fig. 14) a emplear en la presente investigación, para comprender los principios básicos acerca del comportamiento del viento en la morfología urbana.

Figura 14

Diagramas de las variables de investigación



Nota: La figura muestra el origen de las variables que se emplean en la investigación a partir de variables endógenas y exógenas de la Morfología Urbana y los Efectos del Viento. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 3. Metodología

El presente trabajo formula una investigación experimental, la cual se realizó en el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal. Se expone en cuatro etapas; la primera corresponde a la revisión de literatura y antecedentes en relación con el crecimiento exponencial de la mancha urbana de Chetumal, como también el describir la morfología urbana presente en el centro histórico de la ciudad, principalmente en su relación con la geometría y la traza urbana. Se considera la disposición y forma de los edificios, como también la relación de aspectos: la altura máxima (H) de los edificios que se encuentran en el sitio y el ancho (W) de las vialidades. Dichas variables se obtienen de un análisis realizado a los conceptos que se emplean en el Urbanismo Aerodinámico, considerando factores endógenos (morfología urbana, disposición - forma de los edificios y relación de aspectos) y exógenos (velocidad, orientación y aceleración del viento).

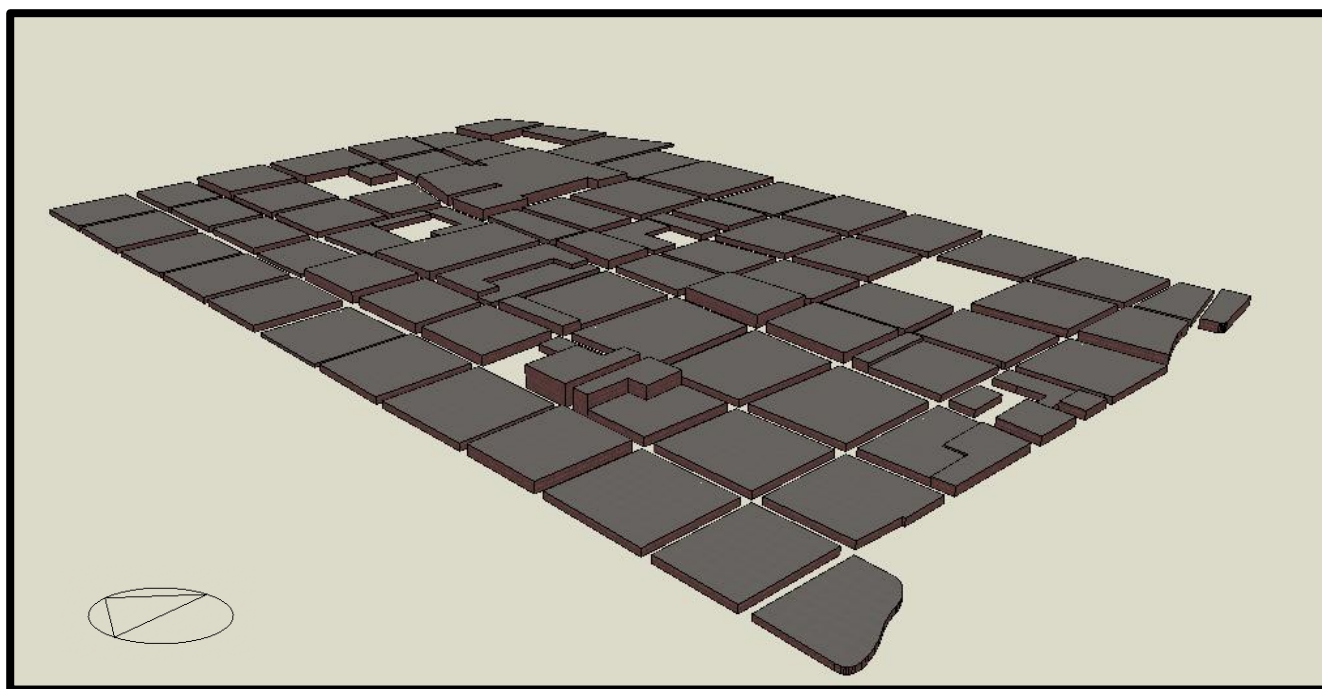
Agregado a lo anterior, el centro histórico de Chetumal se dividió en dos sectores (norte y sur) debido a las dimensiones urbanas que posee el sitio, seleccionado cuatro secciones viales en cada sector. Dichas secciones presentan variaciones morfológicas en su geometría urbana; lo que da lugar a la segunda etapa de la investigación. Efectuando un estudio del tipo mixto, se realizó el levantamiento de las secciones a partir de la visita de campo y el empleo de orto-fotografías del Instituto Geográfico y Catastral del Estado de Quintana Roo (IGECE) donde se consideró principalmente la relación de aspecto y orientación de la traza urbana. Permitiendo registrar mediciones *in situ* de las variables relacionadas a los efectos del viento sobre la morfología urbana (velocidad, dirección y aceleración) poniendo principal énfasis en la aceleración que el

viento alcanza en las secciones, tomando en cuenta las características climáticas del sitio a partir del software Climate Consultant 6.0²³.

Seguidamente, se realiza un análisis del comportamiento del viento considerando la Disposición y Forma de los Edificios y la Relación de Aspectos de las secciones viales seleccionadas del Centro Histórico de Chetumal. Dicho análisis se genera a través de elementos adimensionales o escala (Fig. 15), considerando la unificación de acuerdo a la altura máxima de los edificios en las secciones seleccionadas considerando así lo planteado por Moreno (1999) e Higuera y Bustamante (2013), que de acuerdo a las necesidades se pueden generar estrategias apropiadas para estudiar el viento.

Figura 15.

Levantamiento del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal



Nota: La figura muestra el levantamiento adimensional del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal considerando una escala 1:10. Fuente: Figura de elaboración propia a partir de un modelo DesignBuilder.

²³ Meteonorm-Climat Consultant, es una herramienta gratuita que permite la visualización gráfica de las variables climáticas de cualquier sitio a nivel mundial. Incluye datos, tales como: temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, nubosidad y precipitación.

El análisis se ejecuta a través del módulo CFD²⁴ exterior del DesignBuider v6, el cual predice el efecto de los vientos locales en la superficie exterior de los edificios y en el espacio adyacente, considerando la presión del aire, pero principalmente la velocidad que el viento puede alcanzar en la zona; información que puede ser útil para evaluar el confort del individuo en los espacios exteriores para mejorar la ventilación natural del sitio. Cabe mencionar que, para interpretar los resultados de la simulación, el módulo CFD del DesignBuilder v6 posee una gráfica que permite visualizar de acuerdo a los rangos de velocidad en m/s una serie de colores. Considerando al color azul como el rango más bajo de velocidad, al color verde y amarillo como el rango medio y al color naranja y rojo como los rangos más altos de velocidad que el viento puede alcanzar.

Asimismo, se realiza una comparación de la información obtenida en la simulación CFD con los datos que establece la escala de fuerza del viento de Beaufort para el análisis e interpretación de los resultados, considerando la descripción de la fuerza que alcanza el viento, su velocidad en metros/segundo y en kilómetros/hora, como también sus efectos en el hombre, en los edificios y en la vegetación. Dicho análisis permitió establecer las principales características que posee el viento que corre en el centro histórico de Chetumal.

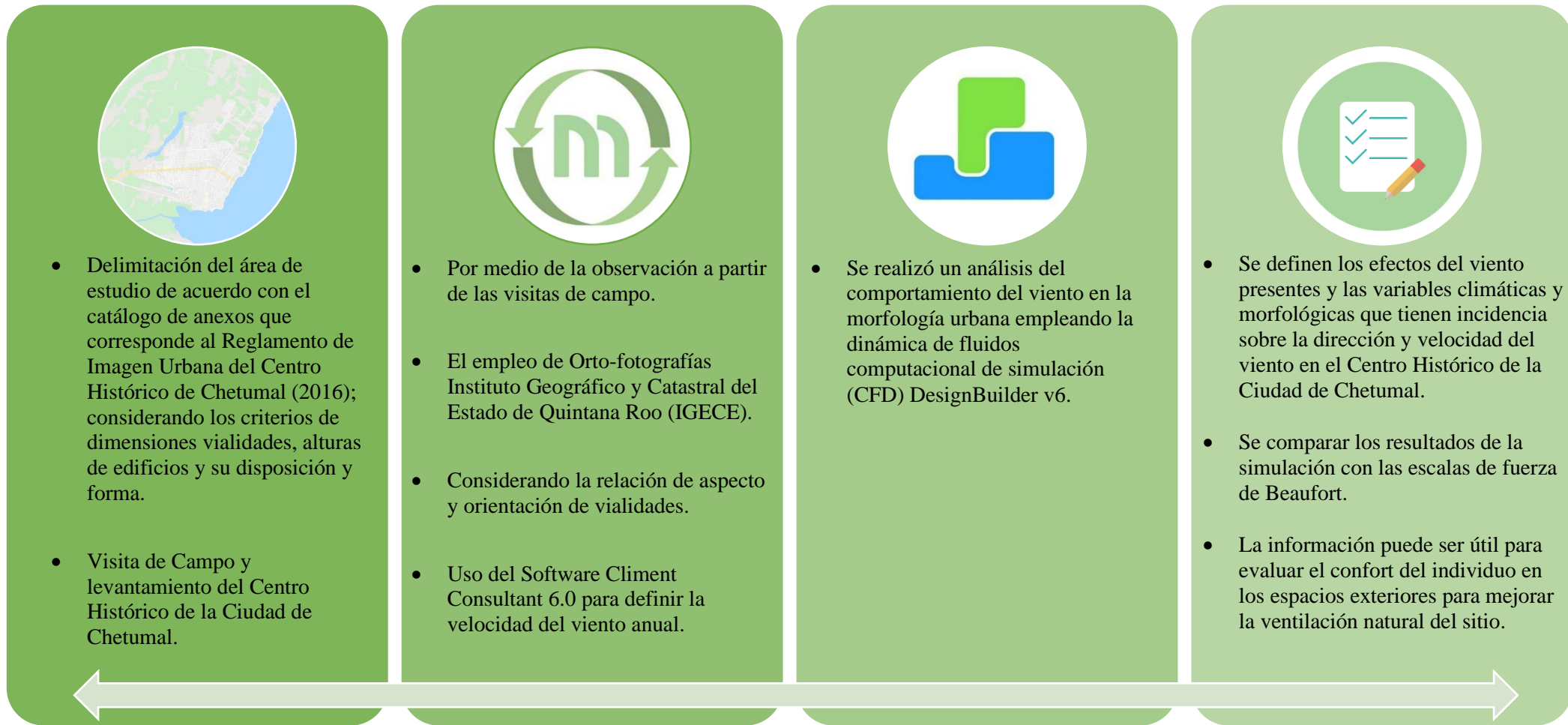
Finalmente, el análisis permitirá definir el comportamiento del aire en cada una de las secciones y se podrá establecer en que rango de velocidad en metros sobre segundo se encuentra el viento en base a la categoría de colores que maneja del Software de simulación CFD. Asimismo, con la información obtenida de la simulación se podrá realizar una comparación con las escalas de fuerza del viento de Beaufort para determinar las características, los efectos, como también los fenómenos del viento presentes en el Centro Histórico de Chetumal.

²⁴ La dinámica de fluidos computacionales (CFD) es un análisis que reúne una variedad de métodos numéricos para calcular detalladamente las variables de temperatura, la velocidad y otras propiedades de los fluidos como por ejemplo; el agua y el aire, en un determinado dominio espacial (Ordóñez, 2017).

Así pues, resultados permitirán desarrollar directrices de diseño urbano en ciudades costeras; tanto en vialidades, como la altura y orientación para los edificios, a partir de las características climatológicas de los sitios; considerando al viento como una de las principales variables de diseño, ya que este se caracteriza por ser uno de los dos elementos primordiales del Urbanismo Bioclimático. En la figura 16 se puede observar de manera sintetizada cada una de las etapas de la investigación descritas en la metodología.

Figura 16

Esquema Metodológico



Nota: La figura muestra el proceso metodológico empleado para la investigación. Fuente: Elaboración Propia

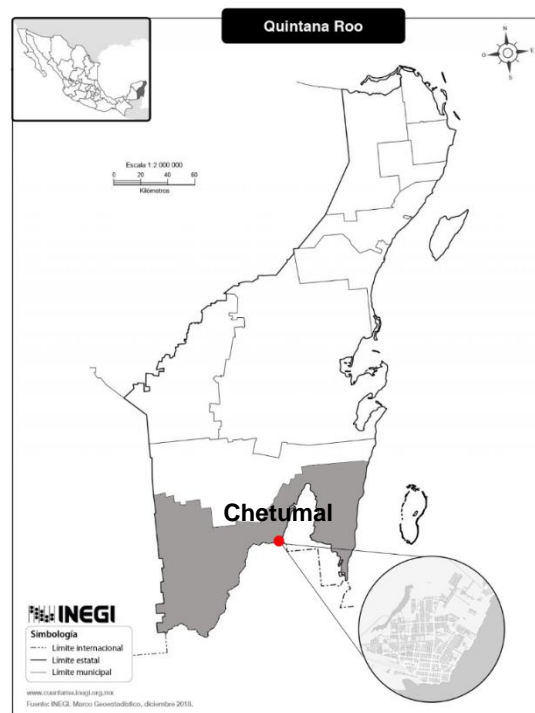
Capítulo 4. Estudio de la Morfología Urbana de la Ciudad de Chetumal

4.1. Antecedentes del Crecimiento Urbano de la ciudad de Chetumal.

Chetumal ($18^{\circ}30'13''N - 88^{\circ}18'19''O$), cabecera municipal del municipio de Othón P. Blanco (Fig. 17), fue fundada con el nombre de Payo Obispo el 5 de mayo de 1898 y durante ese mismo año se inició el trazado urbano de la entidad. Payo Obispo era un asentamiento nuevo cuando se creó Quintana Roo, y se mantuvo así durante dos décadas (Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018) .

Figura 17

Ubicación Geográfica de Chetumal



Nota: La figura muestra la Ubicación Geográfica de la ciudad de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia en base al mapa tomado del INEGI. Marco Geoestadístico (2018).

Entre 1902 y 1922 (Fig. 18 y Fig. 19), Chetumal contaba con cinco vialidades de norte a sur y siete de Este a Oeste (Romero & Benítez, 2014; Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018)

Figura 18

Trazo Vial de Payo Obispo 1902



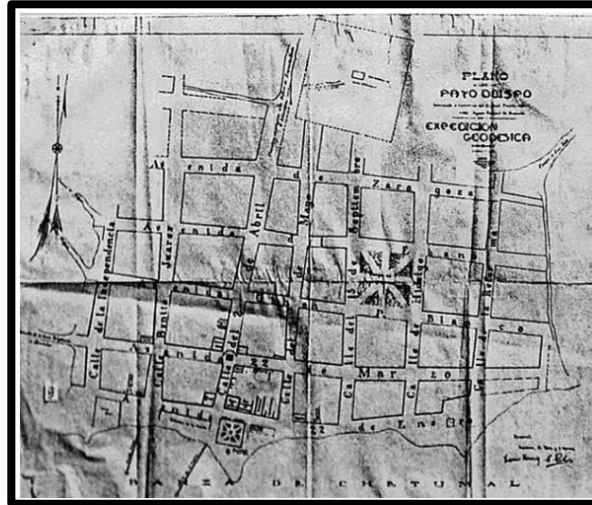
Nota: La figura muestra el primer croquis del trazado urbano de Payo Obispo sin nomenclatura durante 1902. Fuente: Imagen tomada y editada de Romero y Benítez (2014).

De acuerdo con sus características territoriales, la entidad se empezó a constituir a partir de la bahía ubicada al sur, fue entonces cuando se estableció el primer cuadro del asentamiento. Las vialidades establecidas de sur a norte (avenidas), recibieron los nombres de; 22 de enero, 22 de marzo, Othón P. Blanco, del Ébano y de Zaragoza. Las que iban de este a oeste (calles), fueron nombradas como; De la Reforma, Hidalgo, 15 de septiembre, 5 de mayo, 2 de abril, Benito Juárez e Independencia. En este sentido, las colindancias marítimas de Chetumal se orientaban de sur a este, lo que provocó que el crecimiento sea hacia el norte y hacia el oeste, el territorio

era delimitado por la Avenida Zaragoza y por la calle Independencia.²⁵ No obstante, Payo Obispo se mantuvo igual (Fig. 17), hasta finales de los años veinte (Romero & Benítez, 2014).

Figura 19

Traza vial de Payo Obispo en 1922



Nota. La figura muestra el croquis del trazado urbano de Payo Obispo con nomenclatura durante 1922.

Fuente: Imagen tomada y editada de Romero y Benítez (2014).

Agregado a lo anterior, Chetumal presentaba una tendencia de crecimiento en la mancha urbana, desplazándose hacia el norte y hacia el este, alejándose de la bahía (zona del Muelle Fiscal). Durante 1928 (Fig.20) ya se habían establecido nuevas vialidades; en la zona norte se contaba con las Avenidas 27 de septiembre, Centenario y Chapultepec. Al oeste, se encontraban las calles Francisco I. Madero y Emiliano Carranza y al este las calles; 21 de junio, Cozumel, Francisco Sarabia y Gonzalo Guerrero.

²⁵ “La costumbre de designar como calles aquellas que atravesaban la población de Payo Obispo de sur a norte y avenidas a las vialidades que corrían de este a oeste se invirtió durante los primeros años de la década de 1940, de manera que las avenidas serían las que correrían de sur a norte y las calles aquellas que irían de este a oeste” (Romero & Benítez, 2014, p. 128).

Figura 20

Poblado de Payo Obispo en 1928



Nota. La figura muestra el poblado de Payo Obispo y su expansión urbana durante 1928 y su tendencia de crecimiento hacia el norte y el este. Fuente: Imagen tomada y editada de Romero y Benítez (2014).

Cabe señalar que en 1931; Chetumal registro un población de 4, 000 habitantes (Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018)

Durante 1940 se realizaron intervenciones a nivel urbano, como por ejemplo: la construcción y prolongación del muelle fiscal, asimismo, se dotó de infraestructura para agua potable, como también, la construcción del aeropuerto. Para 1946 (Fig. 21), la ciudad de Chetumal, ya contaba con equipamiento urbano, como por ejemplo: el Palacio de Gobierno, la Casa del Pueblo, la Carcel Pública, Telegrafos Municipales, el Hotel “Los Cocos”, la Escuela Belisario Dominguez, el Mercado Lazaro Cardenas y el Hospital Morelos. Asimismo, habian otros en construcción, que serían necesarios para el buen funcionamiento de la localidad. Del mismo modo, se observa un amplio crecimiento de la ciudad, tanto en vialidades de conexión como en su extensión territorial urbana (Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018).

Figura 21*Plano de Chetumal 1946*

Nota. El plano muestra la extensión territorial urbana, vialidades y el equipamiento urbano de Chetumal en 1946. Fuente: Imagen tomada y editada del Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos (2018).

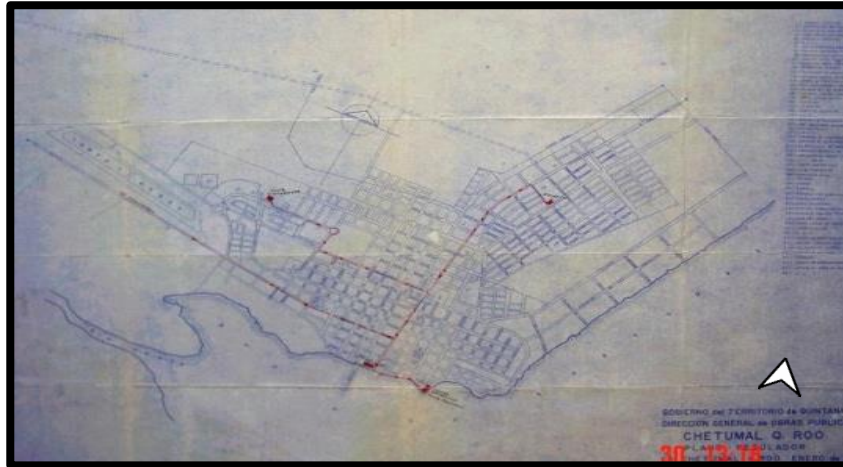
En 1955 Chetumal asolado por el paso del huracan Janet sufre un parteaguas tanto en la historia de la ciudad como en su arquitectura y urbanismo. No obstante para 1956 (Fig. 22), Chetumal es reubicado hacia el norte de la ciudad.

Durante 1959 el gobierno propone reconstruir e impulsar a Chetumal con el proposito de convertir la localidad en Estado (Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018).

Figura 22*Plano de Chetumal con la Propuesta de Reubicación Urbana 1956*

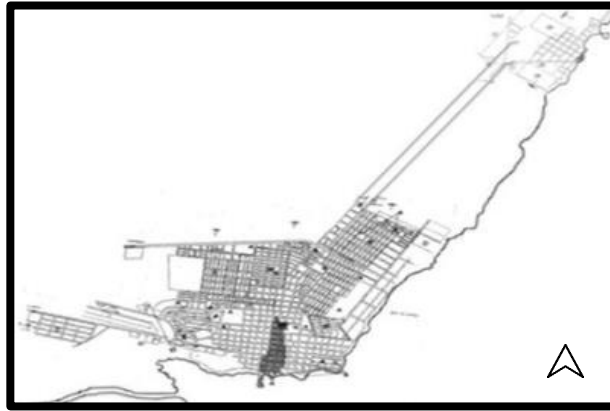
Nota. El plano muestra la propuesta de reubicación urbana de Chetumal un año después del paso del huracán Janet y ubicación de la colonia Venustiano Carranza. Fuente: Imagen tomada y editada de Romero y Benítez (2014).

Para 1960, el censo poblacional registro 12, 858 habitantes en Chetumal, dicha cifra se duplicó a 23, 685 habitantes en 1970. En 1972 (Fig. 23), Chetumal mostraba un crecimiento paulatino con orientación hacia el noreste. De la misma forma, se establecían nuevas colonias en la ciudad (Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018).

Figura 23*Plano de Chetumal 1972*

Nota. El plano muestra la extensión territorial hacia el noreste de Chetumal durante 1972. Fuente: Imagen tomada y editada del Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos (2018).

Simultáneamente en 1977 (Fig. 24), Chetumal registro 57, 500 habitantes en una superficie de 350 ha, donde el 60% del territorio contaba con servicio de agua potable, sin embargo, la infraestructura de drenaje pluvial solo cubría la zona de la bahía equivalente al 10% de la población. Asimismo, el 100% de la población contaba con el servicio de energía eléctrica y el 65% de las vialidades de la ciudad estaban pavimentadas. Por otra parte, en 1985, el servicio de agua potable atendía al 55% de la población y se cubría al 10% de los habitantes en el servicio de drenaje, al 90% en el servicio de energía eléctrica. Cabe mencionar que, durante el mismo año, aparece por primera vez en los registros cartográficos la localidad de Calderitas dentro de la mancha urbana hacia el noreste de la ciudad (Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018).

Figura 24*Área Urbana de Chetumal 1977*

Nota. El plano muestra la extensión territorial urbana de Chetumal en 1985 y la aparición de un nuevo asentamiento al noreste de la ciudad que actualmente se conoce como Calderitas. Fuente: Imagen tomada y editada del Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos (2018).

En 1993 (Fig. 25), Chetumal ya mostraba una mayor extensión territorial hacia el noreste y una consolidación en la zona baja de la ciudad, como también, una definición ortogonal en su traza urbana. Asimismo, presentaba indicios de su expansión hacia el norte de la ciudad.

Figura 25*Área Urbana de Chetumal 1993*

Nota. El plano muestra que la mancha urbana ya ocupaba la mayor parte de la zona baja de ciudad, aparece la Av. Insurgentes y nuevas colonias en la parte alta. Fuente. Imagen tomada y editada del Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos (2018).

Para finales del siglo XX, Chetumal tuvo un progreso importante en materia de desarrollo urbano, equipamientos e infraestructura y se continúa percibiendo un crecimiento hacia el norte, donde se decretaron terrenos ejidales dando una superficie total de 858-83-83 Ha. No obstante, la continua expansión territorial de la ciudad, provocó un desinterés en el centro de la ciudad. Ya que, durante el 2003 (Fig. 26), se presenta un deterioro físico en la estructura urbana del centro histórico, además de una desvalorización, etapa que alcanza de manera simbólica y física un punto de quiebre, aunado a los problemas de drenaje de la zona baja de la ciudad (Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos, 2018).

Figura 26

Mapa de Chetumal 2003



Nota. El mapa muestra la extensión territorial urbana de Chetumal en 2003. Fuente. Elaboración Propia en base a los mapas de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021).

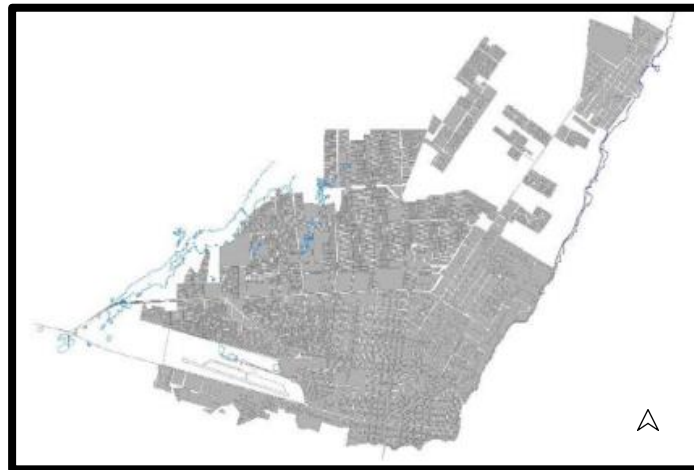
Cabe mencionar que, para 2010 Chetumal poseía una población total de 151,243 habitantes, dichas cifras fueron publicadas en el año 2013. No obstante, para 2020, Chetumal registró una población total de 169,028 habitantes (INEGI. Censo de Población y Vivienda, 2010. Citado por

la Secretaria de Desarrollo Social [SEDESOL], 2013; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020).

Ahora bien, para 2014 (Fig. 27), Chetumal, ya se mostraba como una ciudad consolidada, pero esta seguía expandiendo su territorio urbano hacia el noroeste, nor-noroeste, norte y noreste. El ecosistema natural se iba sustituyendo por un ecosistema físico urbano, lo que provocó un cambio notable en las características climatológicas de la ciudad haciendo que la habitabilidad térmica exterior sea inadecuada para el individuo provocando un disconfort térmico en los espacios urbanos de la ciudad, aunado a que la ciudad no fue concebida, ni diseñada a partir de las condiciones climáticas del sitio, generando un desequilibrio entre los dos factores del urbanismo bioclimático como lo son el sol y el viento.

Figura 27

Expansión Urbana de Chetumal



Nota. El mapa muestra la extensión territorial urbana hacia el noroeste, nor-noroeste, norte y noreste de Chetumal en 2014. Fuente. Imagen proporcionada por la Dirección de Desarrollo Urbano, Municipio de Othón P. Blanco. Fuente. Imagen tomada y editada del Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo I.1. Antecedentes históricos (2018).

Figura 28

Comparación de la Mancha Urbana de Chetumal entre 1989 y 2020



Nota. La figura muestra la evolución de la mancha urbana de la ciudad de Chetumal entre 1898 y 2020. Fuente. Imagen de elaboración propia a partir de Mapas obtenidos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021).

Capítulo 5. Resultados y Discusión

5.1. Análisis Morfológico del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal.

El crecimiento exponencial de la mancha urbana de Chetumal ha marcado una pauta en la forma de la ciudad, ya que esta presenta una tendencia ortogonal (Fig. 29) en la traza y ordenamiento territorial. Dicha característica en su tejido urbano se puede apreciar desde su origen entre los años 1898 - 1902.

Figura 29

Traza y Tejido de la Mancha Urbana de Chetumal



Nota: La figura muestra el trazado ortogonal en la mancha urbana actual de la ciudad de Chetumal, así como sus vialidades primarias, secundarias y terciarias. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de Styling Wizard: Google Maps APIs (2021).

El análisis se realizó en el primer cuadro urbanizado de la entidad (colonia Centro) conocido como el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal (Fig. 30). El sitio se encuentra ubicado entre tres vialidades primaria; la Av. Blvd. Bahía, la calle Miguel Hidalgo, la Av. Independencia y la calle Cristóbal Colón.

Figura 30

Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal



Nota: La figura muestra el centro histórico de la ciudad y las vialidades primarias y secundarias que delimitan el sitio. Fuente: Figura tomada y editada del Reglamento de Imagen Urbana del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal – Anexo 1 (2016).

Agregado a lo anterior, el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal presenta una distribución ortogonal de sur a norte y de este a oeste. Cabe señalar que de acuerdo al Programa de Desarrollo Urbano Chetumal - Calderitas - Subteniente López - Huay-Pix - Xul-Há (2021),

las secciones a intervenir se encuentran en un uso de suelo Comercial y de Servicios; clasificado como Centro urbano (CU).

5.1.1. Análisis Vial de las Secciones del Centro Histórico de Chetumal

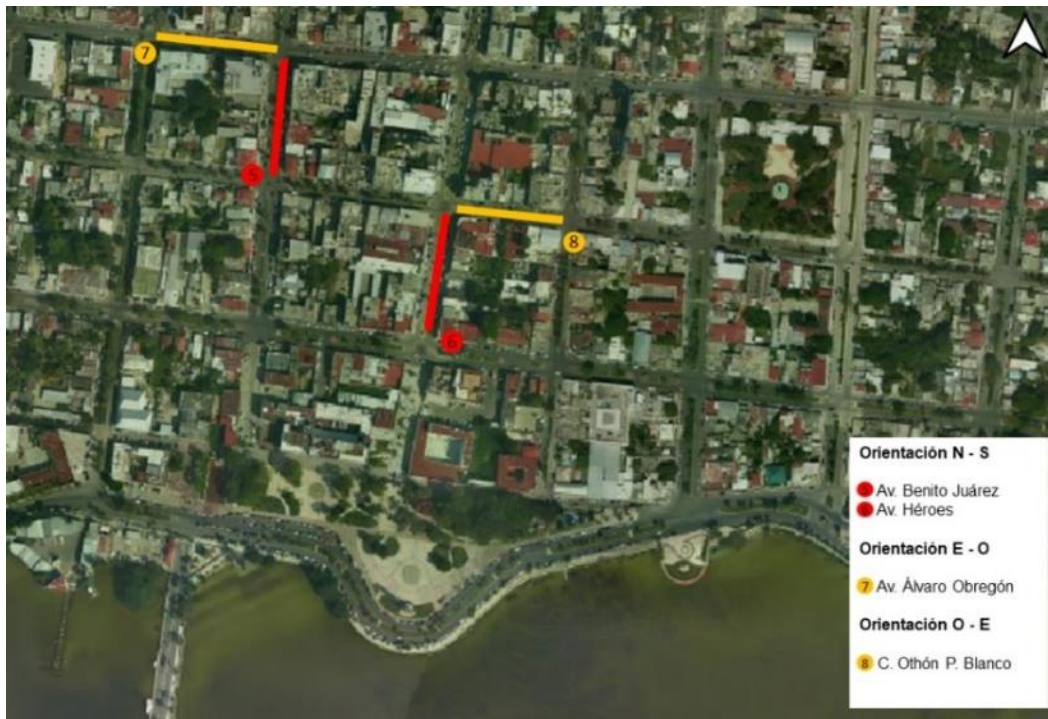
El levantamiento vial (Fig. 31 y 32) permitió conocer las características particulares de las secciones, las cuales se describen de acuerdo al Manual de Calles – Diseño vial para ciudades mexicanas. Cabe mencionar, que el crecimiento progresivo de la mancha urbana de cualquier ciudad, el plantear la regeneración de una zona o que la vialidad disponga de un nuevo esquema de movilidad de la ciudad, pueden generar la necesidad de cambiar la forma, función o uso de la vía urbana (Manual de Calles – Diseño vial para ciudades mexicanas, 2019).

Figura 31

Secciones del Sector Norte del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal



Nota: La imagen muestra la selección de secciones del primer sector a analizar del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia tomada del Instituto Geográfico y Catastral del Estado de Quintana Roo (2021).

Figura 32*Secciones del Sector Sur del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal*

Nota: La imagen muestra la selección de secciones del segundo sector a analizar del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia tomada del Instituto Geográfico y Catastral del Estado de Quintana Roo (2021).

La siguiente tabla describe las características con las que una vialidad debe contar de acuerdo al Manual de calles – Diseño vial de ciudad mexicanas (2019), ya que el documento hace una clasificación de vialidades primarias, secundarias y terciarias dividiendo cada uno de los rubros en tres niveles diferentes de acuerdo a su función y habitabilidad vial.

Tabla 2*Tipografía Vial - Manual de Calles – Diseño Vial para Ciudades Mexicanas*

Tipología de Calles	Descripción
Primarias con Nivel de Habitabilidad 1 (P1)	Son calles de circulación continua, con un acceso controlado; los accesos a las ciudades, libramientos, calzadas, viaductos y vías sin urbanizar. Son consideradas barreras urbanas artificiales. Dichas vialidades poseen doble sentido de circulación y están compuestas por tres carriles, en ellas predomina la función de la movilidad sobre la de habitabilidad. En algunos casos, las P1 se han visto rebasadas por los cambios de uso de suelo y el aumento de la habitabilidad, ocasionando que exista una mayor circulación en este tipo de calles.
Primarias con Nivel de Habitabilidad 2 (P2)	Son vías que atraviesan subcentros urbanos facilitando la conectividad de las distintas zonas de la ciudad. Presentan cruces semaforizados, considerándose ejes viales. Son vialidades de doble sentido, aunque en algunos casos se han convertido en un solo sentido. No obstante, cuando son bidireccionales generalmente tienen un camellón central y llegan a tender más de tres carriles. Por el contrario, cuando son unidireccionales llegan a tener más de cuatro carriles. Cabe mencionar que en estas también predominan la función de movilidad sobre la habitabilidad, sin embargo, se tiene un mayor nivel de habitabilidad que en las P1 ya que presentan cruces.
Primarias con Nivel de Habitabilidad 3 (P3)	Son vías clave para la movilidad de la ciudad con cruces semaforizados, donde se concentran los orígenes y destinos de mayor porcentaje de viajes de la ciudad, tales como; las avenidas principales y bulevares que funcionan como la columna vertebral de la ciudad. Poseen doble sentido, separado por camellones y pueden tener hasta tres carriles de circulación o tres cuerpos de dos carriles que se separan por camellones. Aquí predomina la función de la movilidad, aunque existe mayor presencia de comercios, servicios y actividades estacionarias.
Secundarias con Nivel de Habitabilidad 1 (S1)	Son calles que conectan las vialidades terciarias con la red primaria de la ciudad, tienen la función de colectar flujos, normalmente cada colonia tiene una vía representativa. Posee en su mayoría cruces semaforizados, como es el caso de las avenidas con industrias, oficinas, bodegas, fábricas y grandes áreas comerciales que se combinan con suelo residencial. Estas vialidades se caracterizan por tener dos sentidos separados por camellones. Cuando son unidireccionales presentan hasta cuatro carriles, tres de circulación y uno de estacionamiento. En dicha vialidad predomina la función de movilidad sobre la de habitabilidad.
Secundarias con Nivel de Habitabilidad 2 (S2)	Son vialidades que conectan calles locales con las vías primarias y con algunos cruces semaforizados, tales como: avenidas y calles principales con usos de suelo residencial. Dichas vialidades pueden ser de uno o dos sentidos, el primero cuenta con par vial y el segundo está delimitado por marcas en el pavimento. Poseen dos carriles de circulación efectiva y el estacionamiento es permitido en ambos lados. Generalmente presentan usos de suelo residencial, comercial y mixtos, todo en baja densidad.

Secundarias con Nivel de Habitabilidad 3 (S3)	Son calles que mantienen su forma colectoras con un alto uso de la vía como espacio público. Tienen cruces semaforizados como avenidas y vialidades principales con usos de suelo comercial. Son de doble sentido que se delimitan por camellones, además tienen hasta dos carriles viales efectivos con un carril de estacionamiento en ambos lados. Presentan usos comerciales, residenciales y mixtos de mediana y alta densidad.
Terciarias con Nivel de Habitabilidad 1 (T3)	Son vialidades que dan acceso a los predios. Los cruces se semaforizan solamente en las intersecciones con vías tipo S, como es el caso de las calles locales convencionales. Dichas vialidades pueden ser de doble sentido con cuatro carriles; dos de circulación y dos de estacionamiento. En el caso unidireccional, no tienen camellón, estas son delimitados por marcas en el pavimento. Estas vialidades en su mayoría presentan usos residenciales.
Terciarias con Nivel de Habitabilidad 2 (T2)	Son vías que dan acceso a los predios de zonas de uso comercial y mixto. Sus cruces se semaforizan son en intersecciones con calles tipo S, tales como calles compartidas o peatonales. Estas vialidades son de un solo sentido, no obstante, pueden tener más de dos carriles, pero no todos son usados para circulación. Asimismo, el estacionamiento está permitido en ambos lados, en ellas predomina la función de habitabilidad sobre la movilidad, ya que presenta una densidad de moderada a alta donde hay usos de suelo mixto; comerciales y de servicios con usos habitacionales.
Terciarias con Nivel de Habitabilidad 3 (T3)	Son calles que dan acceso a los predios de zonas de uso residencial pero también se pueden encontrar usos comerciales y mixtos. Los cruces viales son semaforizados en intersecciones con vías tipo S. Como es el caso de las calles peatonales, callejones, privadas, cerradas y malecones. Estas vialidades no cuentan con banquetas y se restringe la circulación vehicular. Poseen una mayor función de habitabilidad, pero sin dejar de tener la de movilidad.

Nota: La tabla describe las características de acuerdo al tipo de vialidad presente en una ciudad a nivel

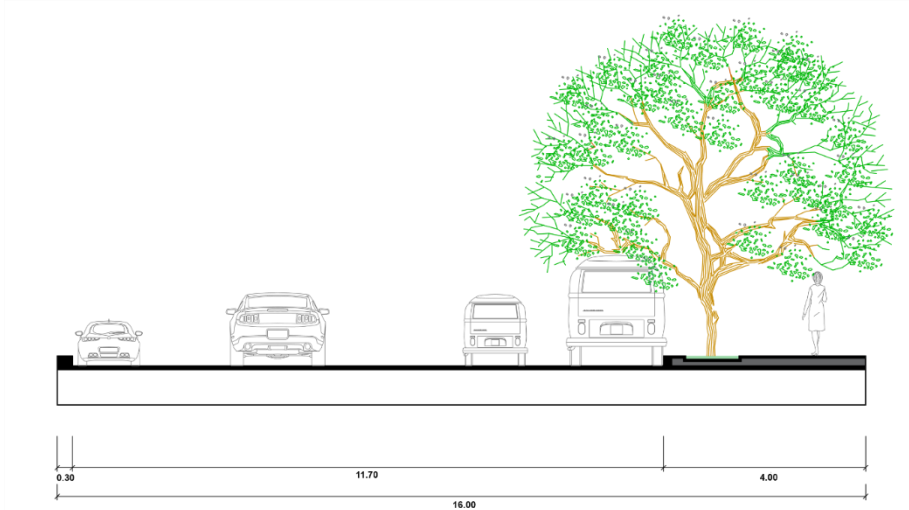
nacional. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la información obtenida del Manual de calles –

Diseño vial de ciudades mexicanas (2019).

Ahora bien, de acuerdo con la figura 33, la primera sección del sector Norte con orientación Norte – Sur pertenece a la calle Belice entre Mahatma Gandhi y Avenida Efraín Aguilar, la figura 34 muestra la situación actual de la sección vial.

Figura 33

Sección Vial Esquemática 1



Nota: La figura muestra la sección esquemática de la calle Belice entre Mahatma Gandhi y Avenida Efraín Aguilar. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Figura 34

Fotografía Sección Vial 1



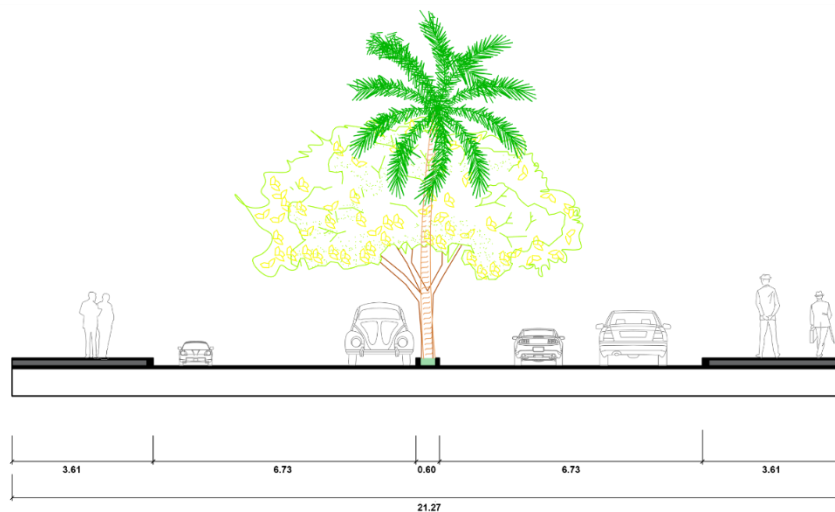
Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 1 que pertenece a la Calle Belice entre Mahatma Gandhi y Av. Efraín Aguilar. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

De acuerdo al Manual de Calles – Diseño vial para ciudades mexicanas (2019), la sección 1; se puede clasificar como Secundaria con nivel de habitabilidad 2 debido a sus características. Sin embargo, también se puede clasificar como Terciaria con nivel de habitabilidad 2, ya que presenta ciertas variables que hacen énfasis a las cualidades de dicha clasificación. Incluso se podría catalogar como una vialidad Terciaria con un nivel de habitabilidad 3, ya que, muestra indicadores viales en su uso, forma y función.

La sección 2 con orientación Norte – Sur del sector 1 de acuerdo con la figura 31 pertenece a la Avenida Benito Juárez entre calle Gral. Plutarco Elías Calles y Avenida Ignacio Zaragoza (Fig. 35). Dicha vialidad se puede clasificar como Secundaria con nivel de habitabilidad 1. La figura 36 muestra las condiciones actuales de la vialidad.

Figura 35

Sección Vial Esquemática 2

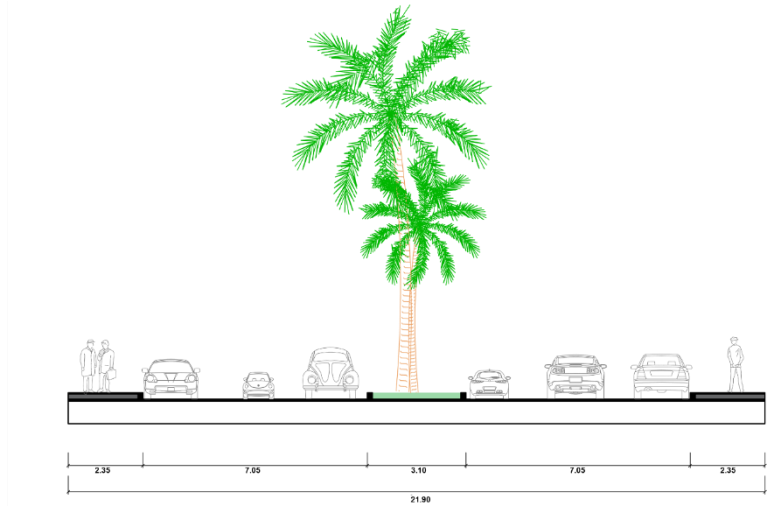


Nota: La figura muestra la sección esquemática de la Avenida Benito Juárez entre calle Gral. Plutarco Elías Calles y Avenida Ignacio Zaragoza. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Figura 36*Fotografía Sección Vial 2*

Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 2 que pertenece a la Avenida Benito Juárez entre calle Gral. Plutarco Elías Calles y Avenida Ignacio Zaragoza. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

Asimismo, la sección 3 con orientación Este – Oeste (Fig. 37) del primer sector perteneciente a la Calle Lázaro Cárdenas entre Avenida Héroes y la Avenida Benito Juárez (Fig. 38). Se determina también como Secundarios con nivel de habitabilidad 1, ya que posee características en el diseño vial con las que se puede relacionar.

Figura 37*Sección Vial Esquemática 3*

Nota: La figura muestra la sección esquemática de la Calle Lázaro Cárdenas entre Avenida Héroes y la Avenida Benito Juárez. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Figura 38*Fotografía Sección Vial 3*

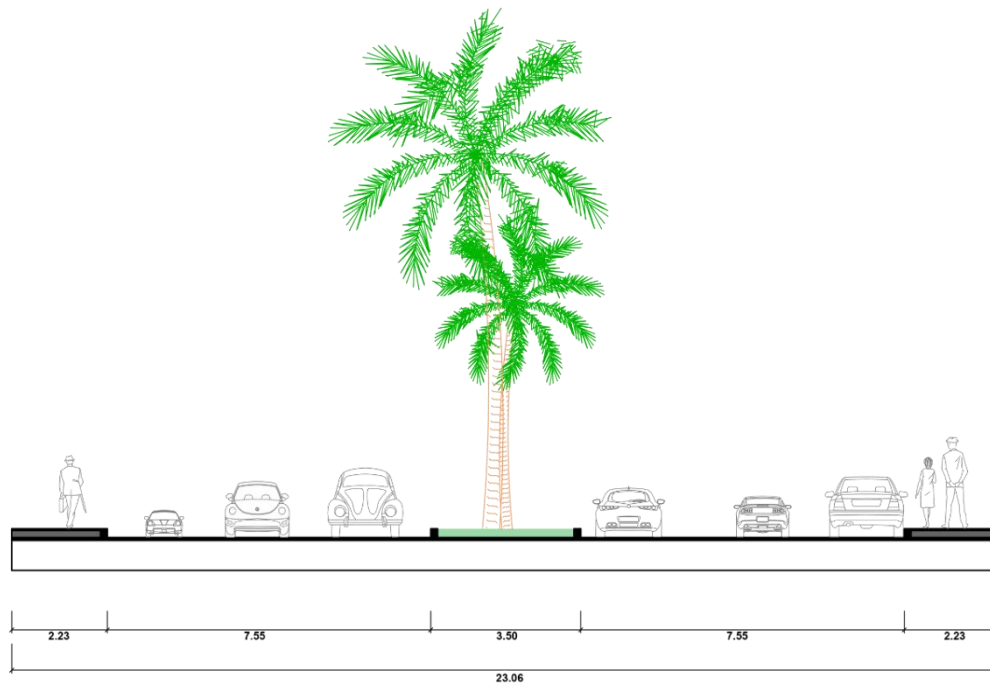
Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 3 que pertenece a la Calle Lázaro Cárdenas entre Avenida Héroes y la Avenida Benito Juárez. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

La investigación y levantamiento de campo permitió observar ciertas similitudes entre secciones, en algunos casos únicamente cambia los usos y funciones viales, ya que a pesar de ser un área comercial y de servicios, se pueden encontrar un uso de suelo mixto, entre negocios,

viviendas e incluso edificios religiosos. Como es el caso de la sección 4 con orientación Este – Oeste (Fig. 39); que se encuentra en la calle Plutarco Elías Calles entre Avenida Héroes y la Avenida Benito Juárez (Fig. 40). Del mismo modo, la vialidad acuerdo al Manual de Calles y sus características se puede clasificar como una calle Secundaria con nivel de habitabilidad 1.

Figura 39

Sección Vial Esquemática 4



Nota: La figura muestra la sección esquemática de la calle Plutarco Elías Calles entre Avenida Héroes y la Avenida Benito Juárez. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

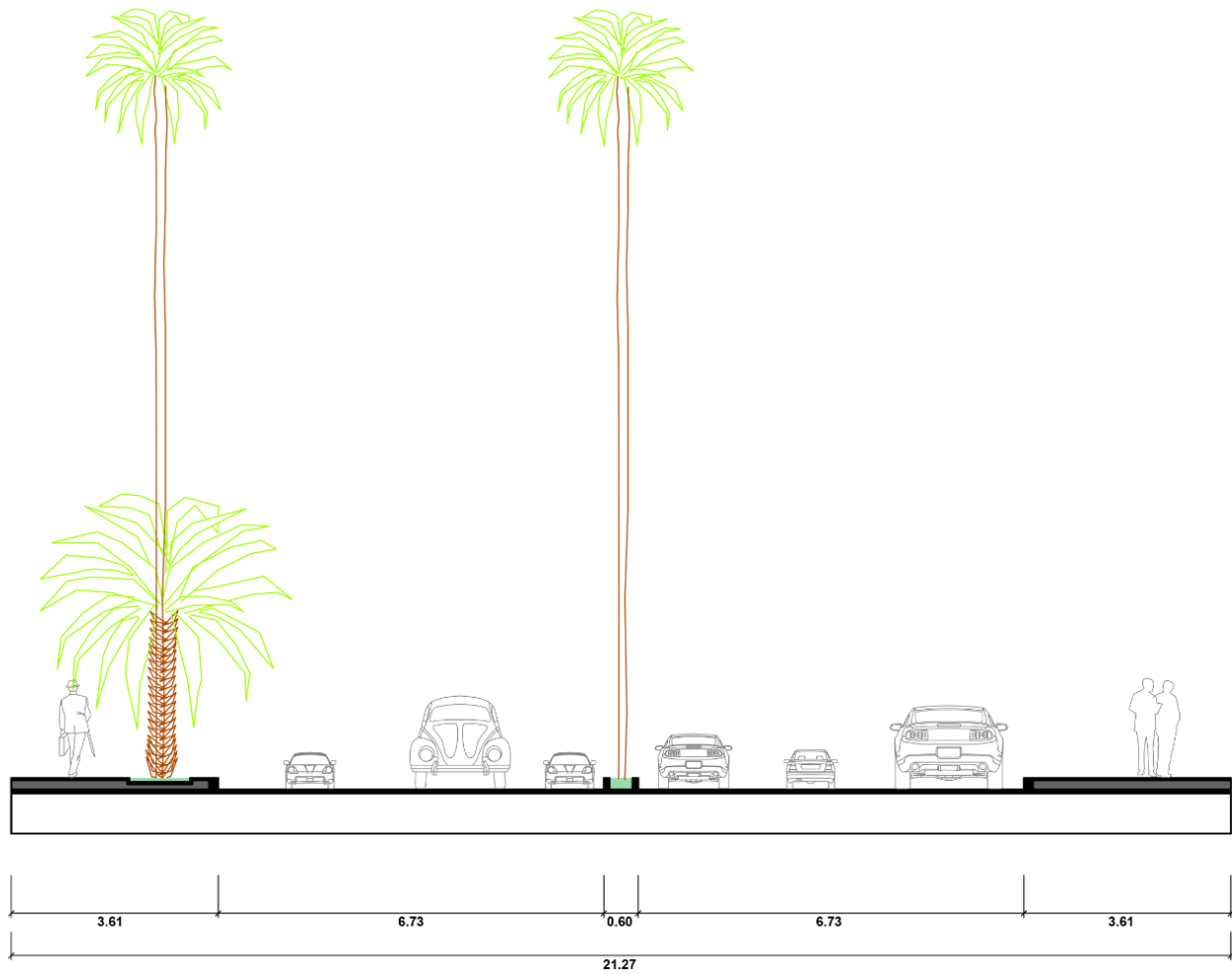
Figura 40*Fotografía Sección Vial 4*

Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 4 que pertenece a la calle Plutarco Elías Calles entre Avenida Héroes y la Avenida Benito Juárez. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

Por otra parte, la sección 5 (Fig. 41) con orientación Norte – Sur del sector dos se ubica en la Avenida Benito Juárez entre la Avenida Álvaro Obregón y la calle Othón P. Blanco (Fig. 42). Dicha vialidad posee características similares a la sección 2 en cuestión de forma, sin embargo, en aspectos de uso y función muestra otras características de aglomeración vehicular, ya que es una vialidad más transitada. No obstante, dicha vialidad se puede clasificar como Secundaria con nivel de habitabilidad 1.

Figura 41

Sección Vial Esquemática 5

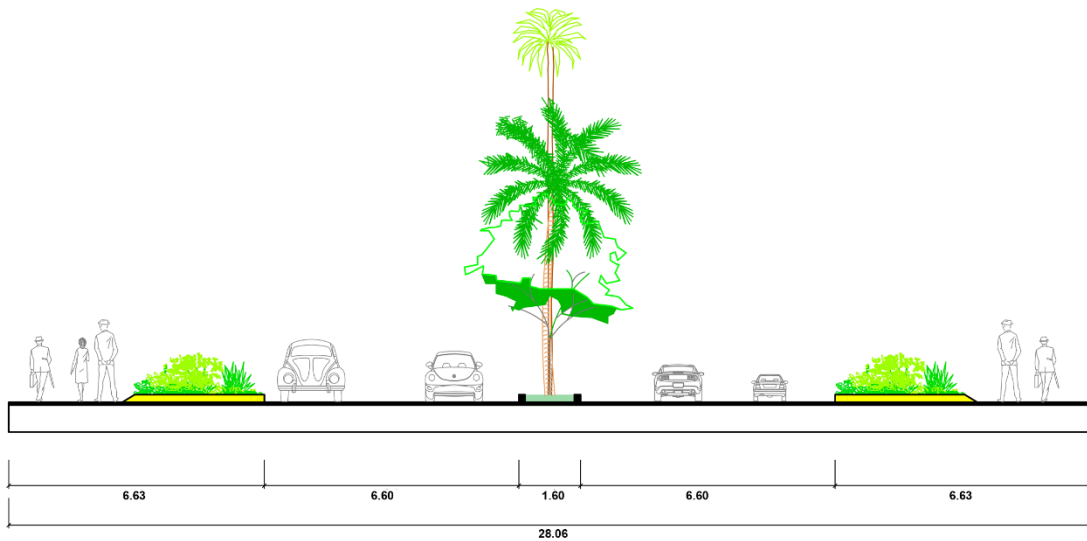


Nota: La figura muestra la sección esquemática de la Avenida Benito Juárez entre Avenida Álvaro Obregón y la calle Othón P. Blanco. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Figura 42*Fotografía Sección Vial 5*

Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 5 que pertenece a la Avenida Benito Juárez entre Avenida Álvaro Obregón y la calle Othón P. Blanco. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

Agregado a lo anterior, la sección 6 (Fig. 43) con orientación Norte – Sur; se puede clasificar de acuerdo con su uso, forma y función vial como Secundarias con nivel de habitabilidad 3. La sección se encuentra sobre la Avenida Héroes entre la calle Othón P. Blanco y la Avenida Carmen Ochoa de Merino (Fig. 44).

Figura 43*Sección Vial Esquemática 6*

Nota: La figura muestra la sección esquemática de la Avenida Héroes entre la calle Othón P. Blanco y la Avenida Carmen Ochoa de Merino. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Figura 44*Fotografía Sección Vial 6*

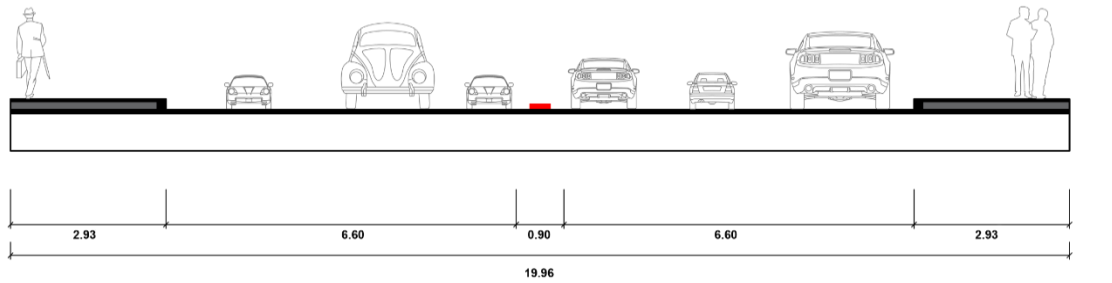
Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 6 que pertenece a la Avenida Héroes entre la calle Othón P. Blanco y la Avenida Carmen Ochoa de Merino. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

Ahora bien, la sección vial 7 (Fig. 45) con orientación Este – Oeste, pertenece a la Avenida Álvaro Obregón entre Avenida Benito Juárez y la Avenida Independencia (Fig. 46).

Dicha avenida se puede clasificar como Primaria con un nivel de habitabilidad 3. Sin embargo, también posee características que la pueden definir como una Avenida Secundaria con un nivel de habitabilidad 1; esto se puede determinar a partir de la forma, función o uso de la vía urbana.

Figura 45

Sección Vial Esquemática 7



Nota: La figura muestra la sección esquemática de la Avenida Álvaro Obregón entre la Avenida Benito Juárez y la Avenida Independencia. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Figura 46

Fotografía Sección Vial 7

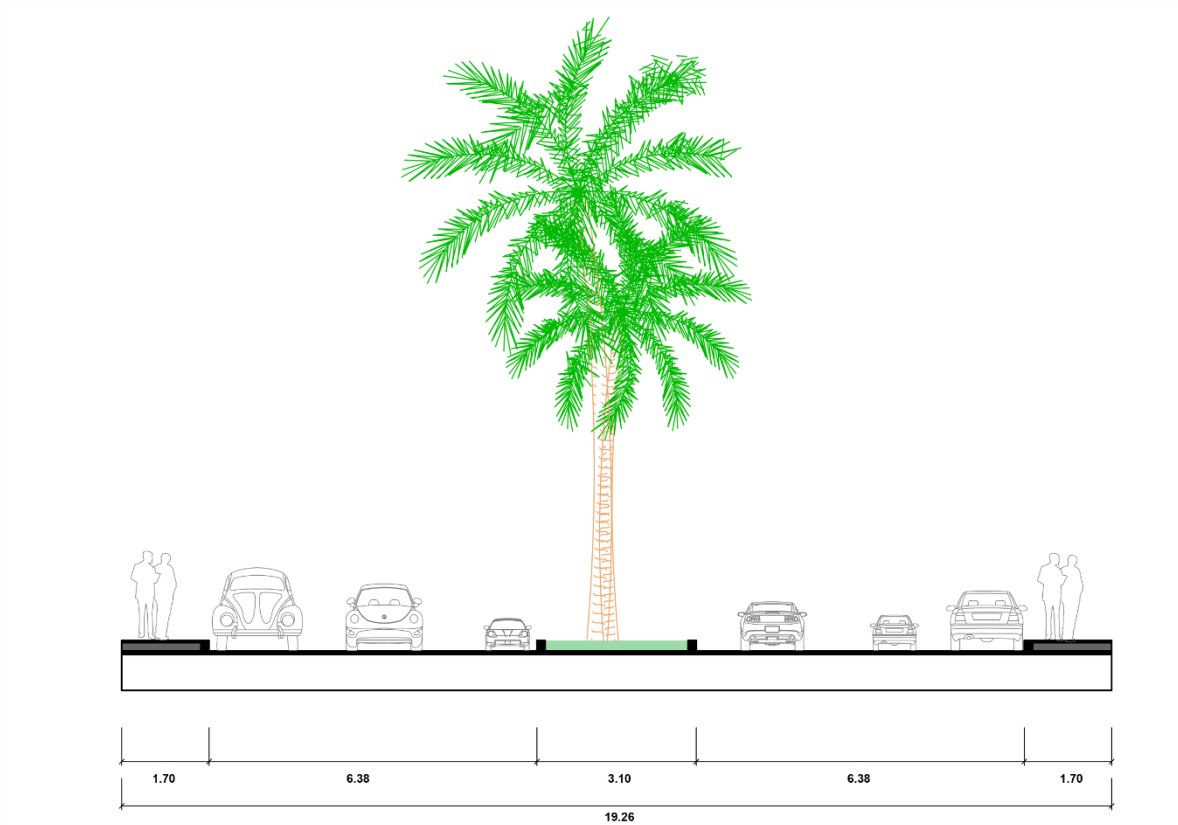


Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 7 que pertenece a la Avenida Álvaro Obregón entre la Avenida Benito Juárez y la Avenida Independencia. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

Por último, la sección 8 con orientación Oeste – Este (Fig. 47) que se ubica sobre la calle Othón P. Blanco entre la Avenida héroes y la Avenida 5 de mayo (Fig. 48) se puede establecer como una vialidad Secundaria con nivel de habitabilidad 1. Cabe mencionar que a pesar de ser una vialidad con características similares a la sección 2 y 4, la sección 8 presenta una diferencia visual en su forma, ya que esta no posee las mismas dimensiones viales, ni peatonales.

Figura 47

Sección Vial Esquemática 8



Nota: La figura muestra la sección esquemática de la Calle Othón P. Blanco entre la Avenida Héroes y la Avenida 5 de mayo. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Figura 48*Fotografía Sección Vial 8*

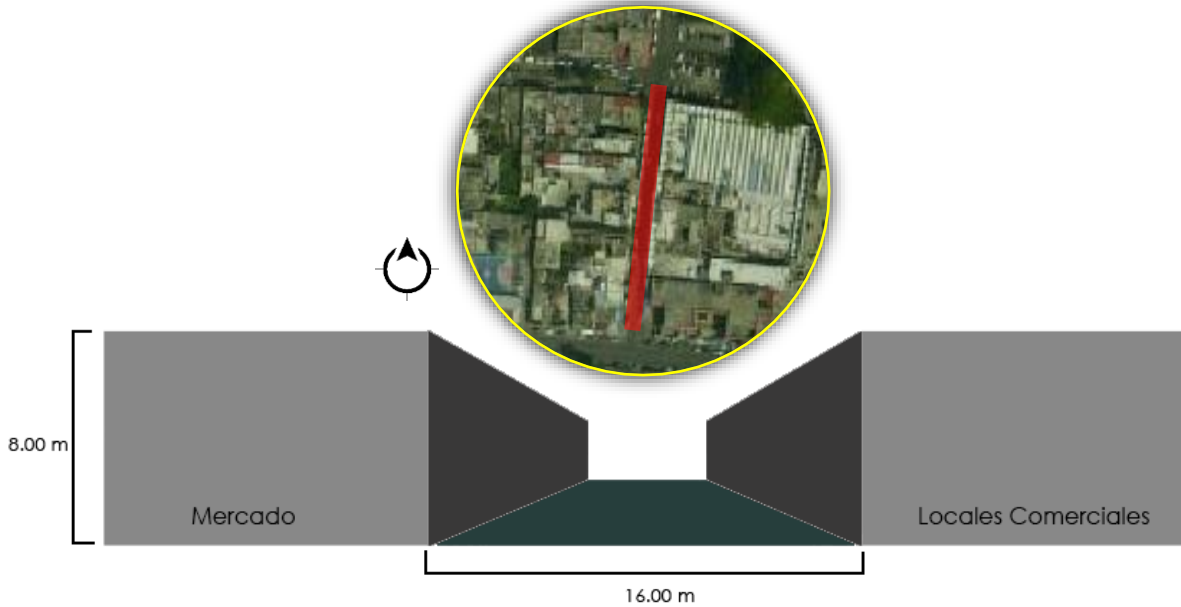
Nota: La imagen muestra el contexto real de la sección 8 que pertenece a la Calle Othón P. Blanco entre la Avenida Héroes y la Avenida 5 de mayo. Fuente: Elaboración propia durante el levantamiento de campo 04/01/2021.

5.1.2. Análisis de la Relación de Aspectos del Centro Histórico de Chetumal.

Las siguientes figuras y tablas exponen la altura máxima de los edificios (H) y el ancho (W) que posee cada una de las secciones analizadas, como también su ubicación y orientación de acuerdo con su ubicación geográfica.

Figura 49

Relación de Aspectos Sección 1



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) y la ubicación geográfica de la sección 1.

Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 3

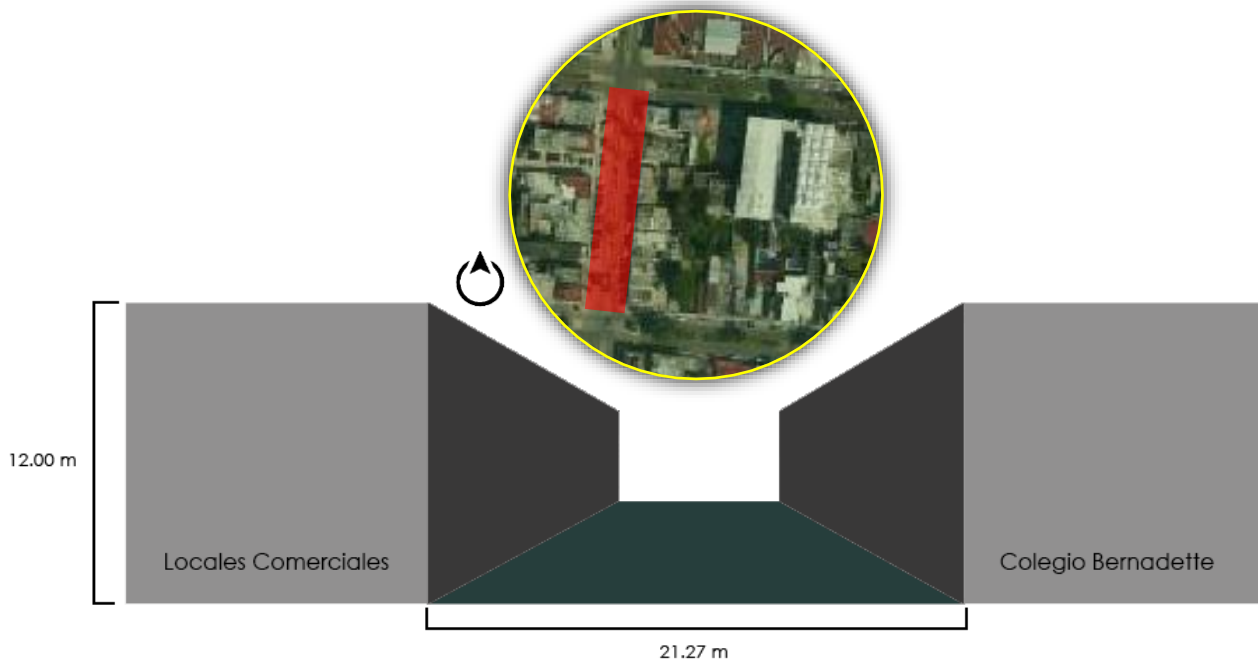
Caracterización Morfológica Sección 1

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
1	Calle Belice entre Mahatma Gandhi y Av. Efraín Aguilar	Norte – Sur	8.00 metros	16.00 metros	115.00 metros

Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 1 del sector norte del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Figura 50

Relación de Aspectos Sección 2



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) y la ubicación geográfica de la sección 2.

Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 4

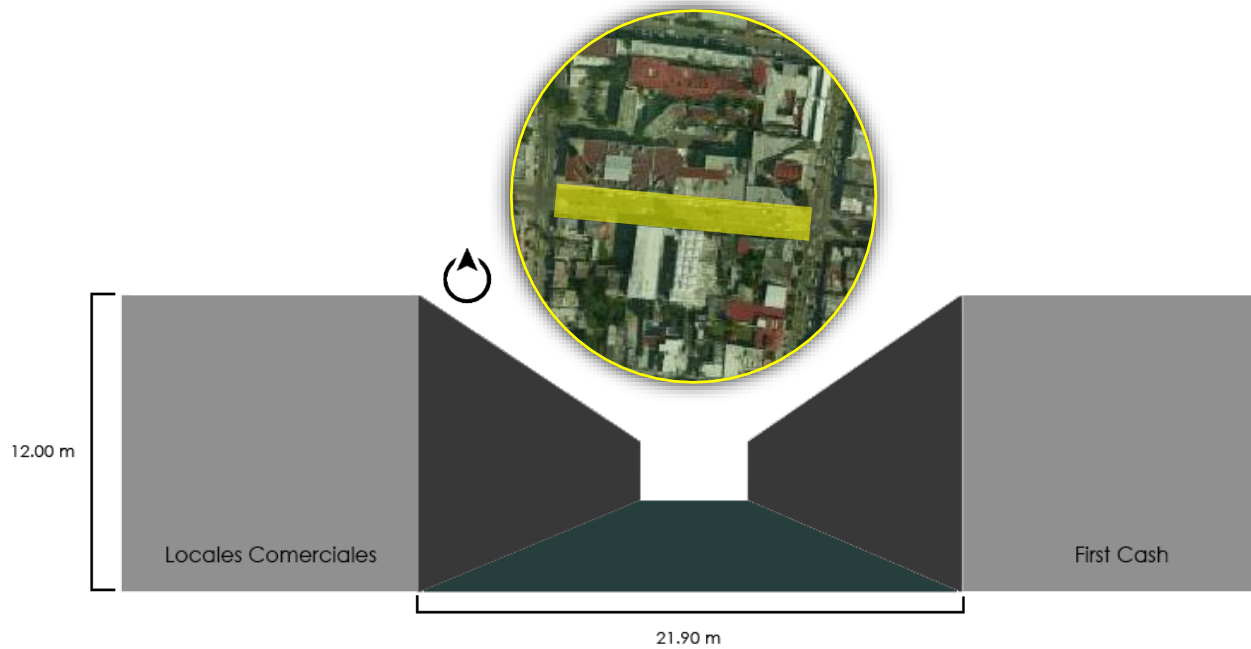
Caracterización Morfológica Sección 2

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
2	Av. Juárez entre calle Gral Plutarco E. Calles y Av. Ignacio Zaragoza	Norte – Sur	12.00 metros	21.27 metros	105.00 metros

Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 2 del sector norte del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Figura 51

Relación de Aspectos Sección 3



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) y ubicación geográfica de la sección 3.

Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 5

Caracterización Morfológica Sección 3

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
3	Calle Lázaro Cárdenas entre Av. Héroe y la Av. Juárez	Este – Oeste	12.00 metros	21.90 metros	173.00 metros

Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 3 del sector norte del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Figura 52

Relación de Aspectos Sección 4



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) de la sección 4. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 6

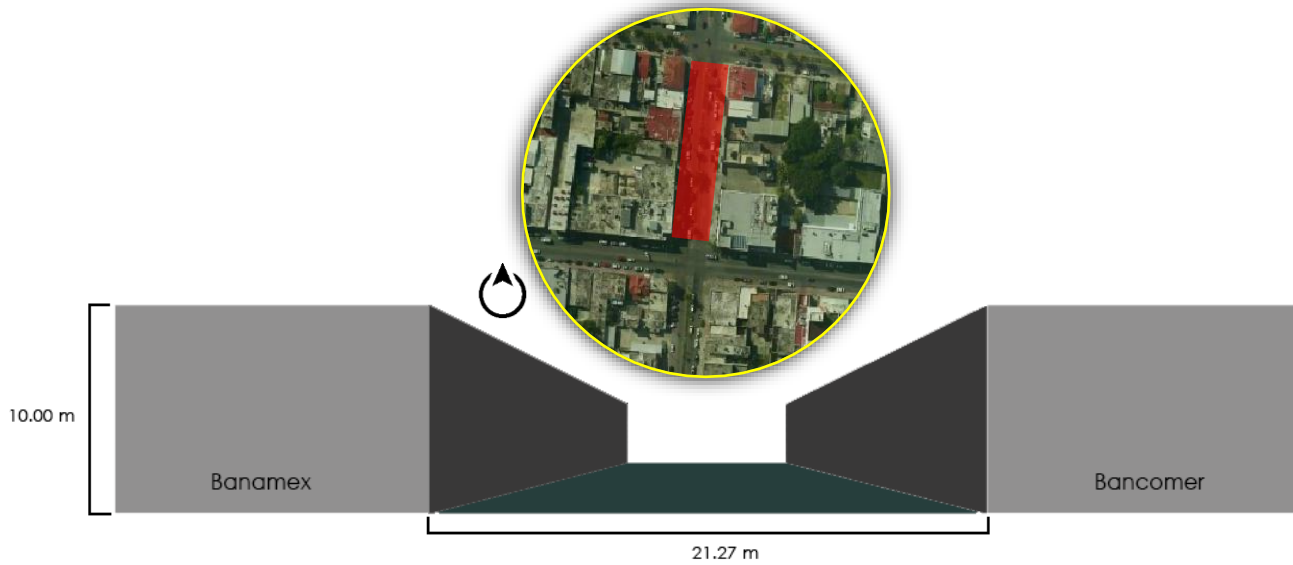
Caracterización Morfológica Sección 4

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
4	Calle Plutarco E. Calles entre Av. Héroes y Av. Juárez	Este – Oeste	6.00 metros	23.06 metros	163.00 metros

Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 4 del sector norte del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Figura 53

Relación de Aspectos Sección 5



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) de la sección 5. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 7

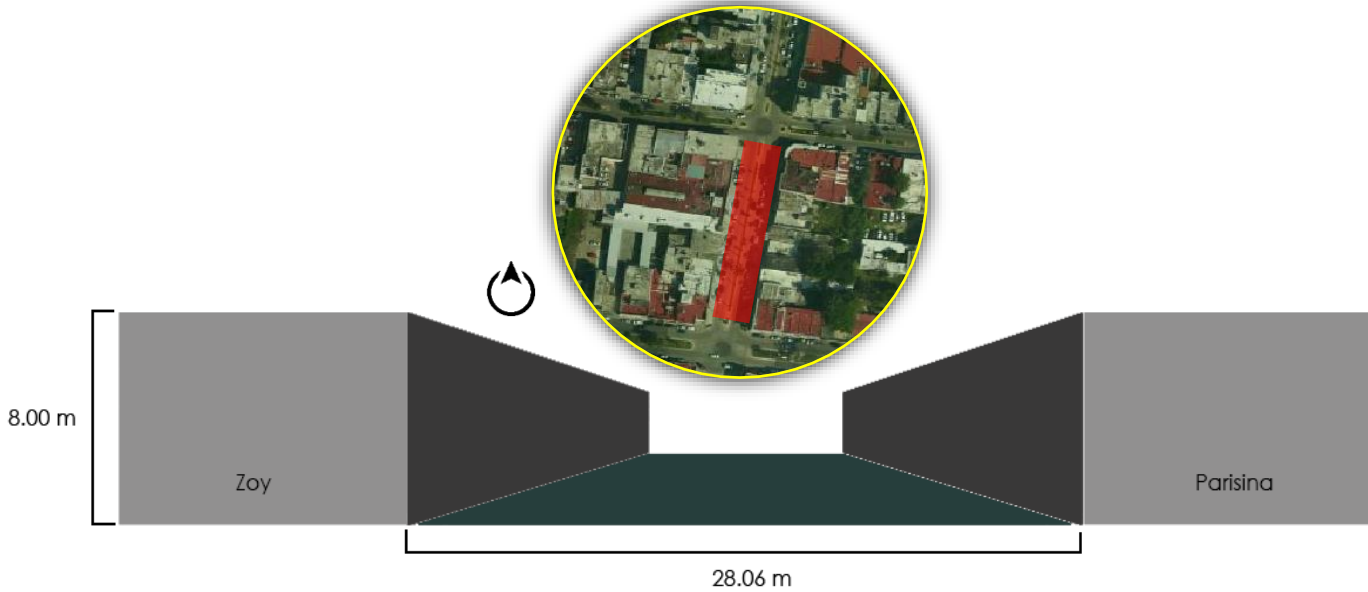
Caracterización Morfológica Sección 5

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
5	Av. Juárez entre la Av. Obregón y calle Othón P. Blanco	Norte – Sur	10.00 metros	21.27 metros	105.00 metros

Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 5 del sector sur del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Figura 54

Relación de Aspectos Sección 6



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) de la sección 6. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 8

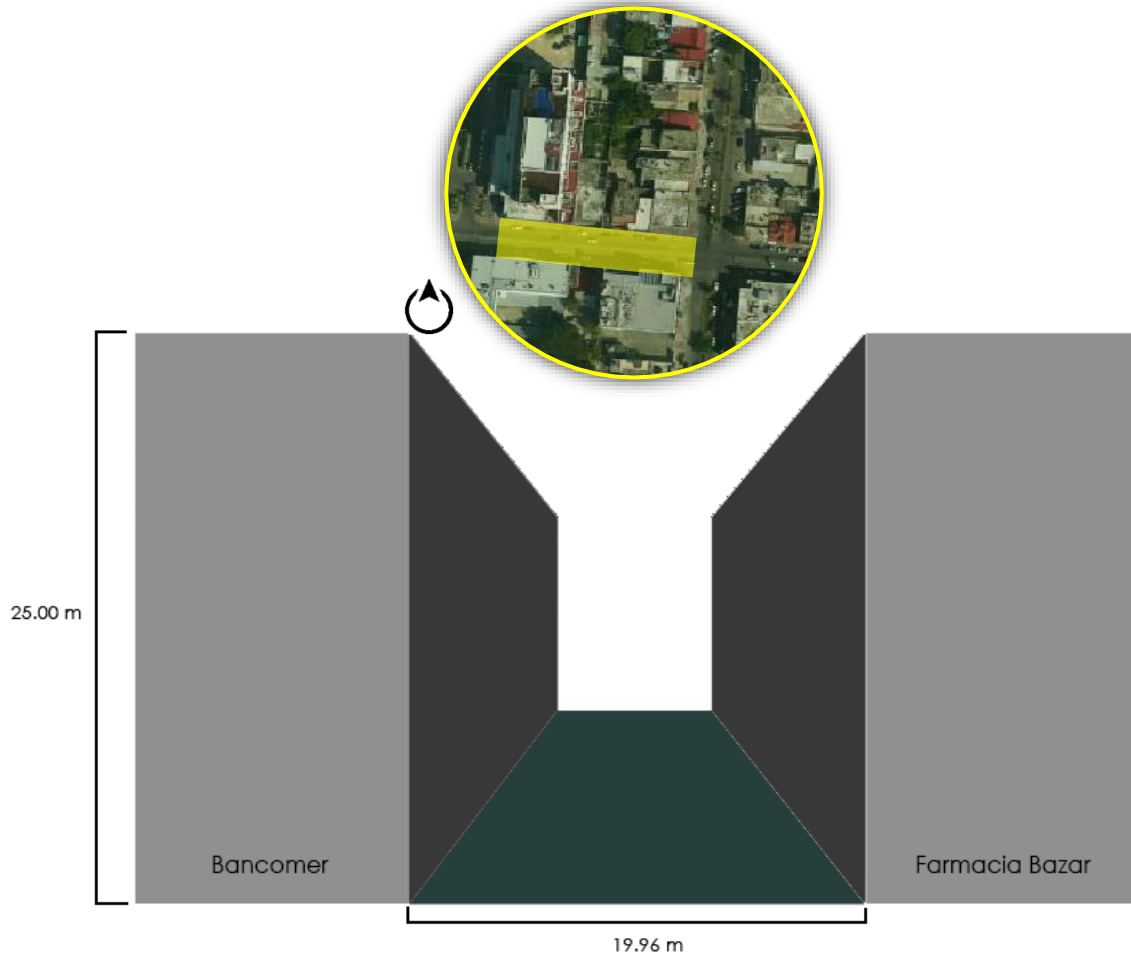
Caracterización Morfológica Sección 6

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
6	Av. Héroes entre la calle Othón P. Blanco y Av. Carmen Ochoa de Merino	Norte – Sur	8.00 metros	28.06 metros	112.00 metros

Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 6 del sector sur del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Figura 55

Relación de Aspectos Sección 7



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) de la sección 7. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 9

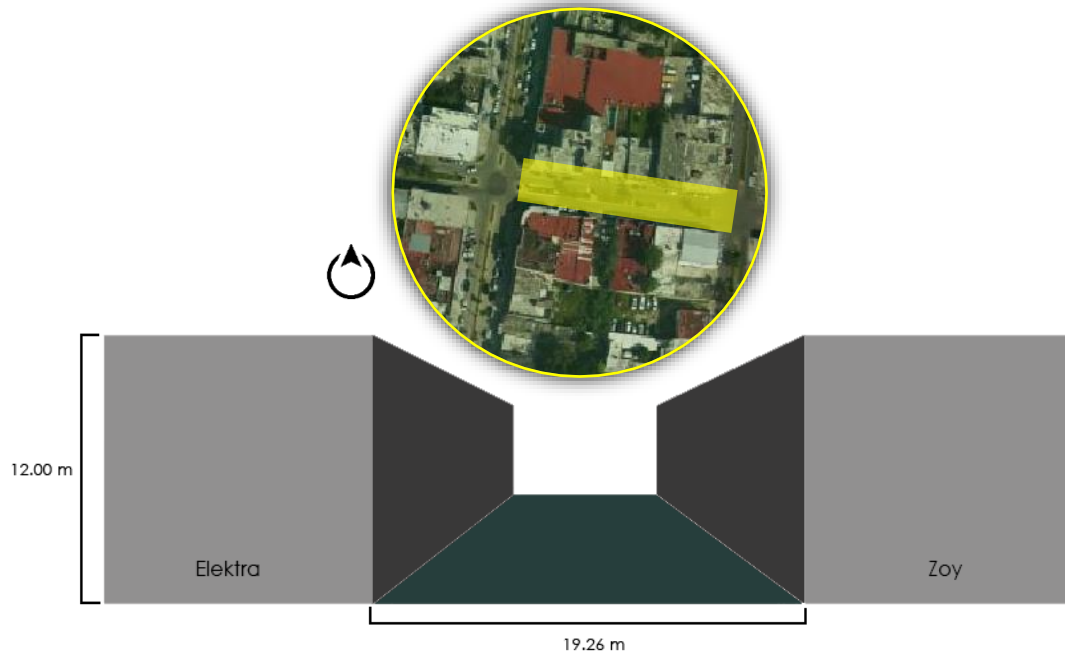
Caracterización Morfológica Sección 7

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
7	Av. Obregón entre Av. Juárez y Av. Independencia	Este – Oeste	25.00 metros	19.96 metros	100.00 metros

Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 7 del sector sur del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Figura 56

Relación de Aspectos Sección 8



Nota: La figura muestra la altura máxima (H) y el ancho de (w) de la sección 8. Fuente: Figura de elaboración propia a partir del levantamiento de campo.

Tabla 10

Caracterización Morfológica Sección 8

Sección	Ubicación	Orientación	Relación de Aspectos		Profundidad (Largo)
			Altura Máxima (H)	Ancho (w)	
8	Calle Othón P. Blanco entre la Av. Héroes y Av. 5 de mayo	Oeste – Este	12.00 metros	19.26 metros	92.00 metros

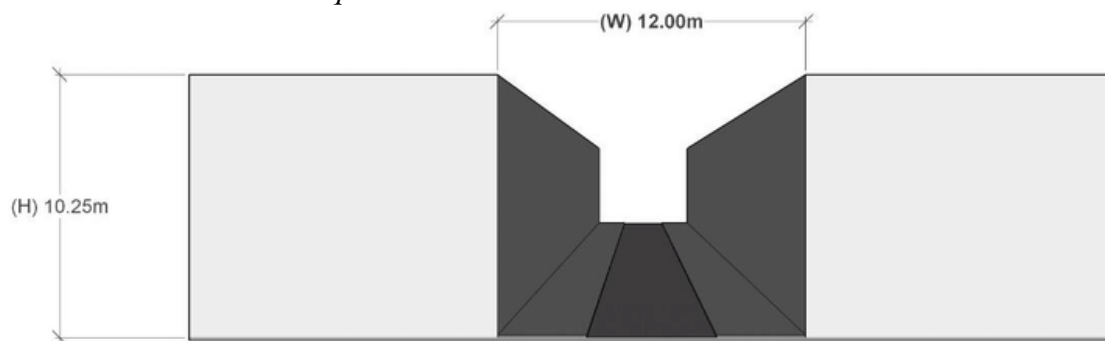
Nota: La tabla muestra la caracterización morfológica de la sección 8 del sector sur del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir del levantamiento y visita de campo.

Así pues, el levantamiento permitió obtener información para caracterizar y definir; la disposición, forma y altura de los edificios ubicados en las secciones viales seleccionadas del primer cuadro urbano de la ciudad de Chetumal, que de acuerdo a la clasificación realizada por Vardoulakis *et al* (2003), el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal de manera general presenta cañones asimétricos, ya que sus edificios particularmente poseen una diferencia significativa en alturas.

Cabe mencionar que las ciudades, se moldean a partir de cañones urbanos²⁶, tal como se indica en la figura 57, que configuran la estructura urbana, la cual, en algunos casos perjudica el libre flujo de aire disminuyendo la ventilación, asimismo se puede mencionar que la estructura urbana también retiene contaminantes por la reducida ventilación ocasionando niveles inadecuados de calidad de aire perjudicando la salud del ser humano.

Figura 57

Cañón Urbano Esquemático



Nota: La imagen muestra de forma esquemática la configuración de un cañón urbano. Fuente: Imagen obtenida y editada a partir de (Nicholson, 1975).

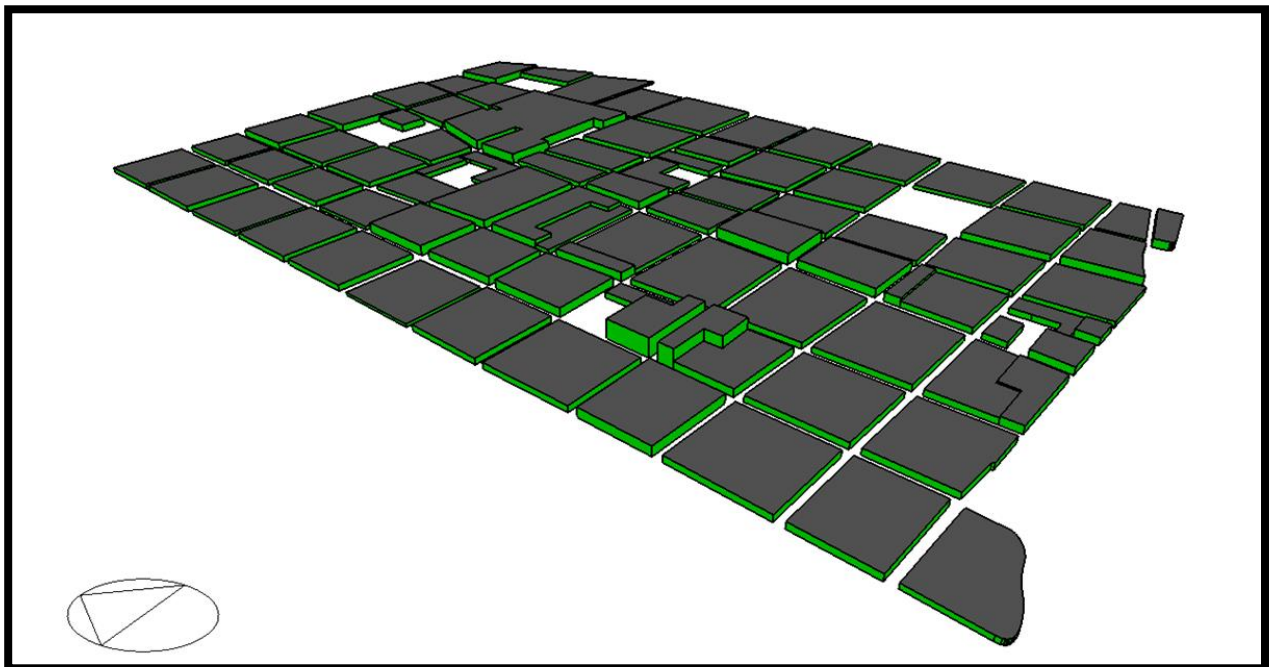
²⁶ El espacio entre edificios que se ordenan continuamente a lo largo de una vialidad; se conoce como cañón urbano. Sin embargo, el término se utiliza de manera más amplia, categorizando los detalles geométricos del cañón, considerando una relación de aspectos; la altura del cañón (H) y el ancho del cañón (W) (Nicholson, 1975).

5.2. CFD - Centro Histórico de la ciudad de Chetumal

La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) del Design Builder v6; permitió, analizar y evaluar de manera efectiva y detallada el comportamiento del viento en el Centro Histórico de Chetumal, a partir de un modelo asimétrico 3D del área, como se muestra en la figura 58. Asimismo, para determinar la información acerca de la velocidad del viento anual en Chetumal se empleó la gráfica de viento del Climate Consultant 6.0 (Fig. 59), la cual establece que la velocidad del viento promedio anual en Chetumal ronda entre los 10 y 13 m/s aproximadamente, provenientes del Sureste con dirección 135° (Cámara *et al.*, 2020).

Figura 58

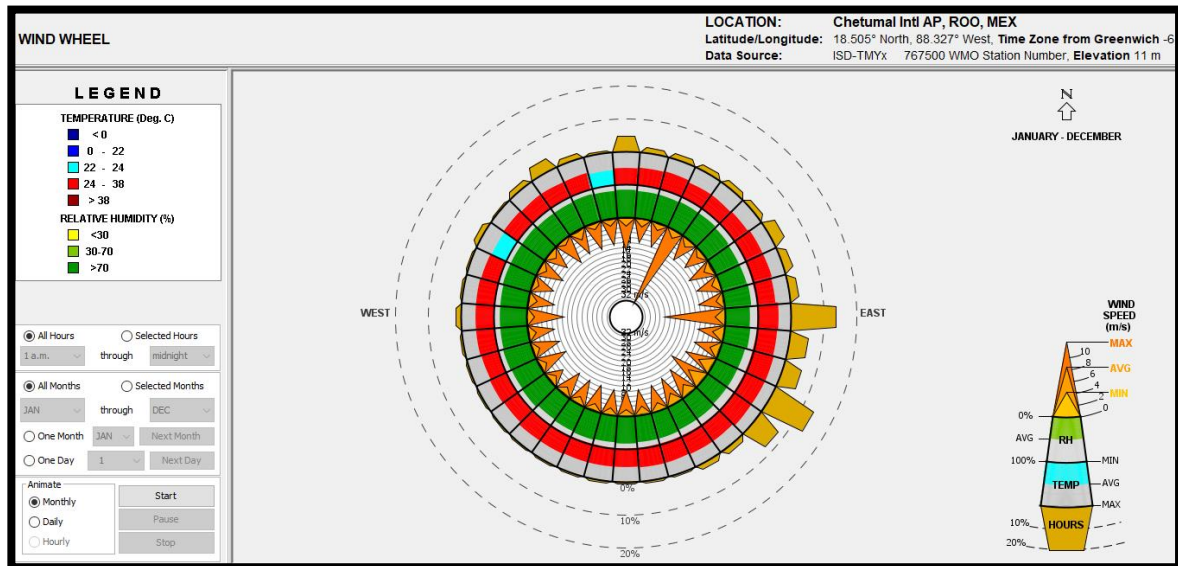
Levantamiento 3D del Centro Histórico de Chetumal Design Buidler v6



Nota: La imagen muestra el levantamiento volumétrico del Centro Histórico de Chetumal Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación en el Design Builder v6.

Figura 59

Wind Wheel Chetumal



Nota: La imagen muestra la velocidad (m/s) promedio anual del viento en la ciudad de Chetumal. Fuente:

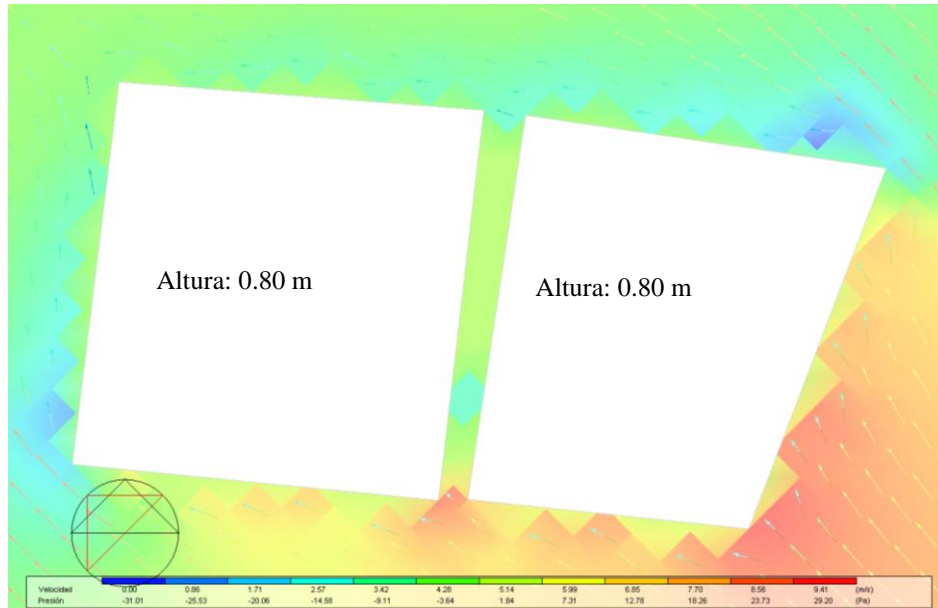
Imagen de elaboración propia a partir de Climate Consultant 6.0.

5.3. Análisis de Resultados - Estudios de Caso

La simulación CFD de los estudios de caso, posibilitan la comprensión de los rangos de velocidad en la que el viento circula en las secciones viales; permitiendo también hacer un análisis de los efectos del viento en el usuario como en el entorno urbano de acuerdo con las escalas de Beaufort. Las siguientes figuras y tablas muestran el nivel de velocidad que alcanza el viento de manera individual como también los fenómenos que provoca en las secciones viales seleccionadas.

Figura 60

Simulación CFD - Sección Vial 1



Nota: La

imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 1 - sector norte que pertenece a la Avenida Belice entre Mahatma Gandhi y Efraín Aguilar del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Tabla 11

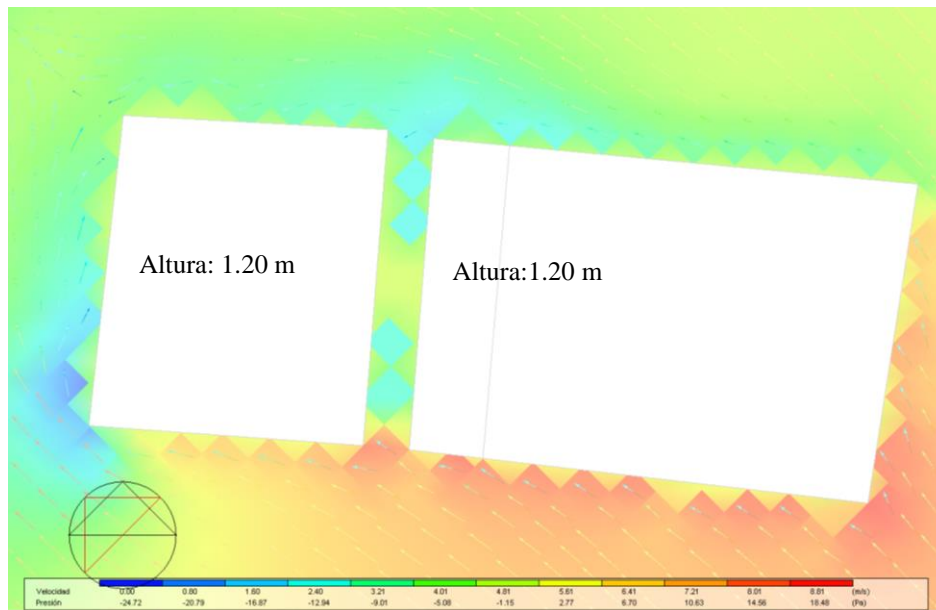
Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SVI

Sección	Sitio		Descripción	Beaufort		Efectos
	Velocidad			Velocidad		
	m/s			m/s	km/h	
1	2.57 – 5.14		Brisa Ligera - Suave	1.6 – 5.4	5.8 – 19.4	El aire fresco se siente en la cara, el cabello se mueve, la ropa se agita e inicia la incomodidad. Murmullo y movimiento de hojas y ramitas, ligera extensión de banderas y risos en el agua.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 1 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

Figura 61

Simulación CFD - Sección Vial 2



Nota: La imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 2 - sector norte que pertenece a la Avenida Benito Juárez entre P. Elisa Calles e Ignacio Zaragoza del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Tabla 12

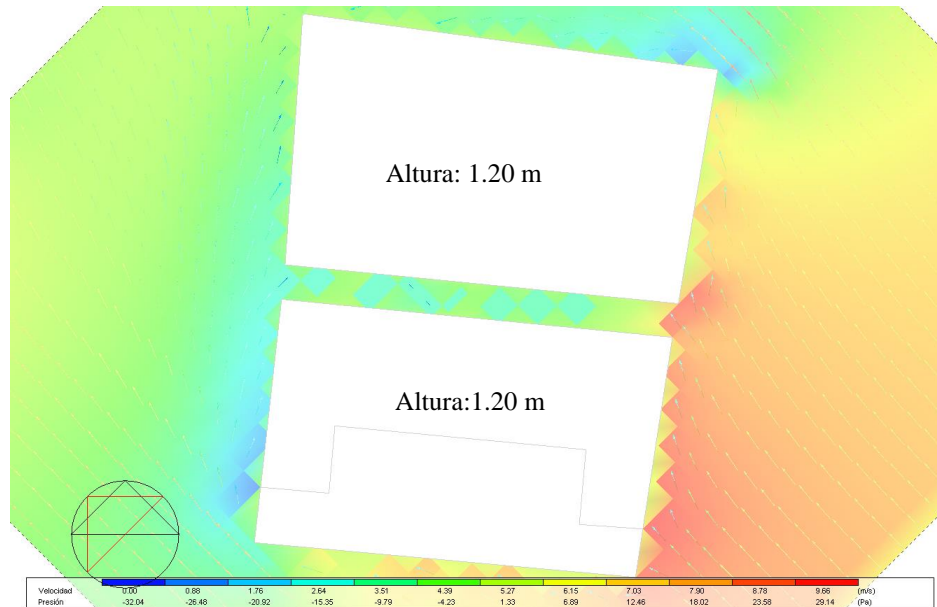
Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV2

Sección	Sitio		Descripción	Beaufort		Efectos
	Velocidad			Velocidad		
	m/s			m/s	km/h	
2	2.40 – 5.61		Brisa Ligera – Suave - Moderada	1.6 – 7.9	5.8 – 28.4	El aire fresco se siente en la cara, el cabello se mueve, la ropa se agita e inicia la incomodidad, el cabello se despeina. Murmullo y movimiento de hojas y ramitas, ligera extensión de banderas y risos en el agua. El polvo y la arena se levanta y los objetos ligeros como el papel vuelan.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 2 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

Figura 62

Simulación CFD – Sección Vial 3



Nota: La imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 3 - sector norte que pertenece a la Avenida Lázaro Cárdenas entre Héroes y Benito Juárez del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Tabla 13

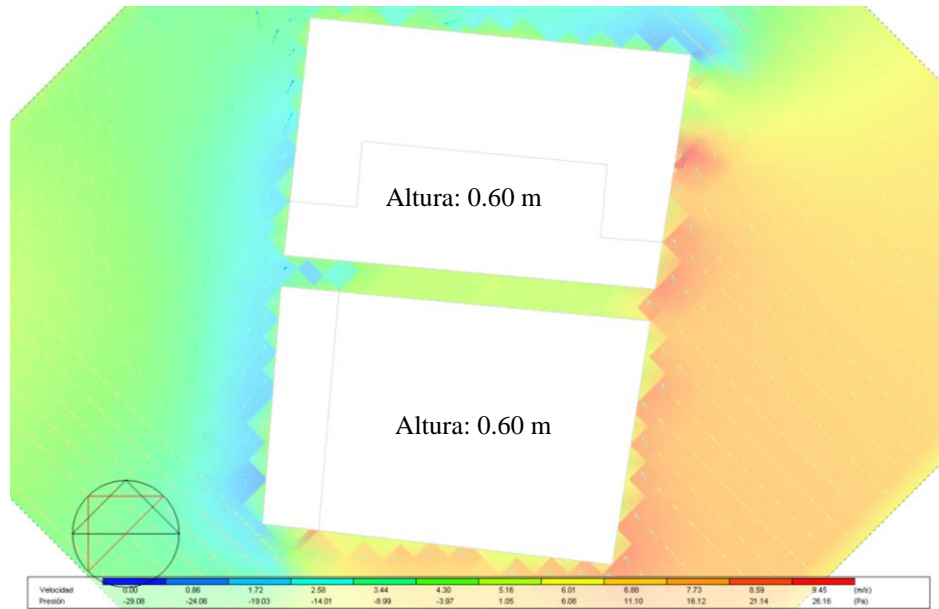
Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV3

Sección	Sitio		Descripción	Beaufort		Efectos
	Velocidad			Velocidad		
	m/s			m/s	km/h	
3	2.64 – 6.15		Brisa Ligera – Suave - Moderada	1.6 – 7.9	5.8 – 28.4	El aire fresco se siente en la cara, el cabello se mueve, la ropa se agita e inicia la incomodidad, el cabello se despeina. Murmullo y movimiento de hojas y ramitas, ligera extensión de banderas y risos en el agua. El polvo y la arena se levanta y los objetos ligeros como el papel vuelan.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 3 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

Figura 63

Simulación CFD – Sección Vial 4



Nota: La imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 4 - sector norte que pertenece a la calle P. Elías Calles entre Héroes y Benito Juárez del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Tabla 14

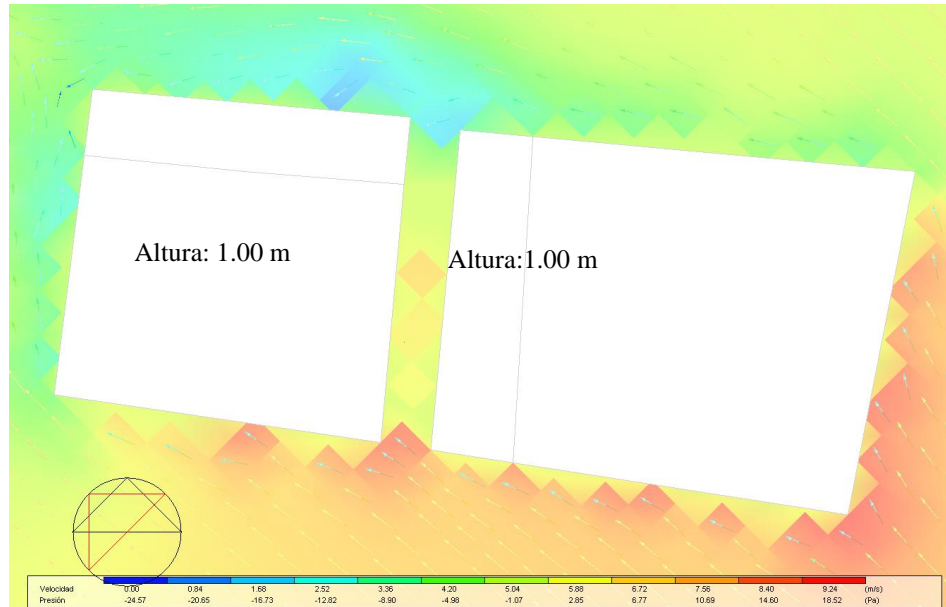
Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV4

Sección	Sitio		Beaufort		Efectos
	Velocidad m/s	Descripción	Velocidad m/s	km/h	
4	0.86 – 6.1	Aire Ligero - Brisa Ligera – Suave – Moderada	0.6 – 7.9	2.2 – 28.4	El movimiento del aire apenas percibido, el aire fresco se siente en la cara, el cabello se mueve, la ropa se agita e inicia la incomodidad, el cabello se despeina. Se mueve el humo, pero no las veletas. Murmullos y movimiento de hojas y ramitas, ligera extensión de banderas y risos en el agua. El polvo y la arena se levanta y los objetos ligeros como el papel vuelan.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 4 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

Figura 64

Simulación CFD – Sección Vial 5



Nota: La imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 5 - sector sur que pertenece a la Avenida Benito Juárez entre Álvaro Obregón y Othón P. Blanco del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Tabla 15

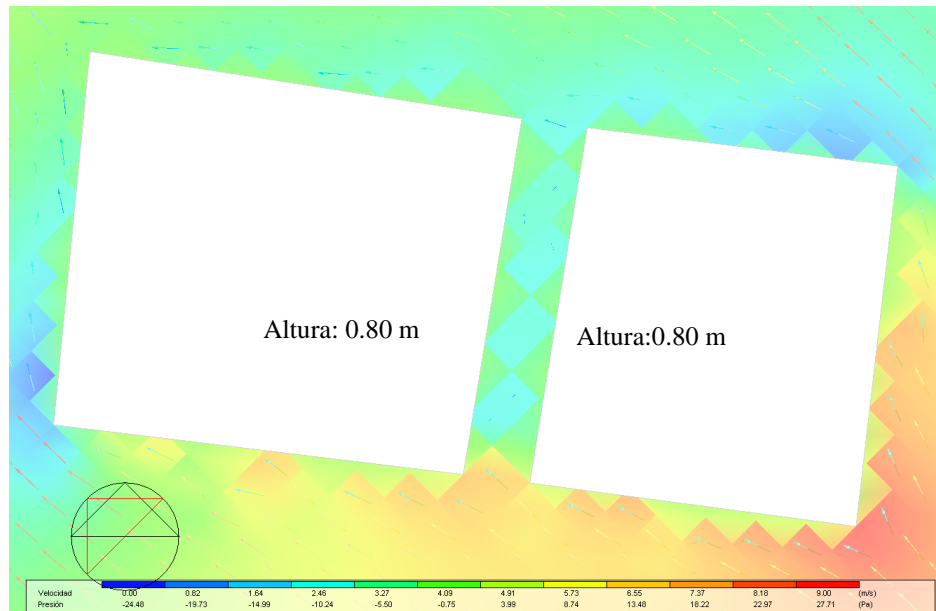
Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV5

Sección	Sitio		Beaufort		Efectos
	Velocidad m/s	Descripción	Velocidad m/s	km/h	
5	4.20 – 8.40	Brisa Suave - Moderada - Viento Fuerte	3.4 – 10.7	12.2 – 38.5	El cabello se mueve y despeina, la ropa se agita, empieza la incomodidad, la fuerza del viento incomoda el cuerpo. Las ramas, hojas y banderas se mueven ligeramente. El polvo y la arena se extiende y los papeles vuelan. Los árboles con follaje empiezan a ladearse, el polvo es impulsado y extiende ondas.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 5 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

Figura 65

Simulación CFD – Sección Vial 6



Nota: La imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 6 - sector sur que pertenece a la Avenida Héroes entre Othón P. Blanco y Carmen Ochoa de Merino del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Tabla 16

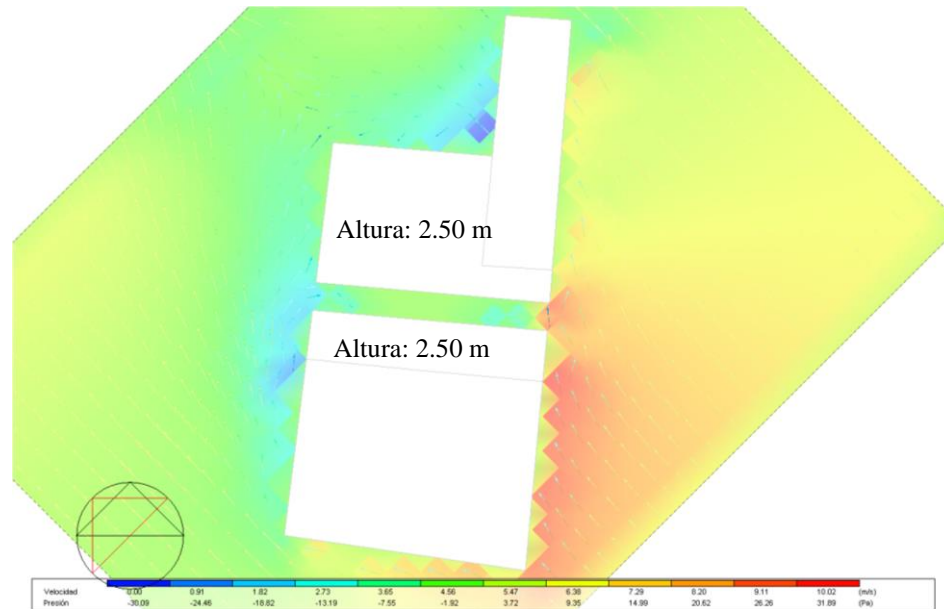
Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV6

Sección	Sitio		Beaufort		Efectos
	Velocidad m/s	Descripción	Velocidad m/s	km/h	
6	2.46 – 5.73	Brisa Ligera - Suave – Moderada	1.6 – 7.9	5.8 – 28.4	El aire fresco se siente en la cara, el cabello se mueve, la ropa se agita e inicia la incomodidad, el cabello se despeina. Murmullo y movimiento de hojas y ramitas, ligera extensión de banderas y risos en el agua. El polvo y la arena se levanta y los objetos ligeros como el papel vuelan.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 6 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

Figura 66

Simulación CFD – Sección Vial 7



Nota: La imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 7 - sector sur que pertenece a la Avenida Álvaro Obregón entre Benito Juárez e Independencia del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Tabla 17

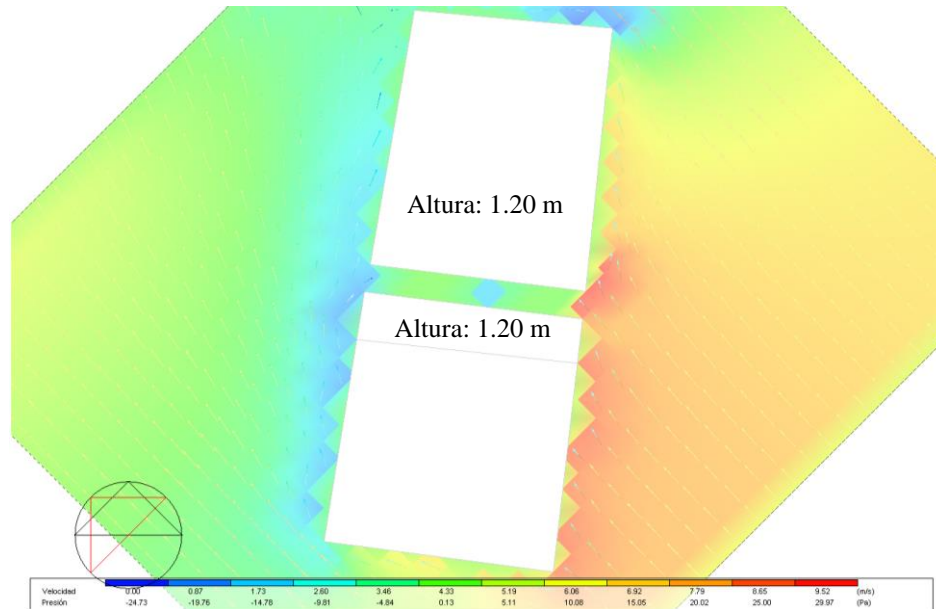
Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV7

Sección	Sitio		Beaufort		Efectos
	Velocidad m/s	Descripción	Velocidad m/s	km/h	
7	2.73 – 6.38	Brisa Ligera - Suave – Moderada	1.6 – 7.9	5.8 – 28.4	El aire fresco se siente en la cara, el cabello se mueve, la ropa se agita e inicia la incomodidad, el cabello se despeina. Murmullo y movimiento de hojas y ramitas, ligera extensión de banderas y risos en el agua. El polvo y la arena se levanta y los objetos ligeros como el papel vuelan.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 7 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

Figura 67

Simulación CFD – Sección Vial 8



Nota: La imagen muestra el comportamiento del viento en la sección vial 8 - sector sur que pertenece a la calle Othón P. Blanco entre Héroes y 5 mayo del Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6

Tabla 18

Rangos en la Velocidad del Viento (m/s) y sus Efectos – SV8

Sección	Sitio		Beaufort		Efectos
	Velocidad m/s	Descripción	Velocidad m/s	km/h	
8	2.60 – 6.06	Brisa Ligera - Suave – Moderada	1.6 – 7.9	5.8 – 28.4	El aire fresco se siente en la cara, el cabello se mueve, la ropa se agita e inicia la incomodidad, el cabello se despeina. Murmullo y movimiento de hojas y ramitas, ligera extensión de banderas y risos en el agua. El polvo y la arena se levanta y los objetos ligeros como el papel vuelan.

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad (m/s) que alcanza el viento en la sección 8 a partir de la simulación CFD, como también una comparación con las escalas de Beaufort y sus efectos. Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de la simulación CFD Design Builder v6.

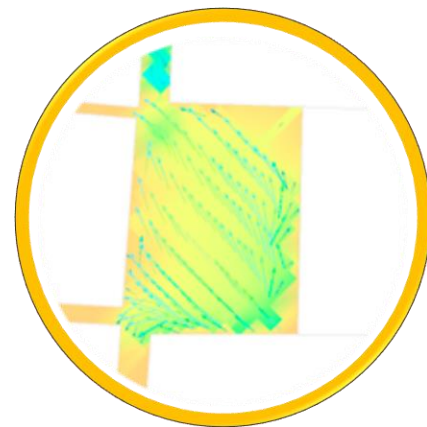
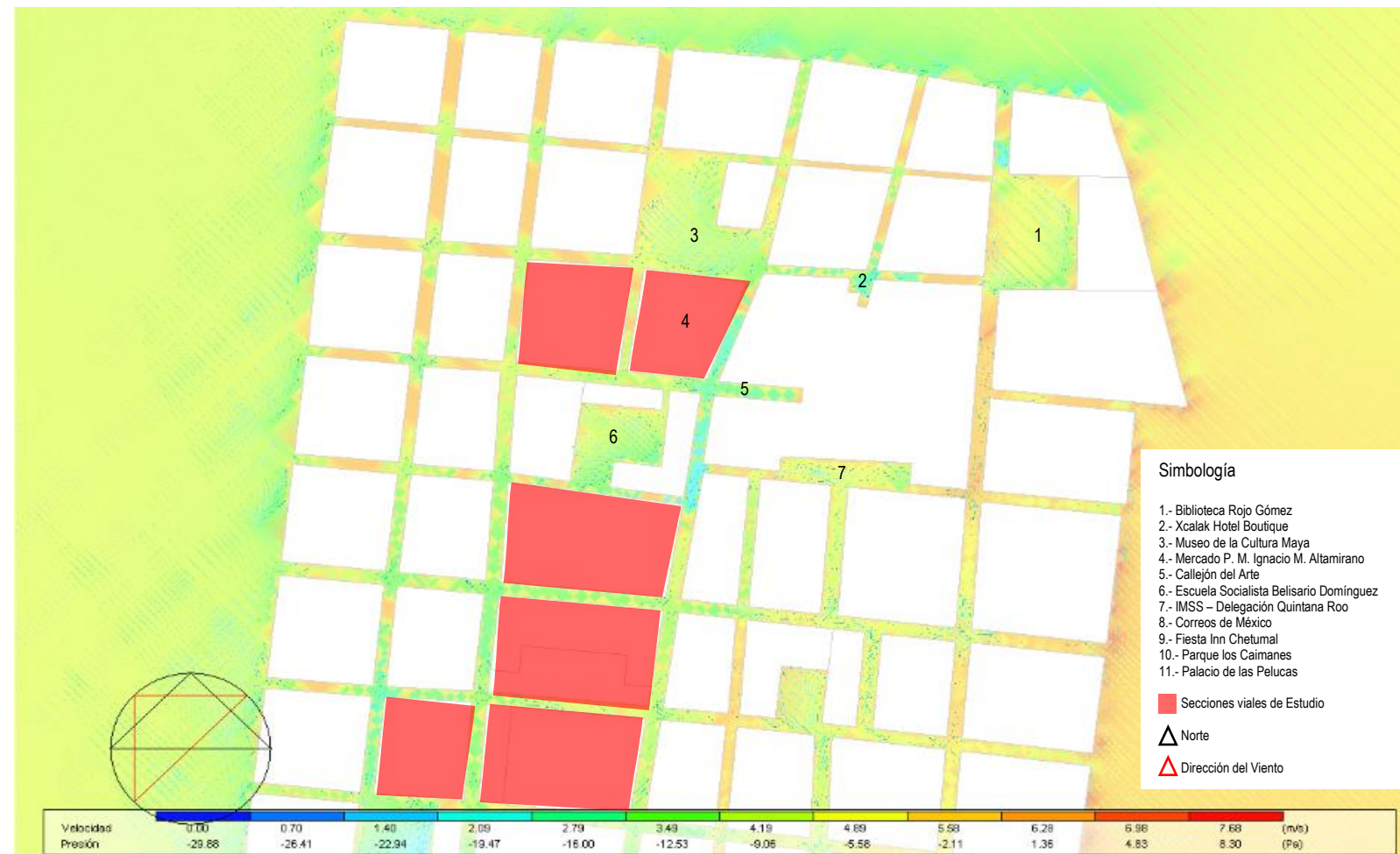
Los resultados de las simulaciones CFD en los casos de estudio del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal, demuestran que los rangos respecto al viento en la zona oscilan entre los 0.6 y los 10.7 m/s, lo quiere decir que el viento alcanza una velocidad entre los 2.2 y los 38.5 km/h. En cuanto a los efectos, estos se pueden establecer como un aire que apenas se percibe, pero también la fuerza del viento puede llegar a incomodar al usuario que circula en el espacio urbano. Asimismo, se puede percibir como la fuerza del viento ladea los árboles con follaje. Cabe mencionar, que la acción del viento en la simulación CFD de los sectores seleccionados, tienen un comportamiento particular, ya que, no se puede observar algún fenómeno relacionado con el efecto Venturi. Lo que puede determinar que la disposición de los edificios en las secciones seleccionadas interfieren en el comportamiento del viento perjudicando su flujo natural, sin embargo, se puede precisar que de acuerdo a los rangos de velocidad que establece Beaufort; las secciones seleccionadas del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal se encuentran en una escala adecuada, ya que la acción del viento varía entre un aire ligero y un viento fuerte que provocan principios de incomodidad del usuario en el espacio urbano.

No obstante, para estudiar de manera precisa el comportamiento y los fenómenos que causa la acción del viento se debe considerar la simulación completa del sector o área específica a intervenir. De esta manera se puede observar y establecer concretamente los fenómenos que origina la acción del viento en la ciudad.

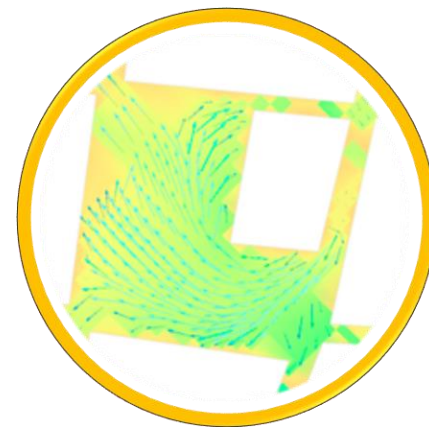
Las siguientes figuras muestran, los fenómenos que el viento provoca al correr a través de las secciones viales del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal.

Figura 68

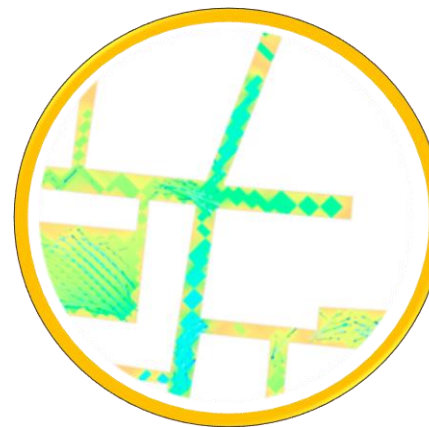
Simulación CFD Sector Norte



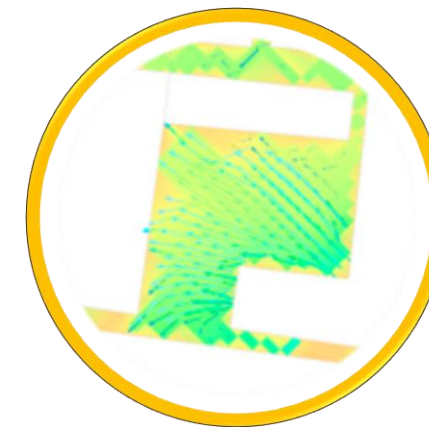
1.- Biblioteca Rojo Gómez
Efecto Rodillo



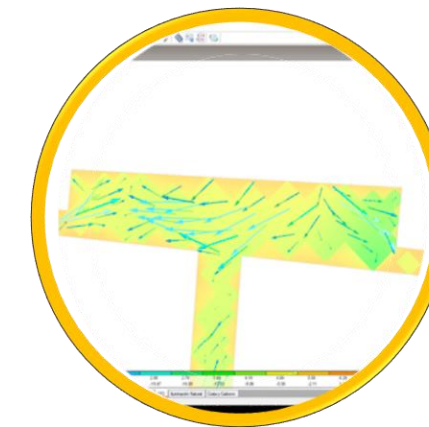
3.- Museo de la Cultura Maya
Efecto Esquina



5.- Callejón del Arte
Efecto Aceleración
(Venturi)



6.- Escuela Soc. Belisario Domínguez
Efecto Rodillo - Esquina

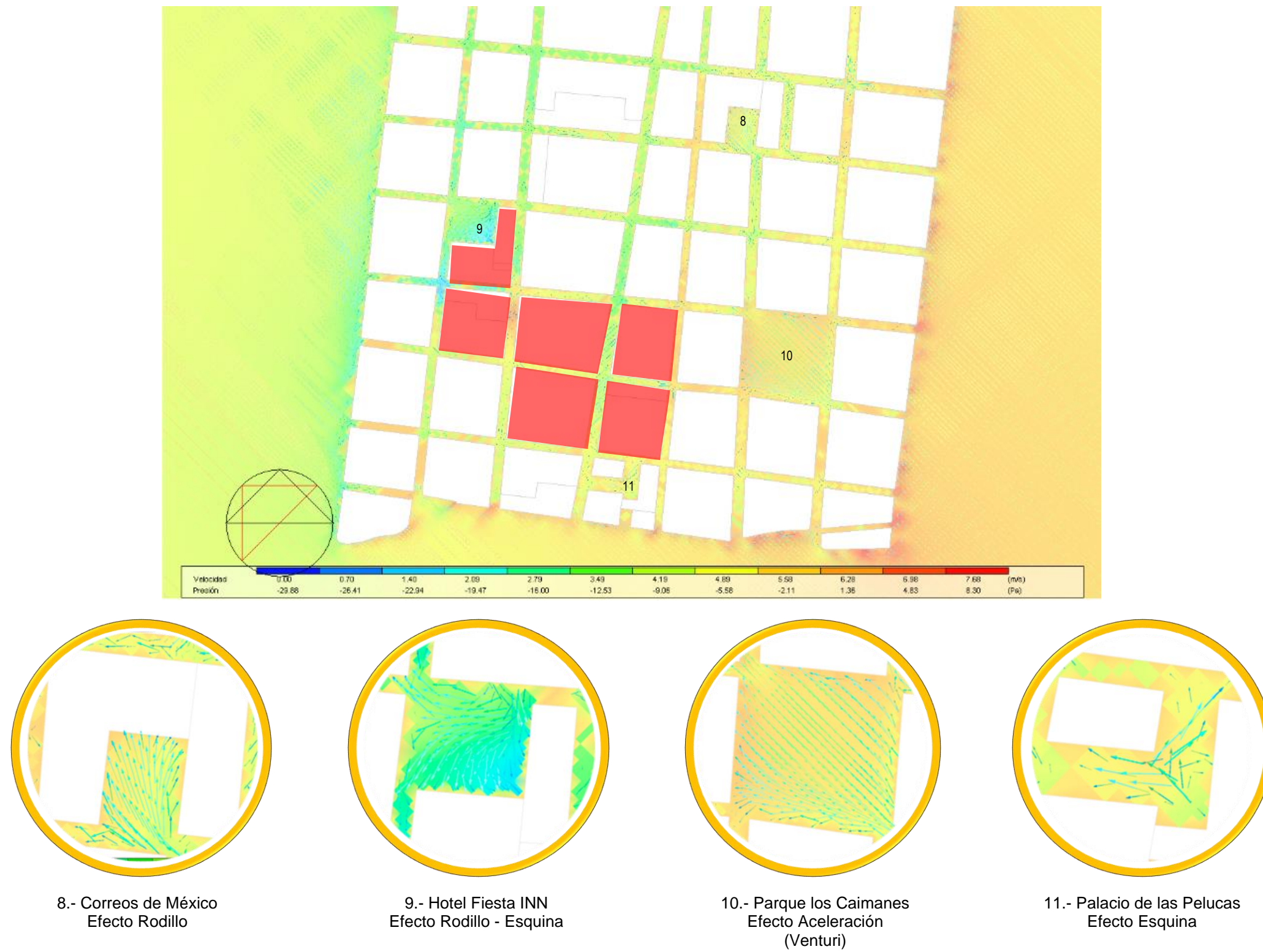


7.- IMSS – Delegación Quintana Roo
Efecto Rodillo

Nota: La imagen muestra los fenómenos que provoca la acción del viento y comportamiento del viento en las secciones viales el Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder v6.

Figura 69

Simulación CFD Sector Sur



Nota: La imagen muestra los fenómenos que provoca la acción del viento y comportamiento del viento en las secciones viales el Centro Histórico de Chetumal. Fuente: Imagen de elaboración propia a partir de la simulación CFD en el Design Builder

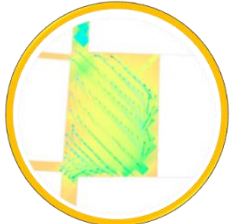
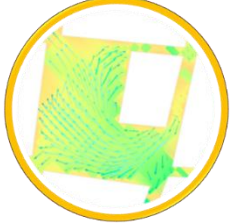


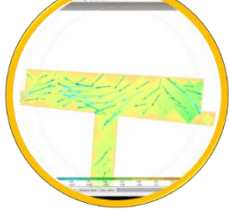
La simulación CFD del Centro Histórico de Chetumal establece que la velocidad anual que alcanza el viento es de 7.68 m/s, esto permite definir que la acción del viento de acuerdo con la escala de Beaufort posee un rango de Brisa moderada con vientos que corren aproximadamente en los 28.4 km/h. Asimismo, la simulación CFD del Centro Histórico de Chetumal, permitió identificar fenómenos como el efecto esquina, rodillo y el efecto de aceleración (Venturi), en zonas particulares del Centro Histórico de Chetumal (Tabla 19) . Cabe mencionar que dichos fenómenos se presentan debido a las características morfológicas del sitio o de los edificios del lugar, como es el caso del museo de la cultura maya, el cual se encuentra aislado en una plazoleta que funge como sitio de libre circulación del aire, permitiendo así provocar el efecto esquina, algo semejante acontece en el estacionamiento de servicios del Hotel Fiesta Inn. Por otra parte, el efecto rodillo se puede observar claramente en varias zonas del Centro Histórico, como, por ejemplo; en la zona donde se ubica en la Biblioteca Javier Rojo Gómez entre el Sistema Quintanarroense de Comunicación social y SQCS Chetumal FM100.9, así mismo ocurre en las inmediaciones de la Delegación Quintanarroense del IMSS y en la plazoleta que se encuentra en Telecomm-Telégrafos y Correos de México. Dicho fenómeno también se puede observar dentro de las instalaciones de la escuela socialista Belisario Domínguez y en el Estacionamiento a un costado del Palacio de las Pelucas.

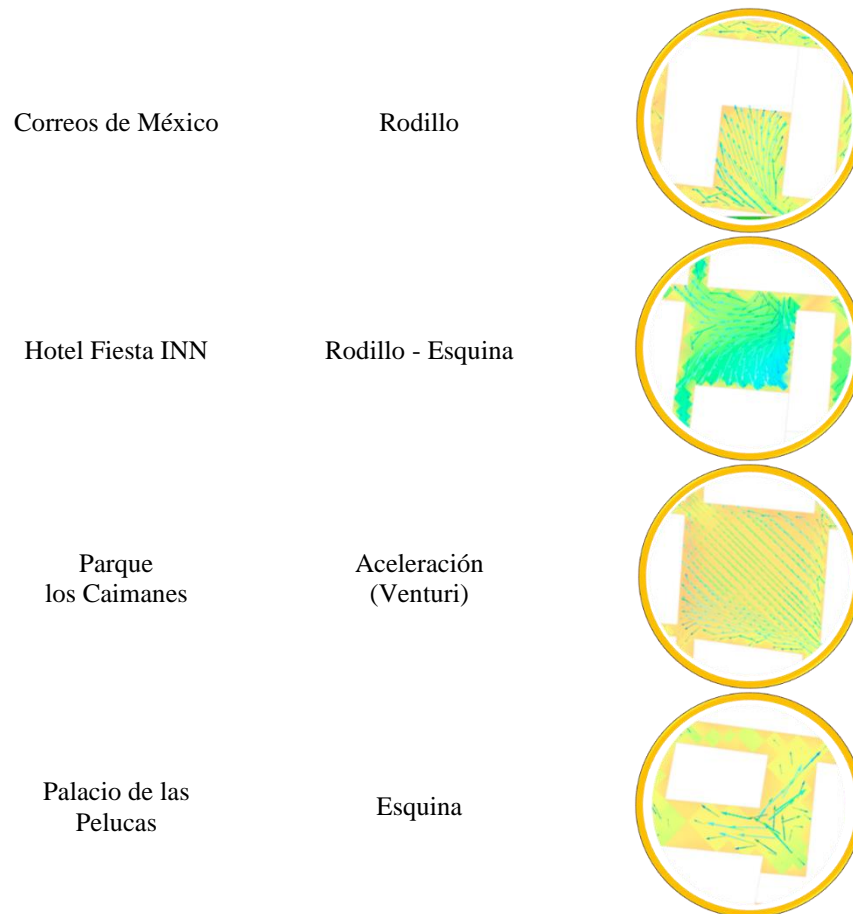
Ahora bien, el fenómeno de Aceleración o Efecto Venturi sucede en la mayor parte de las vialidades del Centro Histórico de Chetumal, dicha manifestación se puede observar en la Avenida Héroes esquina Efraín Aguilar, entre el Mercado Ignacio Manuel Altamirano y la plaza donde se ubica el Callejón del Arte, y en el Parque los Caimanes. Esto se debe principalmente a las características de forma que tienen los edificios, pero principalmente a la orientación que

posee el Centro Histórico de Chetumal dentro de la ciudad en conjunto a las dimensiones con las que disponen las secciones viales de la zona.

Tabla 19

Efectos del Viento en el Centro Histórico de Chetumal

Lugar Ubicación	Efecto	Ilustración
Biblioteca Rojo Gómez	Rodillo	
Museo de la Cultura Maya	Esquina	
Callejón del Arte	Aceleración (Venturi)	
Esc. Soc. Belisario Domínguez	Rodillo - Esquina	
IMSS – Delegación Quintana Roo	Rodillo	



Nota: La tabla muestra de forma sintetizada los efectos del viento encontrados en el Centro Histórico de Chetumal a partir de la simulación CFD. Fuente: Tabla de Elaboración Propia a partir de los resultados de la simulación CFD.

A pesar de existir estos fenómenos y ciertos indicios de incomodas, la acción del viento no perjudica al usuario que circula en el espacio público del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal, esto debido a las características climáticas de la zona en la que se encuentra la ciudad. Asimismo, en la simulación CFD del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal mostró que la disposición y forma de los edificios modifican el curso del viento, pero no desfavorece la habitabilidad en cuanto a los efectos que este puede provocar tanto al peatón como en el contexto natural y las edificaciones, ya que este no posee la fuerza necesaria para provocar efectos perjudiciales en la ciudad.

5.4. Discusión

A manera de discusión, la investigación tuvo como propósito identificar si la orientación de la traza urbana y la disposición y forma de los edificios modifican la dirección y velocidad del viento disminuyendo su aceleración. En dicha investigación se analizaron ocho secciones viales las cuales mostraron una modificación mínima en la circulación del viento en su análisis CFD como factor aislado, determinando que la disposición y forma de los edificios en la que se encuentran las secciones viales del Centro Histórico de Chetumal si afecta el curso natural del viento. Sin embargo, la información del análisis CFD aislado de las ocho secciones viales no permitieron observar de manera precisa los efectos y fenómenos del viento en las secciones viales, corroborando lo que menciona Ai & Mak (2017), ya que ellos determinan que los flujos dentro del cañón no se pueden intuir comprensiblemente usando un cañón aislado incorporado metodológicamente en un software especializado.

Por otra parte, los resultados permiten establecer de acuerdo a la bibliografía que la acción del viento es persistente, haciendo complejo su estudio a nivel urbano como se percibe en las simulaciones CFD del Centro Histórico de Chetumal. No obstante, es importante considerar al viento dentro del diseño y desarrollo urbano de las ciudades. Ya que, esto permitirá aprovechar y ubicar los fenómenos aerodinámicos que se perciben en el entorno urbano, tal como lo señala Bustamante *et al.* (2014). Asimismo, la función del viento se ve reflejada de acuerdo con su vegetación y condiciones climáticas, esto se debe a que se ve influenciada por factores globales, regionales y locales, que en los últimos años se han visto afectados generando fenómenos que dañan la percepción climática de la ciudad como al individuo que la habita.

La disposición y forma de los edificios, como su relación de aspectos, las superficies pavimentadas también modifican el flujo de aire en la ciudad, como lo plantea Cordero (2014).

Estas variables pueden provocar patrones aerodinámicos positivos o negativos en la ciudad; como, por ejemplo, el aumento o disminución en el flujo de las corrientes naturales del viento, ya que los elementos físicos y naturales que componen el espacio urbano son barreras que modifican el curso del aire. No obstante, estas al no ser planeadas a partir de una estructura urbana pueden perjudicar el confort y la habitabilidad de estos sitios.

Cabe mencionar que para poder observar el comportamiento del viento en los elementos del espacio urbano; lo ideal es generar escenarios urbanos considerando esta variable.

Por otra parte, para poder analizar de manera precisa la acción del viento, se debe considerar el análisis completo del sector o del área determinada, ya que, de esta forma, se puede conocer el comportamiento y los fenómenos que la acción del viento puede provocar en la ciudad, debido a que esta se ve definida por la orientación de su traza urbana como también por la disposición y forma de las edificaciones existentes en el sitio.

Igualmente, es importante señalar que la literatura en materia de viento en Chetumal menciona que la velocidad media se encuentra entre 3 y 3.5 m/s equivalentes a los 10 y 25 km/h y varían entre los cuadrantes, este y sureste - dirección 93° (Periódico Oficial del Estado de Quintana roo, 2008). Sin embargo, Carrillo, Hernández, Ramírez, *et al.* (2009), mencionan que el viento alcanza una velocidad mínima de 3.1 m/s y una velocidad máxima de 7.6 m/s, tal como arrojan los resultados de la presente investigación, con una dirección predominante este-sureste con episodios de vientos que provienen del norte entre los meses noviembre – diciembre.

Por otro lado, Cámara, Yam, Palacios, *et al.* (2020), observan que el viento posee una velocidad promedio de 6.5 m/s con vientos predominantes que provienen del sureste en dirección a la bahía de Chetumal y de la misma forma mencionan que existe durante el invierno una ligera presencia de vientos del noroeste.

De la misma forma, la literatura también ha demostrado la importancia de estudiar los vientos huracanados debido a las consecuencias a nivel urbano que estos pueden provocar.

Por lo tanto, se realizó un escenario del Centro Histórico de Chetumal en el DesignBuilders con vientos huracanados de 38.88 m/s equivalentes a los 140 km/h registrados por la CONAGUA (2012) del Huracán Ernesto en el año 2012. Sin embargo, la información obtenida en la simulación CFD no fue precisa debido a la magnitud que el viento alcanzó respecto a su velocidad mostrando irregularidades en los resultados de los fenómenos que el viento provoca en la traza urbana. Dando la razón a lo establecido por Roxon *et al* (2018), ya que ellos mencionan que las simulación CFD a pesar de ser muy precisas, estas requieren tiempo y datos a escala “prohibitivamente intensos”, lo que provoca que las simulaciones CFD en relación a los fenómenos meteorológicos extremos a nivel ciudad no funcionen.

Por tal motivo, se ejecutó una simulación CFD en el mismo escenario pero con la información de la base de datos del Anuario Estadístico y Geográfico de Quintana Roo (2017), tomando como referencia la Tormenta Tropical Harvey del 2011, la cual registró una velocidad en el viento de 91 km/h lo que equivale a 25.2778 m/s con dirección 112.5° orientación Este - Sudeste. Dicha información permitió observar en la simulación CFD del DisignBuilder la presencia del efecto rodillo, esquina y aceleración con mayor intensidad y alcanza una velocidad máxima de 16.05 m/s que de acuerdo a Beaufort son rangos que encuentran entre 13.9 a los 17.1 m/s equivalente a una velocidad que circula en el Centro Histórico de 50.0 a 61.6 km/h. Cabe señalar que los rangos en la velocidad del viento en el caso de Huracanes se valoran a partir de la escala Saffir/Simpson.

Es importante resaltar que dentro de la simulación CFD de la Tormenta Tropical Harvey, el escenario del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal planteado en el DesignBuilder, se

levantó adimensionalmente con edificios de 2.5 m de altura y se orientó a favor del viento; los resultados permitieron observar que el encausamiento del viento entre edificios altos provoca un aumento en su aceleración generando así el Efecto Venturi como lo plantea Coca Rodríguez (2009) y Bustamante *et al* (2014).

Así pues, la bibliografía menciona que la manera de percibir el viento en la ciudad a partir del siglo XXI cambió de manera positiva, sobre todo para entender su comportamiento y los beneficios que este puede generar en la habitabilidad del espacio urbano – público; de la misma manera, el crecimiento desmesurado de las ciudades ha provocado repercusiones negativas en el confort del peatón, ya que las ciudades en su mayoría no han sido planeadas, lo que ocasiona una mala distribución de los edificios y una concepción errónea de la geometría urbana, además de una sustitución del entorno natural por materiales impermeables que no favorecen el habitar del peatón en el entorno urbano.

Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

La investigación inicialmente planteaba que el viento de alguna manera perjudicaba la habitabilidad del usuario en el espacio público del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal, sin embargo, los resultados a través del análisis CFD permitieron evidenciar que las características morfológicas del Centro Histórico de Chetumal en relación a la disposición y forma de los edificios y su relación de aspectos, si modifica el curso y velocidad natural del viento. Sin embargo, a pesar de que las características morfológicas del Centro Histórico de Chetumal si modifica el curso natural del viento, este no perjudica negativamente al transeúnte, por el contrario, las características de la velocidad del viento que circula en la zona son adecuadas. No obstante, un factor clave dentro del análisis y los fenómenos que se manifiestan en el sitio se deben principalmente a la orientación del Centro Histórico dentro de la mancha urbana de la ciudad de Chetumal.

Ahora bien, los datos obtenidos del análisis puntual de las ocho secciones viales seleccionadas permitieron demostrar que no existe presencia de fenómenos originados por la acción del viento, donde se registró una velocidad en el aire que oscila entre los 0.6 m/s y los 10.7 m/s con un viento que corre entre los 2.2 y los 38.5 km/h.

Los resultados también demostraron que para ejecutar un correcto análisis urbano CFD, se debe considerar la mancha urbana completa o, por el contrario; los sectores o colonias de la ciudad, ya que de esa manera se podrá observar el comportamiento del viento y los fenómenos que origina de manera precisa. De esta forma, se pudo corroborar que la velocidad máxima que alcanza el viento dentro del Centro Histórico es de 7.68 m/s con velocidades que alcanzan los 28.4 km/h procedente del Sureste con dirección 135°.

Dichos resultados determinaron que de acuerdo a la escala de Beaufort los vientos poseen un rango de Brisa moderada. Igualmente, los fenómenos que se manifestaron dentro del Centro Histórico de Chetumal corresponden a los mencionados en la bibliografía, como es el caso del efecto esquina, el efecto rodillo, pero principalmente el efecto de aceleración o efecto Venturi, este último se manifestó en gran parte de las secciones viales del Centro Histórico de Chetumal.

De esta forma, se puede establecer que los vientos que corren en el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal, son vientos que carecen de la fuerza necesaria para poder provocar efectos negativos en los habitantes que circulan en sitio. Estos datos de acuerdo a los rangos de velocidad del viento de Beaufort, se encuentran en una escala adecuada, ya que la acción del viento varía entre un aire ligero y una brisa moderada con efectos que apenas son percibidos por los individuos o en su defecto apenas provocan principios de incomodidad en los habitantes que circulan en el sitio.

Cabe señalar, que a pesar de que la zona posee un flujo de aire adecuado para el peatón, existen elementos y fenómenos dentro del espacio urbano que modifican negativamente el confort y la habitabilidad del individuo en el Centro Histórico de Chetumal, como lo es la inadecuada y escasa vegetación presente en el sitio y el uso de materiales impermeables utilizados en las vialidades, banquetas y andadores que en conjunto con el aire que fluye en el espacio urbano provoca un aumento en la incidencia de temperatura que se percibe en el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal.

Finalmente, el empleo de la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) como instrumento proyectual para el estudio inteligente del comportamiento del viento en el espacio urbano es fundamental para el aprendizaje. Ya que, permitirá visualizar los fenómenos positivos o

negativos que el aire ocasiona o puede ocasionar en el entorno urbano de una ciudad, ya sean edificaciones, vialidades y principalmente en el espacio urbano.

Es importante señalar que estudiar el viento es complejo debido a los constantes cambios en su intensidad, dirección, frecuencia y velocidad. Haciendo que de acuerdo al caso de estudio se deba desarrollar estrategias para su análisis. Por lo que existen excepciones en los estudios del viento a nivel urbano.

6.1. Recomendaciones

Considerando la importancia de la presente investigación en función de los resultados obtenidos de la investigación, se formulan algunas sugerencias con la finalidad de tener en cuenta la función del viento y considerarlo como un elemento importante a la hora de planificar y remodelar un espacio urbano o en su caso desarrollar algún asentamiento humano principalmente en ciudades costeras. Para ello se plantean las siguientes recomendaciones y directrices de diseño urbano.

Dados los resultados del análisis CFD de las ocho secciones seleccionadas para la presente investigación, se recomienda hacer un análisis de viento, considerando las características reales de la sección vial a analizar, como ejemplo la asimetría que posee en altura las edificaciones de los cañones urbanos del Centro Histórico de la ciudad de Chetumal. Esto debido a que los resultados obtenidos del análisis, tomando en cuenta la altura máxima de las edificaciones como lo plantea la bibliografía no dio la información necesaria para hacer un análisis preciso del comportamiento del viento en los cañones urbanos del Centro Histórico de Chetumal.

Cabe mencionar, que considerando las características de la investigación acerca del confort del peatón en el espacio urbano se tomó como principal variable al viento. Sin embargo, este no presento ninguna afectación en el usuario. Si embargo, existen variables físicas en el espacio

urbano que, en conjunto con el viento, modifican y perjudican su habitabilidad. Por tal motivo se recomienda estudiar el viento en conjunto con la temperatura del sitio, ya que estas dos variables pueden ocasionar fenómenos perjudiciales en el espacio urbano y efectos dañinos en el peatón. No obstante, también se puede complementar otros factores climáticos como el sol, la humedad y las precipitaciones, ya que estas son variables climáticas que actúan de manera integral, las cuales varían según factores como región, relieves, altitud y vegetación (Bustamante Oleart, 2020, p. 8).

Por otra parte, para definir los fenómenos que el viento ocasiona en los espacios urbanos y determinar si dichos efectos son positivos o negativos es necesario realizar un análisis CFD de toda la mancha urbana considerando los sectores de la ciudad a escalas adimensionales o, por el contrario, esto dependerá de las características particulares del software CFD empleado.

De la misma forma, es importante considerar equipos de monitorio especializados en medir el flujo y velocidades de viento para tener una percepción en tiempo real, como ejemplo, el anemómetro y la veleta, siendo el primero el que mide la velocidad y el segundo la dirección de donde proviene el viento y por último se encuentra el anemocinemógrafo, el cual registra la velocidad y dirección del viento. Esto permitirá tener panoramas diferentes en relación a la velocidad y dirección del viento en la ciudad. Además de los softwares CFD, tales como, el Solidworks, Simscale, Rwind Simulation y el mismo, DesignBuilder entre otros.

Ahora bien, en materia de desarrollo urbano, es importante considerar al viento como uno de los dos elementos de diseño urbano, ya que en conjunto con el sol; forman parte del urbanismo bioclimático. Por tal motivo, es importante antes de planear el desarrollo o remodelación del espacio urbano o asentamiento humano hacer un análisis del comportamiento, tanto del viento como del sol. Ya que estos permitirán visualizar que fenómenos y efectos positivos o negativos

ocurrirán el proyecto antes de que este se desarrolle de manera física, ya sean vialidades, espacio urbano o el diseño de las edificaciones. Y con esto desarrollar estrategias que beneficien a los habitantes del lugar. Igualmente, se recomienda utilizar y emplear vegetación adecuada, que sirvan como zonas o áreas de amortiguamiento, que en conjunto con el diseño adecuado de las edificaciones y del espacio urbano mejorará la calidad de aire de la ciudad, renovando continuamente el aire evitando una concentración de partículas contaminantes en el entorno urbano.

Si bien es cierto, que el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal posee una morfología asimétrica especialmente en la altura de sus edificaciones esto no perjudica la habitabilidad del usuario en el espacio urbano, este efecto positivo se debe principalmente en la orientación en la que se desarrolló el Centro Histórico de la ciudad de Chetumal, ya que, al estar las edificaciones y vialidades orientadas al Sur por el Oeste (SpO) con dirección Sursureste, rompen con la velocidad del viento que en metros sobre segundo ronda entre los 10 m/s y los 13 m/s. Y con esto amortigua el flujo de aire que circula en el Centro Histórico percibiéndose una brisa moderada en el sitio. Sin embargo, en la actualidad a excepción de la zona centro de Chetumal se desconoce la acción del viento en los demás sectores de la ciudad de Chetumal.

Por último y no menos importante, las ciudades tropicales como es el caso de la ciudad de Chetumal y en general el estado de Quintana roo, presentan en determinada temporada del año, fenómenos meteorológicos como por ejemplo los huracanes que traen consigo ráfagas de viento que dependiendo su categoría presenta un nivel de peligro para los habitantes y para el espacio urbano, por lo tanto se recomienda analizar y estudiar sus efectos a partir de simulaciones CFD con datos recabados de acontecimiento anteriores para poder identificar de manera precisa cuales son los fenómenos que se originan en las ciudades costeras por los vientos huracanados y de esta

manera poder generar estrategias de diseño del espacio urbano y directrices que permitan prevenir y ser resilientes ante dicho fenómeno meteorológico en ciudades tropicales.

Agregado a lo anterior, es importante resaltar que para el diseño de una ciudad tropical hay cierto número de factores a considerar como, por ejemplo; la orientación de la traza urbana a favor del viento, si bien es cierto, esto puede favorecer el confort en relación a la acción del aire, esto puede también ser desfavorable cuando se presenten fenómenos meteorológicos extremos como es el caso de tormentas tropicales o huracanes. Igualmente, la altura de los edificios que posea el sitio es importante, ya que si las edificaciones presentan una altura uniforme las secciones viales funciona como un cañón urbano donde el flujo del aire se encausa aumentando su aceleración lo que provocaría efectos desfavorables tanto para los edificios y habitantes del lugar, por lo que es importante considerar una arquitectura orgánica o modular (armable, transformable y transportable). Asimismo, se debe considerar un diseño vial adecuado, el cual se debe someter a un análisis de viento y sol para saber el comportamiento de estos elementos naturales. Cabe señalar que un diseño urbano ordenado, puede provocar más daño en un evento natural extremo que un diseño urbano desordenado. Roxon *et al.*, (2018), menciona que una textura desordenada en el diseño urbano de una ciudad tiene más resiliencia a la acción del viento en eventos meteorológicos extremos, debido a que si no se puede deducir en que ángulo vendrá el viento, este ofrecerá un mayor nivel de protección. De la misma forma es importante, tener en cuenta el empleo de una correcta vegetación y el uso de materiales adecuados, evitando los materiales impermeables en el diseño de los espacios urbanos de una ciudad con características tropicales, ya que estos elementos físico - naturales, en conjunto con la acción del viento producirán sensaciones positivas de confort en la habitabilidad térmica de los espacios públicos. De la misma forma la arquitectura es muy importante en el diseño de una ciudad, en la

cual se deben considerar ciertos factores, tales como, la altura, los materiales empleados y el diseño y forma de los edificios. Por tal motivo, es importante tener en cuenta las características climáticas de la región, ya que, estas dan la pauta para un correcto diseño urbano, para cualquier tipo de ciudad.

Para terminar, la investigación tiene la finalidad de aportar información relevante acerca de la acción y función del viento en materia de desarrollo urbano, no obstante, es importante realizar estudios y experimentos en materia de viento sin dejar a un lado el sol, ya que estas dos variables son importantes para el urbanismo bioclimático, por tal motivo, es primordial que los desarrolladores, y agentes que realizan los proyectos urbanos en las ciudades tropicales y en general en todas tengan presente principalmente estos dos variables, ya que estos elementos depende el buen funcionamiento ambiental de una ciudad.

Referencias Bibliográficas

- 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/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.032>
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [ASHRAE]. (2001). *Fundamental Handbook*. <https://sovathrothsama.files.wordpress.com/2016/03/ashrae-hvac-2001-fundamentals-handbook.pdf>
- Autodesk®. (n.d.). *Flow Design is no longer available for purchase*. Retrieved March 6, 2021, from <https://www.autodesk.com/products/flow-design/overview>
- Becerra Fernández, J. (2017). *Validación del programa Flow Design para la obtención de cargas estáticas equivalentes de viento, estudio comparativo entre ensayos de túnel de viento reales, simulados y datos obtenidos por normativa*. [Universidad de Sevilla.]. <http://hdl.handle.net/11441/64965>
- Bedoya, C., & Neila, F. (1986). *Acondicionamiento y energía solar en arquitectura* (Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos (ed.)).
- Bowen, A. (1985). Design Guidelines on Vertical Airflow in Buildings and Urban Areas. In *Passive and Low Energy Ecotechniques* (pp. 178–209). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031644-4.50016-3>
- Buck, C. (1970). Fire weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations. In *USDA Forest Service: Washington, DC* (Vol. 360). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Fire+Weather.+Agriculture+Handbook+360#1>
- Bustamante, C. (2015). *La ciudad y el viento: la morfología urbana y su relación con el uso*

estancial del espacio público abierto en territorios con vientos fuertes y climas fríos: el caso de la ciudad de Punta Arenas, región de Magallanes, Chile [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA]. <http://oa.upm.es/40146/>

Bustamante, C. A. S. (2020). Characterization of the wind and apparent temperature in the urban canyons of the historic center of Cuenca, Ecuador. *Conservar Património, SE-Articles*.

<https://doi.org/10.14568/cp2019034>

Bustamante, C., Jans, M., & Higuera, E. (2014). El comportamiento del viento en la morfología urbana y su incidencia en el uso estancial del espacio público, Punta Arenas, Chile. *AUS*, 15, 28–33. <https://doi.org/10.4206/aus.2014.n15-06>

Bustamante, C., Ogino, P. K., & García, E. H. (2013). Estrategia Metodológica para la Visualización Digital de Patrones Aerodinámicos Presentes en la Morfología Urbana y su Incidencia en el Uso Estancial de los Espacios Públicos. *Proceedings of the XVII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - SIGraDi: Knowledge-Based Design*, 108–111. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2013-0018>

Bustamante Oleart, C. (2020). La historia del viento en las ciudades = The history of the wind in the cities. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 132, 1.

<https://doi.org/10.20868/ciur.2020.132.4510>

Cabezas, C. (2013, August 16). *Claves para proyectar espacios públicos confortables. Indicador del confort en el espacio público | ArchDaily México*. <https://www.archdaily.mx/mx/02-285882/claves-para-proyectar-espacios-publicos-confortables-indicador-del-confort-en-el-espacio-publico>

Cámara, J., Yam, J., Palacios, M., & Flores, F. (2020). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL*

EÓLICO EN LA BAHÍA DE CHETUMAL. 42(136), 288–300.

<http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/2417>

Carrillo, L., Hernández, E., Ramírez, A., & Morales, J. (2009). Características hidrometeorológicas y batimétricas. *El Sistema Ecológico de La Bahía de Chetumal / Corozal: Costa Occidental Del Mar Caribe.*, November, 12–20.

Castree, N, Demeritt, D, Liverman, D & Rhoads, B. (2009). *A Companion to Environmental Geography* (N. Castree, D. Demeritt, D. Liverman, & B. Rhoads (eds.)). Wiley.

<https://doi.org/10.1002/9781444305722>

Chargoy, P. (2016). *Sostenibilidad urbana en regiones tropicales análisis y evaluación comparativa de las interrelaciones espaciales de Tulum*. [Universidad de Quintana Roo].

<http://hdl.handle.net/20.500.12249/278>

Choconta, M. (2017). *MORFOLOGÍA URBANA Acercamiento de la teoría a la práctica*.

Configuración de las zonas de expansión en el norte de Tunja [Universidad Nacional de

Colombia]. [https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63436/Morfologia Urbana](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63436/Morfologia%20Urbana%20Tunja.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[Tunja.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63436/Morfologia Urbana Tunja.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Coca Rodríguez, O. (2009). Daños del viento en zonas urbanas. *Arquitectura y Urbanismo*, 29(2–3), 64–67. <https://www.redalyc.org/pdf/3768/376839855009.pdf>

Código Técnico de la Edificación. (n.d.). *¿Qué es el CTE?* Retrieved March 6, 2021, from

<https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/QueEsElCTE.html>

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2012). *Reseña del huracán “ Ernesto ” del Océano Atlántico* (Issue 5, pp. 1–11). <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones>

[Tropicales/Ciclones/2012-Ernesto.pdf](https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones)

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2021). *Climogramas 1981-2010*. Estación

Chetumal (DGE), Quintana Roo (18.5006, - 88.3275). Clave 23032.

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>

Connor, N. (2019, September 12). *¿Qué es la ecuación de continuidad? Definición*. Thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-continuidad-definicion/>

Cordero, A. X. O. (2014). *Microclima y confort térmico urbano: análisis sobre la influencia de la morfología del cañón urbano caso de estudio en los barrios el Raval y Gracia, Barcelona* [ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA].

<http://hdl.handle.net/2099.1/23637>

da Silva, T. C., Drach, P. R. C., & Corbella, O. C. (2012). ESTUDIOS SOBRE LA ENSEÑANZA DE LOS EFECTOS DEL VIENTO. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambient*, 16. <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2012/2012-t010-a010.pdf>

de Oliveira Lázaro, B., & Chuerubim, M. (2018, August 22). LA IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE LA MORFOLOGÍA URBANA EN LA PLANIFICACIÓN DE CIUDADES DE MEDIANO PORTE. *XIV Congreso de La Asociación Latinoamericana de Escuelas de Urbanismo y Planificación: Las Universidades Latinoamericanas y La Nueva Agenda Urbana*.

[https://www.researchgate.net/publication/336914246 LA IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE LA MORFOLOGIA URBANA EN LA PLANIFICACION DE CIUDADES DE MEDIANO PORTE](https://www.researchgate.net/publication/336914246_LA_IMPORTANCIA_DEL_ANALISIS_DE_LA_MORFOLOGIA_URBANA_EN_LA_PLANIFICACION_DE_CIUDADES_DE_MEDIANO_PORTE)

de Terán, F. (1963). La ciudad y el viento (1): estudio del problema del viento en relación con la

disposición de los núcleos urbanos. In *Arquitectura* (Issue 48). Colegio Oficial de Arquitectos. <http://oa.upm.es/10955/>

DePaul, F. T., & Sheih, C. M. (1986). Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmospheric Environment* (1967), 20(3), 455–459.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90085-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981(86)90085-5)

Dirección General de Obras Públicas Desarrollo Urbano y Ecología. (2016). *REGLAMENTO DE IMAGEN URBANA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CHETUMAL - ANEXO I*. <http://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/2016/07/ANEXOS-REGLAMENTO.pdf>

Gallegos, A., & Czitrom, S. (1997). Aspectos de la Oceanografía Física Regional del Mar Caribe. In *Contribuciones a la oceanografía física en México* (pp. 225–242). Unión Geofísica Mexicana.

García, J., & Fuentes, V. (1985). *Arquitectura Bioclimática y Energía Solar : Viento y Arquitectura* (Issue November).

https://www.researchgate.net/publication/44363811_Viento_y_arquitectura_el_viento_como_factor_de_diseno_arquitectonico

García, J., & Fuentes, V. (2005). *Viento Y Arquitectura El Viento como Factor de Diseño Arquitectónico*. <https://www.librosarq.com/sostenible/viento-y-arquitectura-jose-garcia-y-victor-fuentes/#.YVyGGZrMLIU>

Gardea-Villegas, H. (2001). Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vértices. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2(2), 81–87.

<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2001.02n2.009>

González, F. (2003). *Las comunidades vegetales de México*.

Google Maps. (2021, December 30). *Styling Wizard: Google Maps APIs*. Styling Wizard.

<https://mapstyle.withgoogle.com/>

Grau, T., Blázquez, A., & Gay, E. T. (2016). *Aerodynamic analysis of the undertray of Formula 1 2 Summary*.

Greelane. (2019, March 4). *La dinámica de fluidos es el estudio de los movimientos de líquidos y gases*. Ciencia . <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnología-matemáticas/ciencia/what-is-fluid-dynamics-4019111>

Grupo Legislativo del Partido Verde Ecologista de México. (2019). *INICIATIVA*.

<http://documentos.congresoqroo.gob.mx/iniciativas/INI-XVI-20191113-642-6244.pdf>

Gülten, A., & Öztop, H. F. (2020). Analysis of the natural ventilation performance of residential areas considering different urban configurations in Elazığ, Turkey. *Urban Climate*, 34, 100709. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100709>

Guo, F., Zhu, P., Wang, S., Duan, D., & Jin, Y. (2017). Improving Natural Ventilation Performance in a High-Density Urban District: A Building Morphology Method. *Procedia Engineering*, 205, 952–958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.149>

Guzmán, F., & Ochoa, J. (2014). Confort Térmico en los Espacios Públicos Urbanos, Clima cálido y frío semi-seco. *Hábitat Sustentable*, 4(2 SE-), 52–63.

<http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/450>

Haffer, J. (2001). Ciclos de tiempo e indicadores de tiempos en la historia de la Amazonia. In J. Llorente Bousquets, J. Morrone (Ed.), *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*. (Primera, pp. 119–128).

<http://www.libros.unam.mx/digital/V8/40.pdf>

He, B.-J., Ding, L., & Prasad, D. (2019). Enhancing urban ventilation performance through the

development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101472.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101472>

Hebbert, M, & MacKillop, F. (2011). Urban Climatology Applied to Urban Planning - a

knowledge circulation failure? *Planning Histories and Practices of Circulating Knowledge Symposium Edited by Susan Moore and Andrew Harris (UCL)*.

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40745255/UrbanClimatePlanningKnowledge.pdf?1449999037=&response-content-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40745255/UrbanClimatePlanningKnowledge.pdf?1449999037=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUrban+Climatology+Applied+to+Urban+Plann.pdf&Expires=1614038173&Signature=CII6qQKMh0d5E4m19~zodTPdj65siff0iAO4rl)

[disposition=inline%3B+filename%3DUrban Climatology Applied to Urban Plann.pdf&](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40745255/UrbanClimatePlanningKnowledge.pdf?1449999037=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUrban+Climatology+Applied+to+Urban+Plann.pdf&Expires=1614038173&Signature=CII6qQKMh0d5E4m19~zodTPdj65siff0iAO4rl)

[Expires=1614038173&Signature=CII6qQKMh0d5E4m19~zodTPdj65siff0iAO4rl](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40745255/UrbanClimatePlanningKnowledge.pdf?1449999037=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUrban+Climatology+Applied+to+Urban+Plann.pdf&Expires=1614038173&Signature=CII6qQKMh0d5E4m19~zodTPdj65siff0iAO4rl)

Hebbert, Michael, & Jankovic, V. (2011). Street Canyons and Canyon Streets: the strangely

separate histories of urban climatology and urban design. *Climate Science in Urban Design, Working Paper, 1*.

Higueras, E. (1998). Urbanismo bioclimático. Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 24(August), 80.

Higueras, E. (2013). Urbanismo aerodinámico: Innovación metodológica en la investigación sobre el viento urbano. In *V Jornadas Internacionales sobre Investigación en Arquitectura Y Urbanismo 5th International Meeting of Architecture and Urbanism Research*.

<http://oa.upm.es/29897/>

Higueras, E., & Bustamante, C. (2013). Urbanismo aerodinámico: entre lo sólido y lo fluido.

Greencities & Sostenibilidad: Inteligencia Aplicada a La Sostenibilidad Urbana | 1ª Bienal de Edificación y Urbanismo Sostenible | 2-3 Octubre 2013 | Malaga.

<http://aulagreencities.coamalaga.es/urbanismo-aerodinamico-entre-lo-solido-y-lo-fluido/>

Instituto Geográfico y Catastral del Estado de Quintana Roo. (2021). *OpenLayers map preview*.

OrtoFotografías.

http://catastro.sefiplan.qroo.gob.mx:8080/geoserver/Othon_P_Blanco_004/wms?service=WMS&version=1.1.0&request=GetMap&layers=Othon_P_Blanco_004%3A20180101_IGEC_E_Ortofoto_OPB_Chetumal_EPSG%3A32616_V01&bbox=353700.11%2C2044803.109999999%2C368999.48%2C2055195

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Marco Geoestadístico*.

<https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017). *Ciclones Tropicales con Influencia en el Territorio Estatal*. INEGI. Anuario Estadístico y Geográfico de Quintana

Roo 2016. https://qroo.gob.mx/coeproc/wp-content/uploads/2019/09/ciclones-con-influenciaI_2017_0.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). *Censo Población y Vivienda 2020*. Censos y Conteos de Población y Vivienda.

<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2021). *Comparador de Geomedianas*.

<https://www.inegi.org.mx/investigacion/geomediana/#Mapa>

Kabošová, L., Katunský, D., & Kmet, S. (2020). Wind-Based Parametric Design in the Changing Climate. *Applied Sciences*, 10(23), 8603. <https://doi.org/10.3390/app10238603>

Liu, F., Qian, H., Zheng, X., Zhang, L., & Liang, W. (2017). Numerical Study on the Urban Ventilation in Regulating Microclimate and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyon: A Case Study of Nanjing New Region, China. *Atmosphere*, 8(12), 164.

<https://doi.org/10.3390/atmos8090164>

- Lozano, A. R. (2008). Tarifa y el viento de Levante. *Aljaranda: Revista de Estudios Tarifeños*, 68, 28–30. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2575295>
- Maqui Santos, J. F. (2017). Fenomeno de Resonancia de La Vibracion Inducida por Desprendimiento de Vortices del Viento sobre una Estructura Cilindrica por el Modelo Armonico [UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO]. In *Universidad Nacional de Trujillo*. [https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9995/Maqui Santos%2C José Fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9995/Maqui_Santos%2C_Jos%C3%A9_Fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Máster en Ingeniería sísmica. (2019, June 3). *Los Eurocódigos y el Nuevo Código Estructural en España: Novedades y reflexiones - Máster en Ingeniería sísmica*. <http://masteringenieriasismica.etsii.upm.es/los-eurocodigos/>
- Mauree, D., Castello, R., Mancini, G., Nutta, T., Zhang, T., & Scartezzini, J.-L. (2019). Wind profile prediction in an urban canyon: a machine learning approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 1343, 12047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012047>
- Mooers, C., & Maul, G. (1998). *Intra-Americas Sea Circulation*. (R. Robinson y K. H. Brink (ed.); pp. 183–208). Global Coastal Ocean. [https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=-uhTulqFRigC&oi=fnd&pg=PA183&dq=+Intra-Americas+Sea+Circulation.+In+Global+Coastal+Ocean&ots=18XVRO15Cr&sig=afTixyjLDBKXjSmUjOBOZY0K9aw&redir_esc=y#v=onepage&q=Intra-Americas Sea Circulation. In Global Coasta](https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=-uhTulqFRigC&oi=fnd&pg=PA183&dq=+Intra-Americas+Sea+Circulation.+In+Global+Coastal+Ocean&ots=18XVRO15Cr&sig=afTixyjLDBKXjSmUjOBOZY0K9aw&redir_esc=y#v=onepage&q=Intra-Americas+Sea+Circulation.+In+Global+Coastal)
- Moreno, M. (1999). *Climatología Urbana*. Textos Docents 160. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=nNQa8pIAIw8C&oi=fnd&pg=PA7&dq=Climatologia+urbana+moreno+1999&ots=x_8Fi6cOLq&sig=rp8NuXLvky7UIJtVCTmR

[it8Q_A#v=onepage&q=Climatologia urbana moreno 1999&f=false](#)

Moudon, A. V., & Oliveira, V. (2017). Morfologia urbana como um campo interdisciplinar emergente. *Revista de Morfologia Urbana*, 3(1), 41–49.

<https://doi.org/10.47235/rmu.v3i1.16>

Naciones Unidas. (2019). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.cepal.org/es/suscripciones

Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment (1967)*, 22(12), 2691–2700.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90437-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90437-4)

NáuticaJonkepa. (2009). *Brisas de mar y de tierra*. Enseñanzas Náuticas Para Conocer La Mar y Todo Lo Que Le Rodea. <https://nauticajonkepa.wordpress.com/2009/02/04/brisas-de-mar-y-de-tierra/>

Nicholson, S. E. (1975). A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment (1967)*, 9(1), 19–31. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90051-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90051-7)

Ordóñez, A. (2017). *Manual de ayuda DesignBuilder en español*.

http://files.designbuilder.cl/200000040-92fe693f9f/ManualDB-Español_2014-12-03.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2018, February 1). *Cambio climático y salud*. Cambio Climático y Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>

Pardo, D. (2018). *CLAVES PARA INTERPRETAR LAS PREVISIONES METEOROLÓGICAS: (PARTE 1)*. Alawa Surf Camp. <https://alawasurfcamp.com/claves-para-interpretar-las-previsiones-meteorologicas-parte-1/>

Pedrozo, A., & Torres, A. (2011). Sobre el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes con el

promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 2, 51–67. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000200004&nrm=iso

Periódico Oficial del Estado de Quintana roo. (2008). *PROGRAMA DE MANEJO DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA CON CATEGORÍA DE RESERVA ESTATAL SANTUARIO DEL MANATÍ BAHÍA DE CHETUMAL*. (p. 11).

<http://po.segob.qroo.gob.mx/sitiopo/MicroBPO.php>

PR Electronics. (n.d.). *Los fundamentos de los sensores de temperatura RTD*. Retrieved March 13, 2021, from <https://www.prelectronics.com/es/the-fundamentals-of-rtd-temperature-sensors/>

Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos [ONU-HABITAT]. (2014). *Sustainable Building Design for Tropical Climates. Principles and Applications for Eastern Africa*. UN-Habitat. www.unhabitat.org

Rajagopalan, P., & Wong, N. H. (2005). Parametric studies on urban geometry, airflow and temperature. *International Journal on Architectural Science*, 6, 114–132.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Parametric-studies-on-urban-geometry%2C-airflow-and-Rajagopalan-Wong/2b4865abf5eab704ccae38de7fa4ee8b83a088ec>

Ramponi, R., Blocken, B., de Coo, L. B., & Janssen, W. D. (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*, 92, 152–166.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.018>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (2020). *Diccionario de la lengua española, 23.^a ed.* [Versión 23.4 En Línea]. <https://dle.rae.es>

- Reidl-Martínez, L. M. (2012). Marco conceptual en el proceso de investigación. *Investigación En Educación Médica, 1*, 146–151.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-50572012000300007&nrm=iso
- Richmond, G. (2019). *Modelos de turbulencia introductorio*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21060.17289>
- Rodríguez Muñoz, N. A. (2009). *Estudio numérico de la transferencia de calor con flujo turbulento en una cavidad alargada con ventilación* [Universidad de Sonora].
<http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/unison/301>
- Romero, & Benítez. (2014). EL PROCESO HISTÓRICO DE CONFORMACIÓN DE LA ANTIGUA PAYO OBISPO (HOY CHETUMAL) COMO ESPACIO URBANO FRONTERIZO DURANTE LA ETAPA DE QUINTANA ROO COMO TERRITORIO FEDERAL. *Península, 9*(1), 125–140.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-57662014000100006
- Romero, H., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Cambios climáticos y climas urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile. *Revista INVI, 25*, 151–179.
https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-83582010000300005&nrm=iso
- Roxon, J., Pellenq, R., & Ulm, F.-J. (2018). Prioritizing Resilient Retrofits. *MIT CSHub Research Brief, 2*(2).
https://www.researchgate.net/publication/349731174_Research_Brief_Prioritizing_Resilient_Retrofits

Safe, S. M. de S. (2015). *Tradição e vida social na forma urbana da Kasbah dos Oudayas e Medina de Rabat* [Belo Horizonte Escola de Arquitetura da UFMG].

https://www.researchgate.net/publication/333250687_TRADICAO_E_VIDA_SOCIAL_N_A_FORMA_URBANA_DA_KASBAH_DOS_OUDAYAS_E_MEDINA_DE_RABAT

Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano. (2021). *Actualización del PDU Chetumal, Calderitas, Sub. López, Huay-Pix, Xul-Ha. Anexo 1. Diagnóstico - Pronóstico*. (p. 200).

https://drive.google.com/drive/folders/1b5D2DxviPkXd2T_rh-LaNR6yfROotg1w

Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). (2019). *Manual de calles:*

diseño vial para ciudades mexicanas. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/manual-de-calles-diseno-vial-para-ciudades-mexicanas>

Secretaria de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano [SEDATU]. (2018a). Programa de

Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há. Anexo

I.1. Antecedentes históricos. In *Periódico oficial del Estado de Quintana Roo*. Periódico

oficial del Estado de Quintana Roo. [http://www.opb.gob.mx/portal/wp-](http://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/transparencia/93/I/f/PDU2018/PDU_integrado_19012018-publicacion_digital.pdf)

[content/uploads/transparencia/93/I/f/PDU2018/PDU_integrado_19012018-publicacion_digital.pdf](http://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/transparencia/93/I/f/PDU2018/PDU_integrado_19012018-publicacion_digital.pdf)

Secretaria de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano [SEDATU]. (2018b). *Programa de*

Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há.

Municipio de Othón P. Blanco, Estado de Quintana Roo. Periódico oficial del Estado de

Quintana Roo. [http://www.opb.gob.mx/portal/wp-](http://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/transparencia/93/I/f/PDU2018/PDU_integrado_19012018-publicacion_digital.pdf)

[content/uploads/transparencia/93/I/f/PDU2018/PDU_integrado_19012018-publicacion_digital.pdf](http://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/transparencia/93/I/f/PDU2018/PDU_integrado_19012018-publicacion_digital.pdf)

Secretaria de Desarrollo Social [SEDESOL]. (2013). *Unidad de Microrregiones*. Cédulas de

Información Municipal [SCIM].

<http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=nacion&ent=23&mun=00>

[4](#)

Secretaría de Energía [SENER]. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional [PRODESEN]*. Secretaría de Energía. <https://www.gob.mx>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2018). *Plataforma de Conocimiento sobre Ciudades Sustentables*.

Sepúlveda, O. (2016). *Análisis de las temperaturas mínimas del área urbana y rural de Santiago (1911-1982): caracterización de la intensidad de la isla de calor en el contexto del calentamiento y cambio climático*. [Universidad de Chile].

<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141385>

Suaréz, M. (2012). *Blog de Miguel Ángel Suárez Umpiérrez*. TEMA 1 «El Planeta Tierra».

<https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/msuaump/sociales/tema-1/>

Taracena, E. (2013, August 8). *La Morfología Urbana: Otro concepto importante en la Urbanización | ARQUITECTURA, LITERATURA [+]*.

[https://conarqket.wordpress.com/2013/08/08/la-morfologia-urbana-otro-concepto-](https://conarqket.wordpress.com/2013/08/08/la-morfologia-urbana-otro-concepto-importante-en-la-urbanizacion/)

[importante-en-la-urbanizacion/](https://conarqket.wordpress.com/2013/08/08/la-morfologia-urbana-otro-concepto-importante-en-la-urbanizacion/)

Vardoulakis, S., Fisher, B. E. ., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 155–182.

[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9)

Velasco, A. (2012). *Patrones de flujo del aire en interiores de acuerdo a la forma de la envolvente geométrica - arquitectónica*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

Zepeda Garrido, J. A. (2015, March 7). *Islas de calor urbanas*.

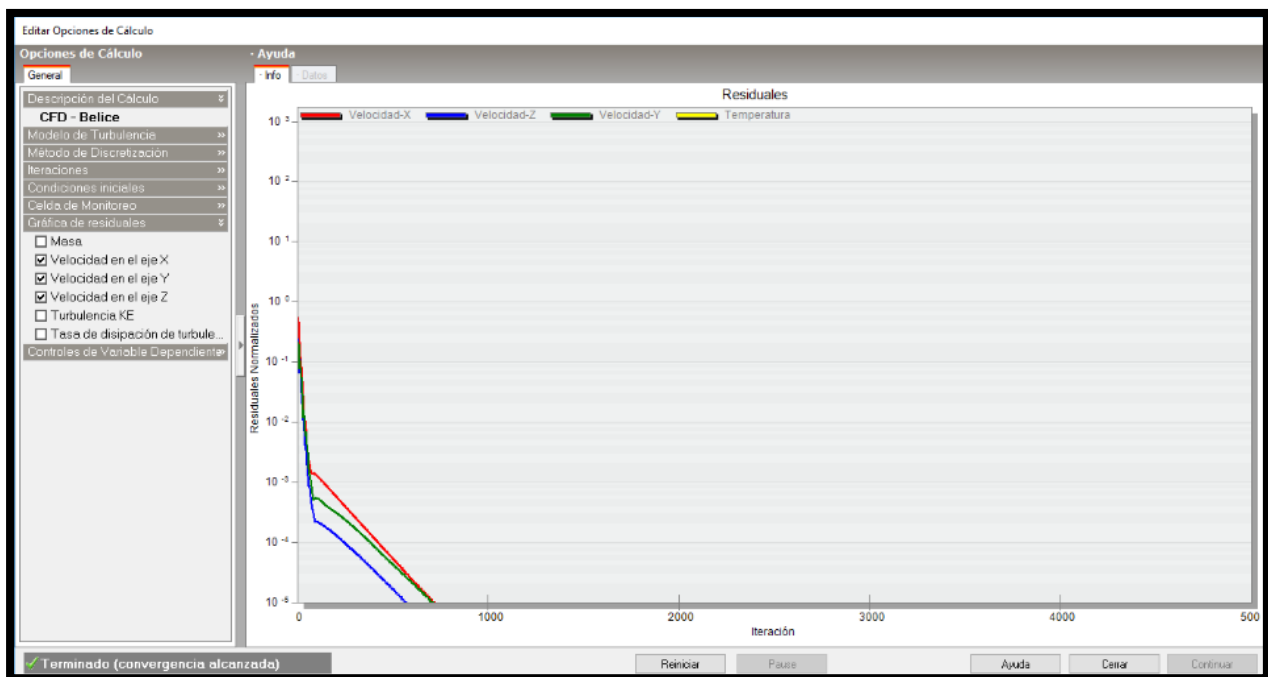
<http://www.eluniversalqueretaro.mx/content/islas-de-calor-urbanas>

Zoido, F., Vega, S., Morales, G., Mas, R., & Lois González, R. C. (2000). *Diccionario de Urbanismo, geografía urbana y ordenación del territorio*. Ariel, S. A.

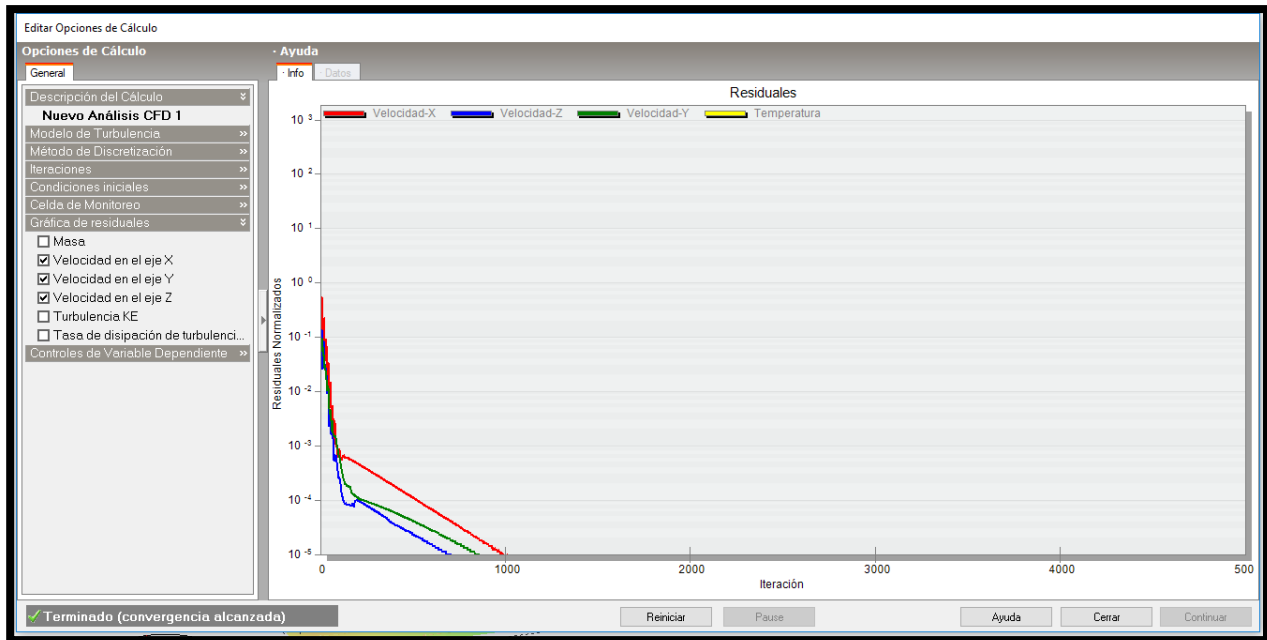
Anexo

Anexo 1. Las siguientes figuras muestran las gráficas residuales y monitoreo generadas en las simulaciones realizadas en el DesignBuilder de cada una de las secciones seleccionadas del Centro Histórica de la ciudad de Chetumal. Las gráficas residuales y monitoreo de acuerdo con el Manual de Ayuda DesignBuilder (2017), proporciona al usuario controlar el progreso de la simulación CFD; permitiendo verificar si los cálculos se canalizan hacia la convergencia o si es necesario hacer ajustes en los cálculos de la simulación.

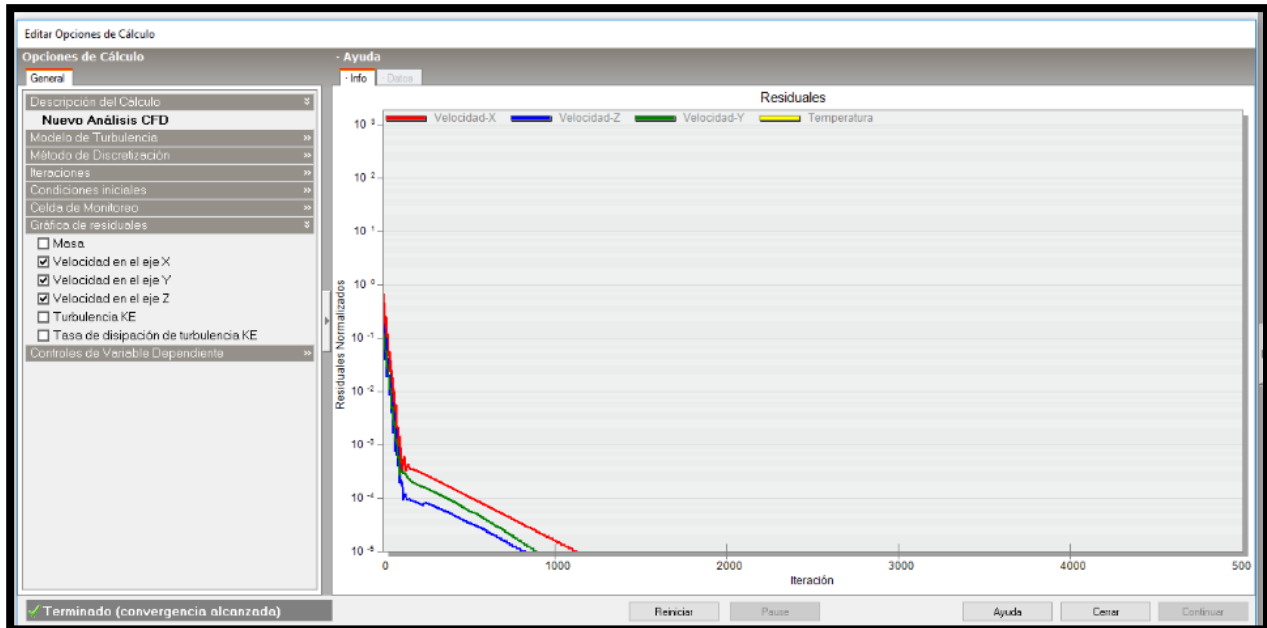
Gráfica Residual SVI - Avenida Belice entre Mahatma Gandhi y Efraín Aguilar



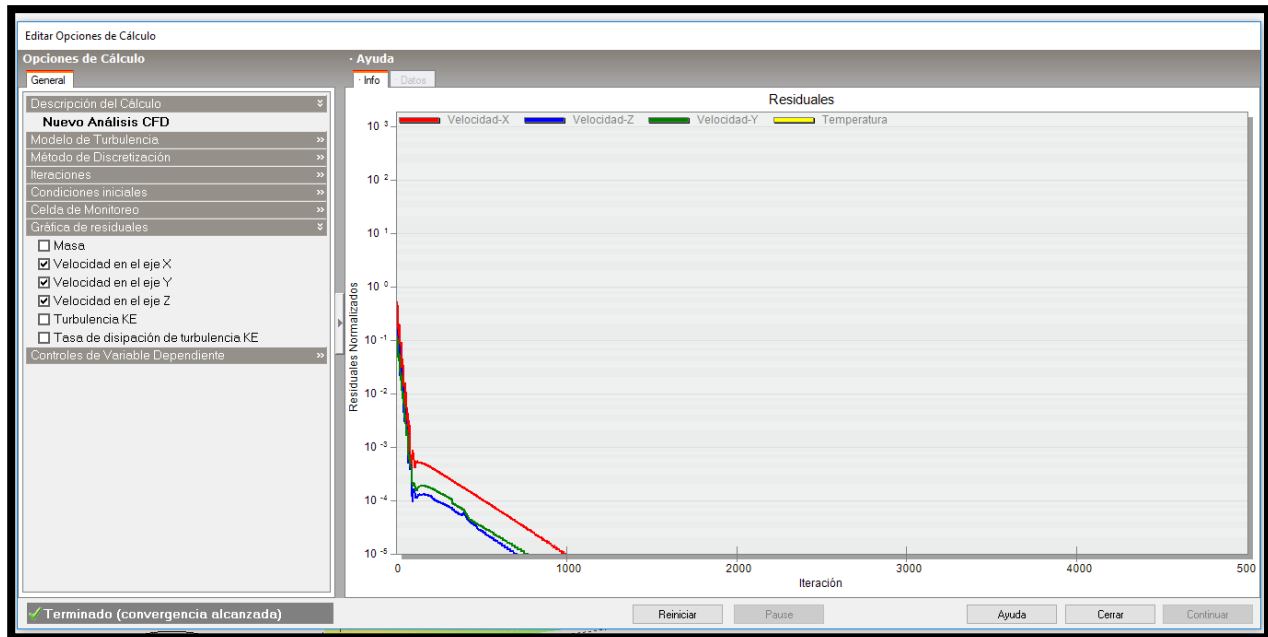
Gráfica Residual SV2 - Avenida Benito Juárez entre P. Elisa Calles e Ignacio Zaragoza



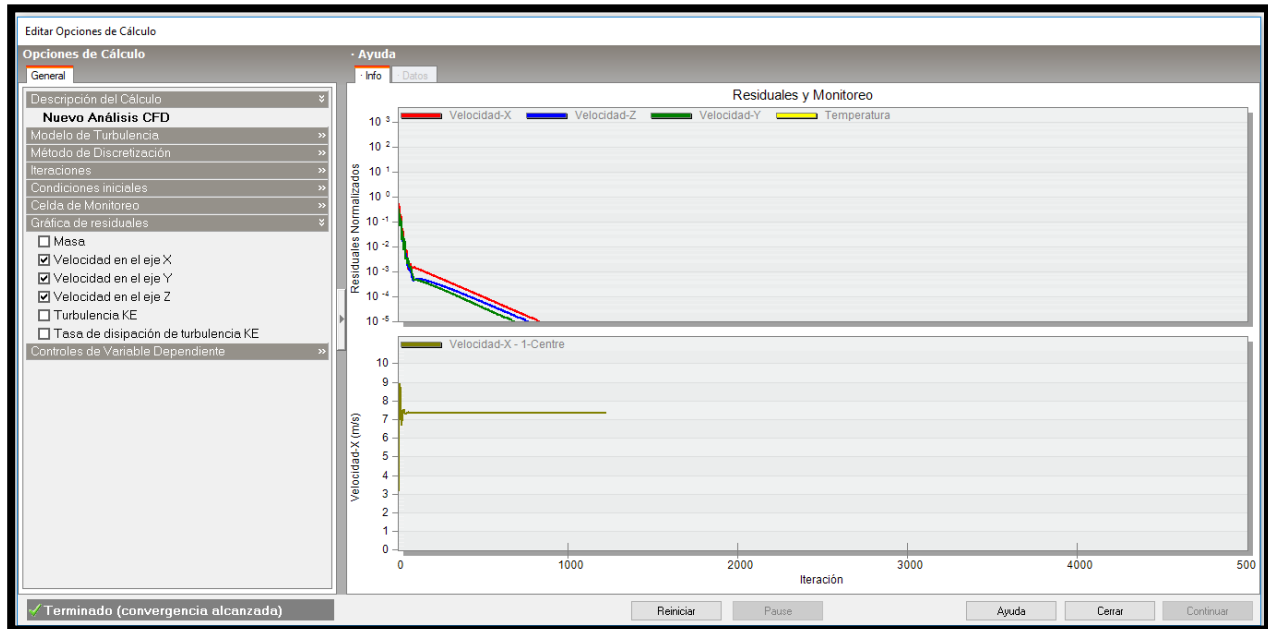
Gráfica Residual SV3 - Avenida Lázaro Cárdenas entre Héroes y Benito Juárez



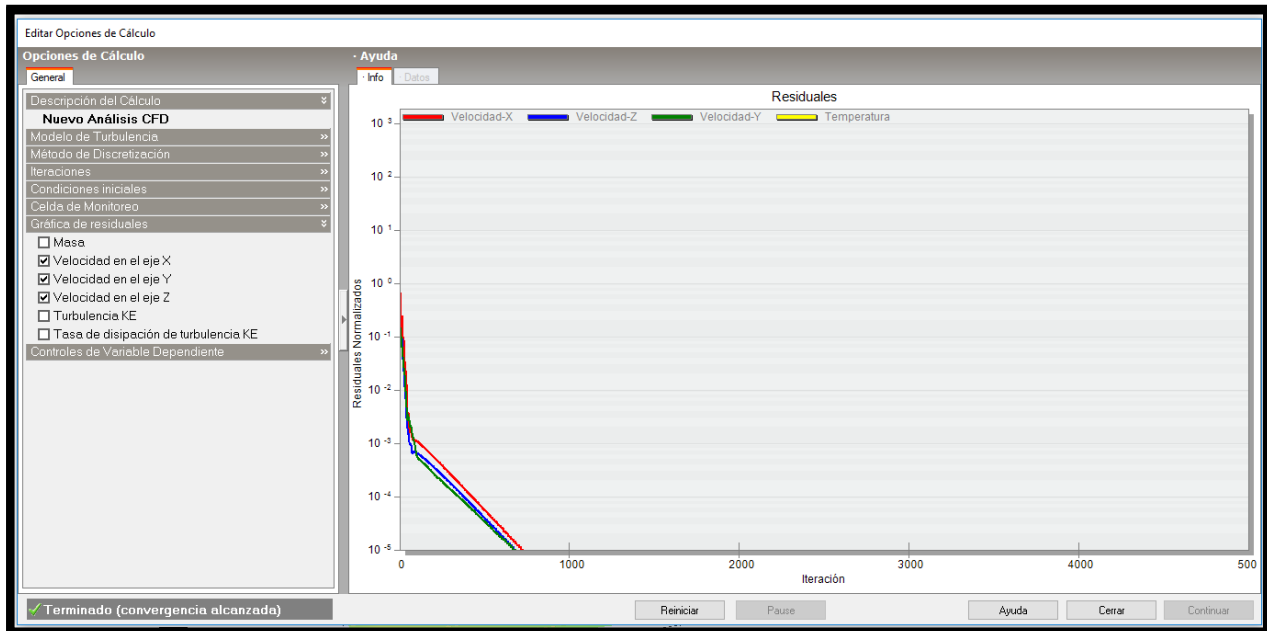
Gráfica Residual SV4 - Calle P. Elías Calles entre Héroes y Benito Juárez



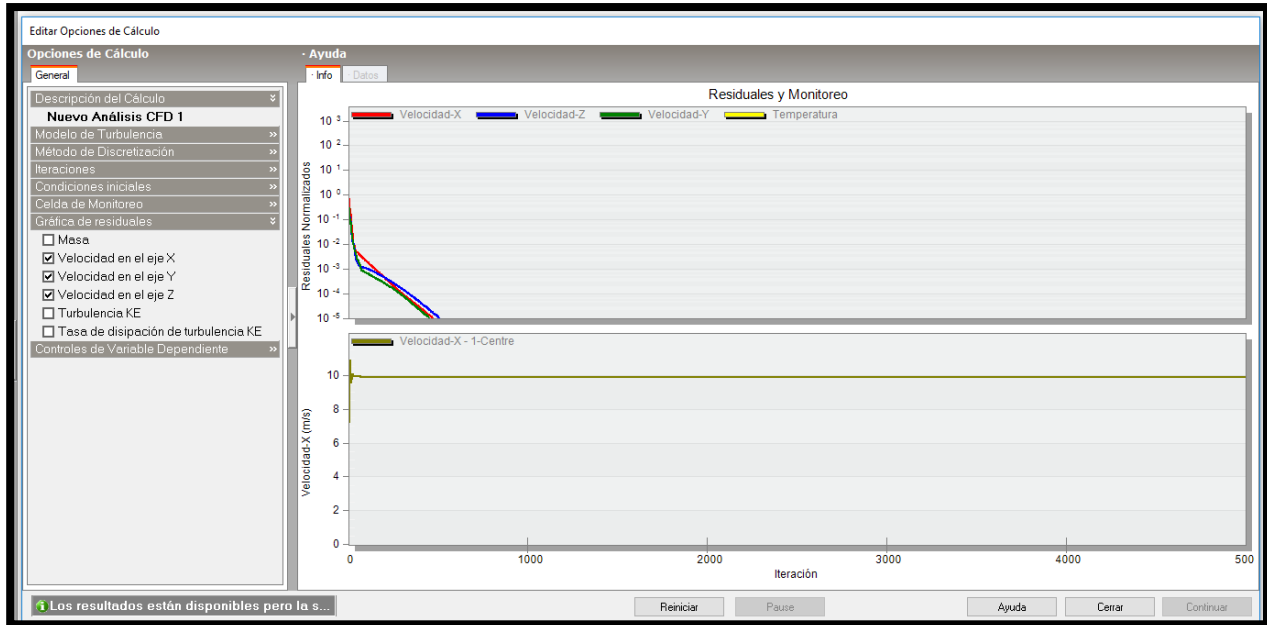
Gráfica Residual SV5 - Avenida Benito Juárez entre Álvaro Obregón y Othón P. Blanco



Gráfica Residual SV6 - Avenida Héroes entre Othón P. Blanco y Carmen Ochoa de Merino



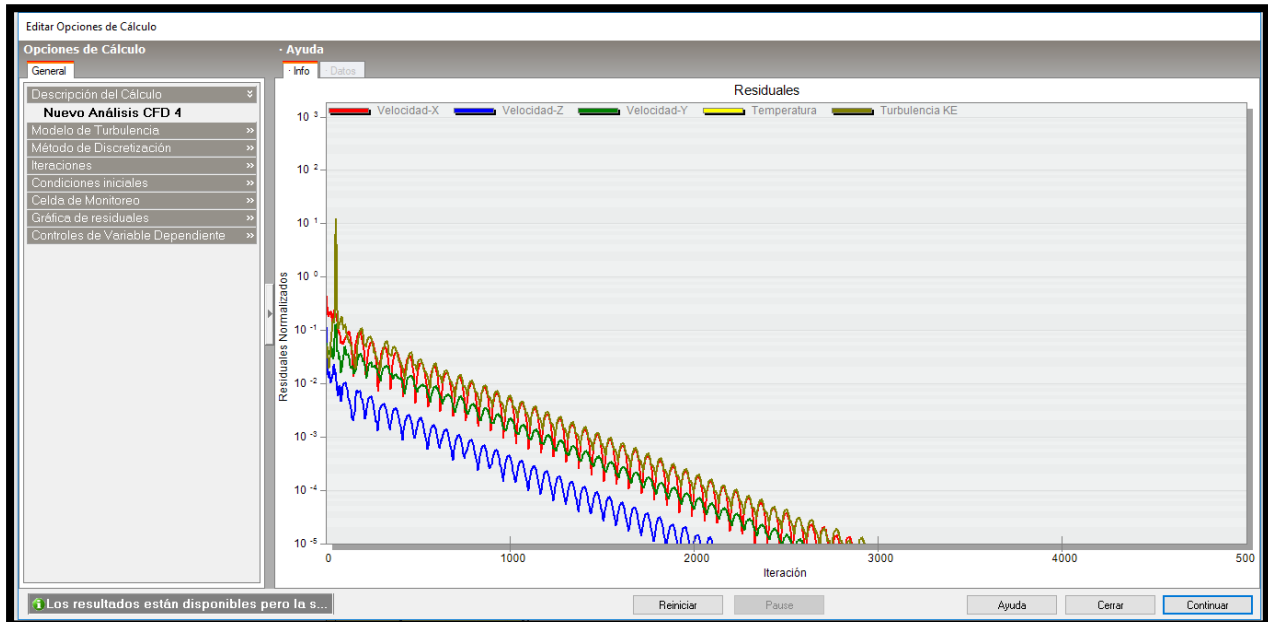
Gráfica Residual SV7 - Avenida Álvaro Obregón entre Benito Juárez e Independencia



Gráfica Residual SV8 - Calle Othón P. Blanco entre Héroes y 5 mayo

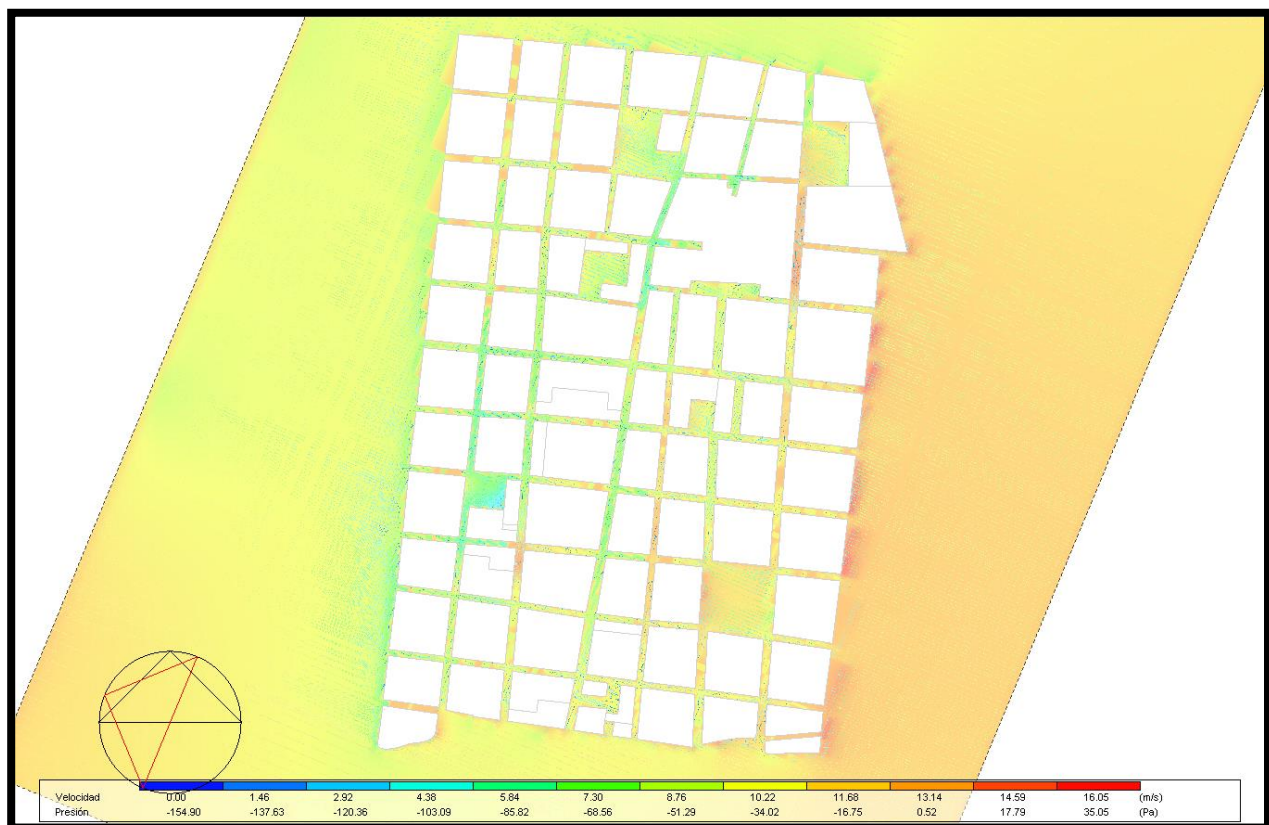
Anexo 2. De igual forma, dadas las características de la investigación se realizó también un análisis CFD en un escenario completo del Centro Histórico de Chetumal donde se puede observar de manera más precisa los efectos del viento a través de las secciones viales del sitio. Dicha simulación permitió obtener la siguiente grafica residual y monitoreo.

Gráfica Residual Simulación CFD del Centro Histórico de la Ciudad de Chetumal

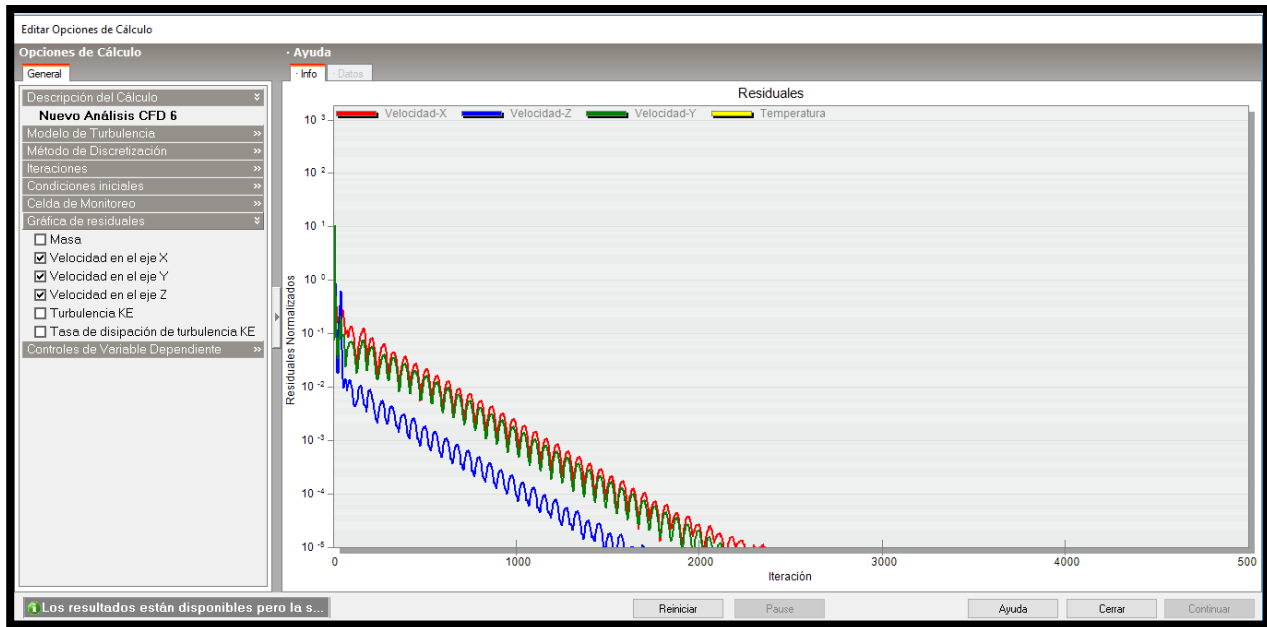


Anexo 3. Asimismo, se realizaron simulaciones CFD considerando las características climáticas de la tormenta Harvey (2011) con la orientación original del Centro Histórico de Chetumal, como también se planteó un escenario del Centro Histórico de Chetumal con una orientación a favor del viento, esto con la finalidad de comprender mejor el comportamiento de los vientos en la ciudad durante una tormenta tropical. Las siguientes imágenes muestran los resultados de la simulación.

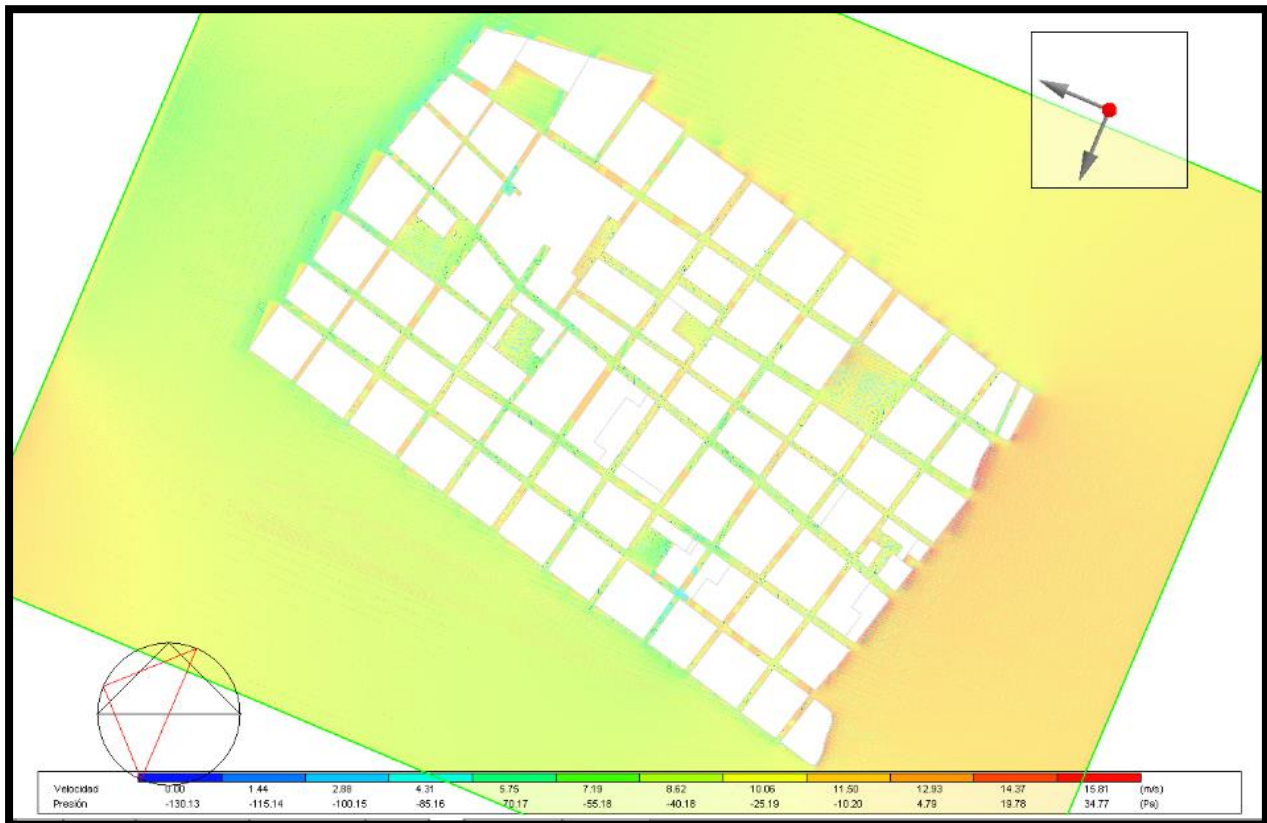
CFD TT Harvey 2011 – Orientación Real del Centro Histórico de Chetumal



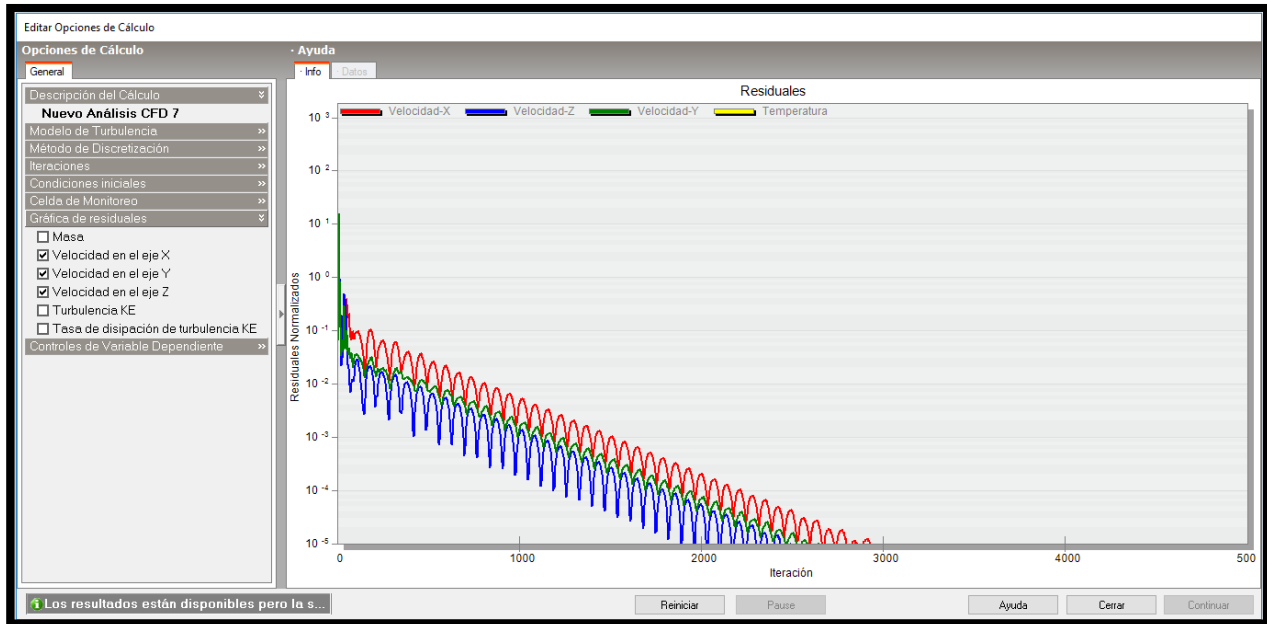
Grafica Residual TT Harvey - Orientación Real del Centro Histórico de Chetumal



CFD TT Harvey - Orientación del Centro Histórico de Chetumal a favor del viento

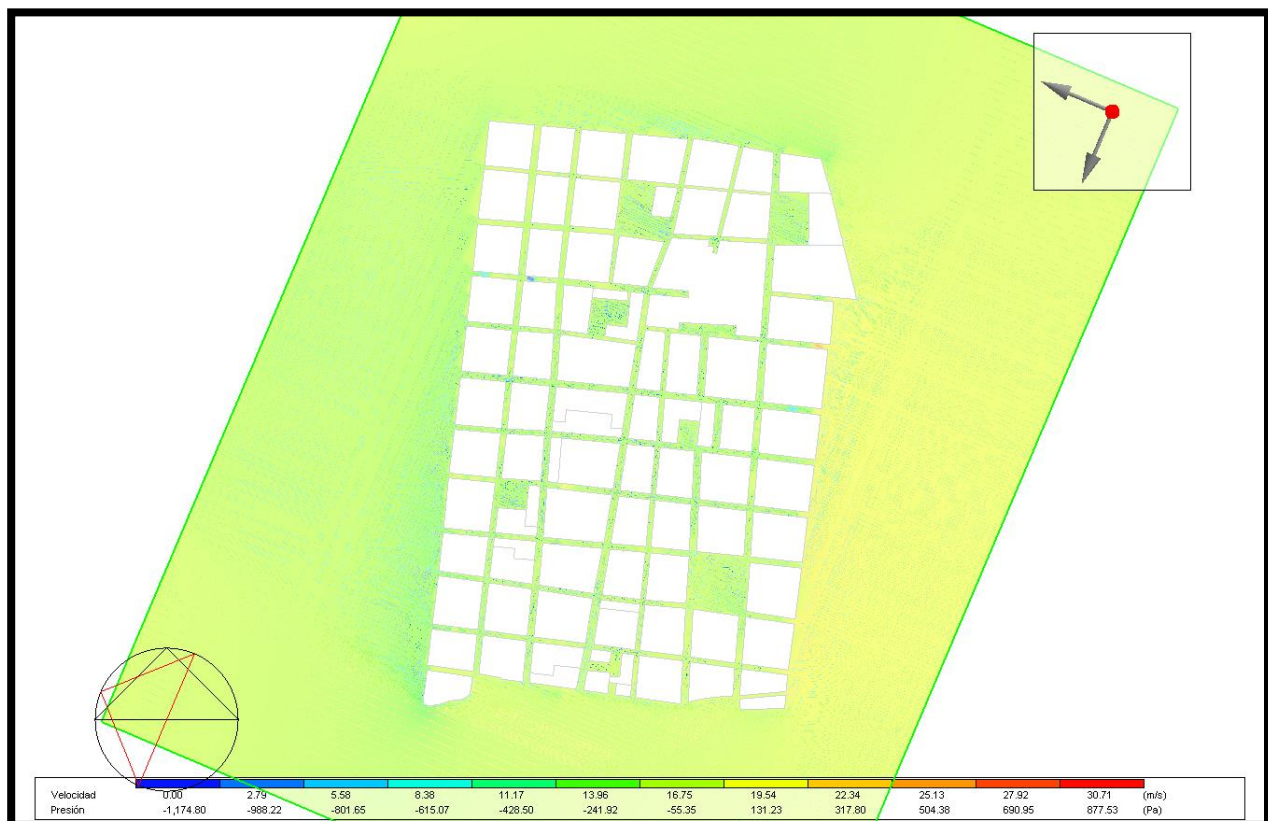


Grafica Residual TT Harvey - Orientación del Centro Histórico de Chetumal a favor del viento

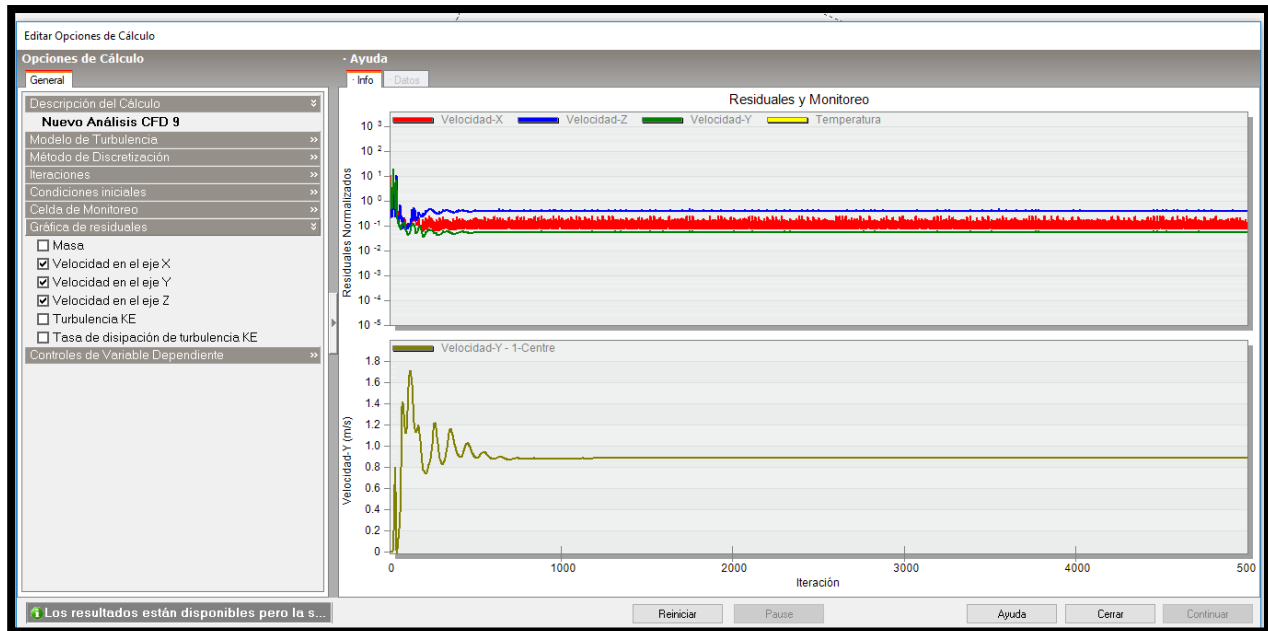


Anexo 4. Agregado a lo anterior, se realizaron simulaciones con las mismas características en relación a los escenarios planteados como también las características climáticas de la tormenta tropical Harvey, pero con una variación uniforme en la altura de los edificios del Centro Histórico de Chetumal considerándolos de 25 metros lo que a escala 1:10 equivale a 2.5 m de altura en el DesignBuilder. Esto con la finalidad de visualizar y comprender el comportamiento del viento durante una tormenta tropical en un escenario del centro histórico de Chetumal donde los edificios tengan una misma altura y de esta forma poder corroborar lo mencionado por los autores acerca de que los cañones urbanos provocan el encausamiento del viento entre edificios altos generando un aumento en su aceleración, lo que da origen al Efecto Venturi. Las siguientes imágenes muestran los resultados.

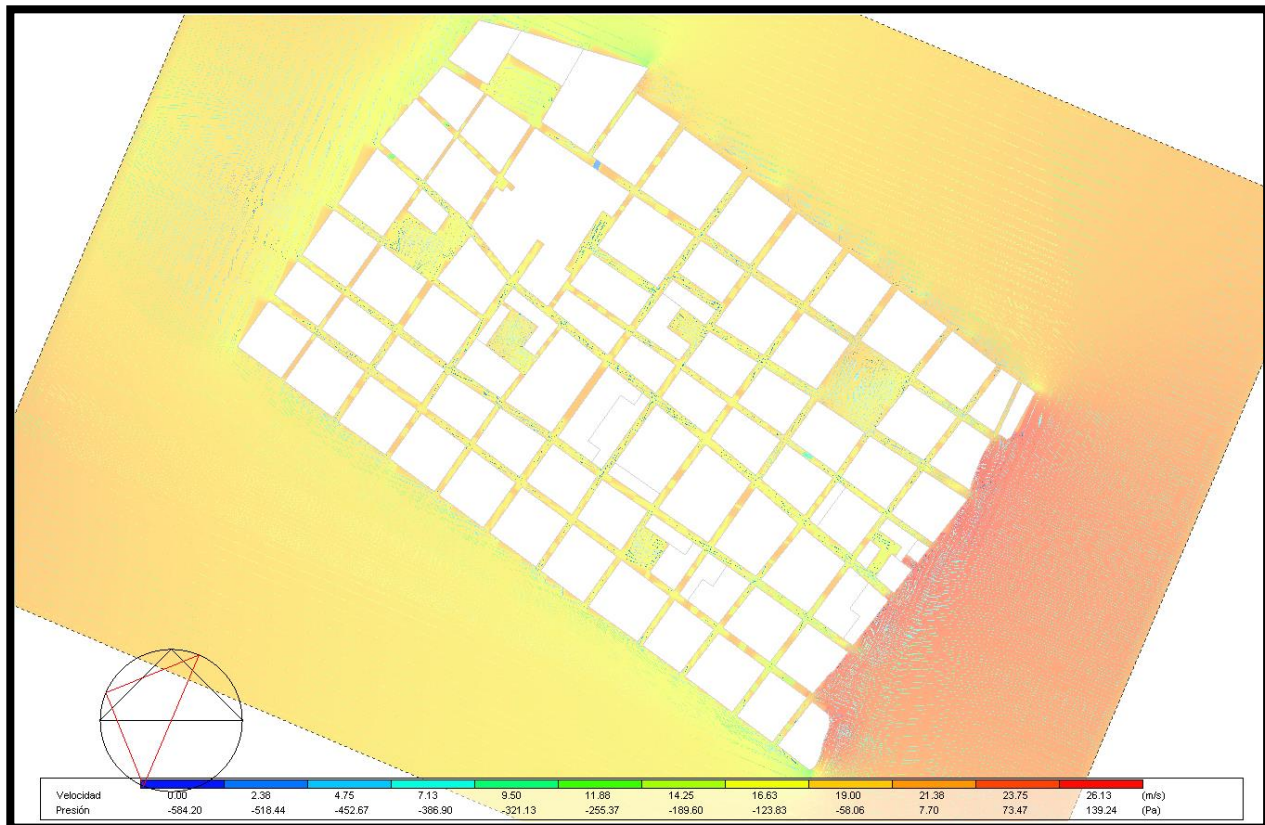
CFD TT Harvey 2011 – Orientación original en un escenario del Centro Histórico de Chetumal con edificios de 25 metros de altura



Grafica Residual TT Harvey 2011 Orientación original en un escenario del Centro Histórico de Chetumal con edificios de 25 metros de altura



CFD TT Harvey 2011 – Orientación a favor del viento en un escenario del Centro Histórico de Chetumal con edificios de 25 metros de altura



Grafica Residual TT Harvey 2011 Orientación a favor del viento en un escenario del Centro Histórico de Chetumal con edificios de 25 metros de altura

