



**Universidad Autónoma del Estado de México**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“APLICACIÓN DE MODELACIÓN DINÁMICA PARA EL ANÁLISIS  
DE EVACUACIÓN DE LA POBLACIÓN EN CASO DE HURACANES”**

**TRABAJO TERMINAL DE GRADO**

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CADENA DE SUMINISTRO**

PRESENTA:

**ING. JOSÉ LUIS LÓPEZ CERVANTES**

TUTOR ACADÉMICO:

**DR. JAVIER GARCÍA GUTIÉRREZ**

TUTOR EXTERNO:

**DR. ÓSCAR CRUZ CASTRO**

TUTORES ADJUNTOS:

**M. EN I. GASTON VERTIZ CAMARON**

**M. EN I. JOSÉ CONCEPCIÓN LÓPEZ RIVERA**

TOLUCA, MÉXICO

ENERO DE 2020

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>vi</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
Objetivo general .....	2
Objetivos particulares .....	2
Hipótesis .....	3
Metodología.....	3
<b>Capítulo 1. Antecedentes.....</b>	<b>5</b>
1.1. Evacuaciones en caso de huracanes .....	5
1.2. Marco legal en México .....	7
1.2.1. Planes de evacuación en México .....	11
1.3. Modelos de evacuación .....	12
1.3.1. Enfoque de los modelos dinámicos.....	13
1.3.2. Modelos de evacuación masiva .....	14
1.3.3. Modelos de ubicación-asignación.....	15
1.3.4. Modelos de flujo de red al costo mínimo.....	16
1.3.5. Modelos de ruteo clásico del vehículo (RCV), ruteo de localización (RL) enumeración de ruta (ER) .....	17
1.3.6. Modelos de simulación de tráfico dinámico.....	17
<b>Capítulo 2. Marco Teórico.....</b>	<b>21</b>
2.1. El concepto de modelo.....	21
2.2. El proceso de construcción de modelos: marco metodológico .....	23
2.3. Principios del modelado de flujo de tráfico.....	24
2.3.1. Modelado mesoscópico de flujos de tráfico .....	25
2.3.2. Enfoque macroscópico .....	26
2.3.3. Enfoque microscópico.....	27
2.4. Modelo de transporte .....	27
2.4.1. Asignación del tráfico .....	29
2.4.2. Modelos de tráfico dinámico.....	31
2.4.3. Equilibrio dinámico en redes de transporte .....	32

2.4.4. Modelo estático.....	34
2.4.5. Principales alcances de los modelos estáticos y dinámicos .....	34
<b>Capítulo 3. Enfoque de asignación dinámica y selección de tiempo de viajes .....</b>	<b>36</b>
3.1. Equilibrio de tráfico dinámico con elección de tiempo de salida .....	36
3.1.1. Modelos dinámicos de viaje.....	36
3.1.2. Costo específico de tiempo de salida .....	36
3.1.3. Costo de viaje .....	37
3.1.4. Costos específicos de tiempo de llegada.....	37
3.1.5. Condición de equilibrio.....	38
3.2. Modelos de demanda dinámica de viajes.....	38
3.3. Probabilidad de evacuación .....	41
3.4. Capacidad efectiva en condiciones de evacuación .....	42
3.5. Tamaño de parque vehicular .....	42
3.6. Software para modelación dinámica .....	43
3.6.1. Marco de tiempo para tomar decisiones .....	45
3.6.2. Enfoques de modelado .....	46
<b>Capítulo 4. Caso de Estudio. Salina Cruz, Oaxaca.....</b>	<b>52</b>
4.1. Espacio físico.....	52
4.2. Antecedentes de fenómenos hidrometeorológicos .....	53
4.3. Organización y funciones de las autoridades .....	55
4.3.1. Factores y Niveles de Riesgo .....	56
4.3.2. Deslizamientos.....	57
4.3.3. Inundaciones.....	58
4.3.4. Vías de acceso.....	61
4.3.5. Refugios temporales .....	62
4.4. Solución al Modelo estocástico en Software Cube Highway .....	64
4.5. Escenarios para modelar.....	65
4.6. Modelo de evacuación dinámica .....	69
4.6.1. Distribución de la demanda de evacuación .....	71
4.7. Resultados del modelo estático .....	72
4.7.1. Volumen de vehículos en la red .....	77
4.8. Resultados del modelo dinámico .....	78

<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>87</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>89</b>
<b>Anexo A. Modelación en Cube .....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo B. Gráficas de tiempos de evacuación de los diferentes escenarios del modelo estático .....</b>	<b>98</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Tabla de acercamiento/parte delantera del ciclón .....	11
Figura 2. Modelo de flujo de red dinámico espacio-tiempo.....	14
Figura 3. Esquema del modelo de simulación de tráfico de evacuación .....	18
Figura 4. Enfoques del modelado del flujo vehicular.....	25
Figura 5. Curvas flujo velocidad y costo flujo .....	30
Figura 6. Curva de respuesta de evacuación con distribución de Weibull.....	39
Figura 7. Curva de respuesta de evacuación con distribución de Sigmoid .....	41
Figura 8. Área afectada y tiempo de preparación ante un desastre natural.....	44
Figura 9. Marco de tiempo para la toma de decisiones .....	45
Figura 10. Enfoques Macro, Micro y Meso de modelado de tráfico.....	47
Figura 11. Mapa de ubicación del Municipio de Salina Cruz, Oaxaca. ....	53
Figura 12. Zonas de deslizamiento en el municipio de salina Cruz .....	57
Figura 13. Zonas de inundaciones .....	59
Figura 14 Centroides de las zonas de evacuación .....	60
Figura 15. Vías de acceso representadas en el SIG de CUBE.....	62
Figura 16. Ubicación de refugios .....	64
Figura 17. Comparación de los tiempos de evacuación de los orígenes 10, 11, 12 y 13 al destino 1.....	75
Figura 18. Representación de la ruta 2 (origen 10 al destino 1).....	76
Figura 19. Representación de la ruta 3 (origen 13 al destino 1).....	76
Figura 20. Volumen vehicular del escenario 1 todas las rutas .....	77
Figura 21. Volumen vehicular del escenario 2 todas las rutas .....	77
Figura 22. Volumen vehicular del escenario 3 todas las rutas .....	78
Figura 23. Comparación de tiempos de evacuación de todos los orígenes con un mismo destino para los 3 escenarios .....	84
Figura 24. Vehículos en cola al final del periodo 24 en el escenario 1 .....	84
Figura 25. Vehículos en cola al final del periodo 24 en el escenario 2.....	85
Figura 26. Vehículos en cola al final del periodo 24 en el escenario 3.....	85
Figura 27. Volumen vehicular del escenario 3 en el periodo 19 .....	86

## Lista de Tablas

Tabla 1. Documentos de Protección Civil para elaborar planes en casos de emergencias.....	12
Tabla 2. Modelos de evacuación masiva.....	19
Tabla 3. Parámetros de la distribución Weibull para la respuesta de evacuación .....	40
Tabla 4. Parámetros de la distribución Sigmoid para la respuesta de evacuación .....	41
Tabla 5. Determinación de probabilidad de evacuación.....	42
Tabla 6. Criterios operativos de la TAT.....	50
Tabla 7. Software disponible para modelar el tráfico con enfoque mesoscópico .....	51
Tabla 8. Huracanes y tormentas que han producido afectaciones en Salina Cruz Oaxaca .....	54
Tabla 9. Zonas y números de hogares a evacuar con su nivel de riesgo por inundaciones y deslaves.....	60
Tabla 10. Capacidad y velocidad de los arcos en base a su clasificación .....	62
Tabla 11. Refugios temporales en caso de huracanes .....	63
Tabla 12. Matriz Origen-Destino viajes en vehículos particulares para el escenario 1 y 2.....	66
Tabla 13. Matriz Origen-Destino viajes en camiones para el escenario 1 .....	67
Tabla 14. Matriz Origen-Destino viajes en autobuses para el escenario 2.....	67
Tabla 15. Matriz Origen-Destino viajes en vehículos particulares para el escenario 3.....	68
Tabla 16. Matriz Origen-Destino viajes en autobuses para el escenario 3.....	69
Tabla 17. Porcentaje de viajes de evacuación en periodos de 15 minutos .....	71
Tabla 18. Resultados del tiempo de evacuación del escenario 1 .....	72
Tabla 19. Resultados del tiempo de evacuación del escenario 2.....	73
Tabla 20. Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3.....	74
Tabla 21. Resultados del tiempo de evacuación del modelo dinámico de la ruta 1 y 2 del escenario 1 .....	78
Tabla 22. Resultados del tiempo de evacuación del modelo dinámico de la ruta 1 y 2 del escenario 2 .....	79
Tabla 23. Resultados del tiempo de evacuación del modelo dinámico de la ruta 3 y 4 del escenario 3 .....	80
Tabla 24. Cantidad de autobuses por origen destino para evacuar en el escenario 2.....	81
Tabla 25. Cantidad de autobuses por origen destino para evacuar en el escenario 3.....	82

## Resumen

El tema de evacuación de las personas ha sido abordado en el pasado bajo diferentes enfoques, la gran mayoría de ellos considerando características estáticas en la forma de realizarlo (enfoque macroscópico), eliminando el supuesto de variabilidad en el proceso mismo de evacuación. En este sentido, las herramientas de modelación dinámica consideran explícitamente dicho supuesto y, de hecho, han logrado suficiente precisión a soluciones de modelación del tránsito urbano, donde la periodicidad y duración de ciertas condiciones inherentes a él se consideran explícitamente, son el factor principal de análisis (enfoque mesoscópico) en la representación de las interrelaciones de flujos sobretodo en escenarios donde la capacidad de vialidades e intersecciones son limitadas. En el presente Trabajo Terminal de Grado, se busca verificar el nivel de adaptabilidad de las herramientas de modelación dinámicas a la evacuación de personas en escenarios de huracanes, considerando la naturaleza propia de decisiones de las personas afectadas en un entorno de emergencia, así como los cambios representados principalmente con las disminuciones eventuales y progresivas en la capacidad de la red de transporte de un lugar para atender una situación de evacuación. Para dimensionar la naturaleza de los impactos, se compararán los resultados obtenidos del análisis dinámico con los obtenidos con un enfoque estático y valorar así su conveniencia.

## **Introducción**

El cambio climático ha modificado la intensidad y frecuencia de fenómenos naturales, y en particular en el caso de huracanes, estos han incrementado su magnitud haciendo más vulnerables las zonas costeras causando afectaciones físicas y económicas a la población y aún más grave, pérdidas humanas. Entre los factores que aumentan el riesgo frente a un huracán se encuentran el desarrollo desordenado, rápido crecimiento urbano y altos niveles de pobreza, lo que da lugar al incremento en la vulnerabilidad de la población (Wilches-Chaux, 1989), por lo que, en caso de ocurrir un huracán de magnitud considerable, se requiere contar con una planificación estratégica para la evacuación de la población utilizando los recursos tecnológicos al alcance.

Uno de los temas de la planificación estratégica ante el riesgo de un desastre es la dificultad de la evacuación de personas debido a las ventanas de tiempo cortas, los recursos tecnológicos escasos para movilizar a la población, así como las condiciones cambiantes de tránsito de las vialidades que generalmente se ven rebasadas en su capacidad para lograr una rápida evacuación (ISDR, 2009), por lo que se requiere de estrategias para distribuir el flujo de la población y reducir los tiempos de evacuación.

Como proceso, la evacuación de personas ante el riesgo de la ocurrencia de un huracán debe ser el resultado de un proceso de planificación que busque responder íntegramente al objetivo de aminorar la exposición de las personas al sufrimiento. En este proceso deben considerarse factores que intervienen en la dinámica del comportamiento de las personas. Entre otros factores que influyen en la evacuación es la cantidad de personas que sí deciden evacuar, la localización de albergues, cantidad de recursos tecnológicos para movilizar personas, comunicaciones y condiciones de la infraestructura vial.

En el caso específico de las acciones de traslado de personas hacia los lugares seguros, el éxito de esta etapa depende de varios factores, tales como la hora del día, el clima, el tiempo de respuesta, las rutas de evacuación, las condiciones del flujo de tránsito, los controles de tránsito,



entre otros (Dash y Gladwin, 2007). Las decisiones tomadas para la administración de la infraestructura vial y el control de tránsito son cruciales para evitar congestionamientos cuya severidad pueda incrementar los tiempos de traslado y aumentar así la exposición al riesgo, durante el proceso de ubicar a la población en los albergues y zonas seguras.

El enfoque de modelación dinámica de evacuación de personas ante escenarios de desastres por huracanes tiene el objetivo de estudiar y analizar los factores que pueden incidir en las condiciones de flujo y capacidad de las vialidades e intersecciones en un determinado periodo de tiempo, con la finalidad de que, durante la planificación estratégica, se asegure que las decisiones tomadas por las autoridades durante una evacuación sean las mejores.

## **Objetivo general**

Desarrollar un modelo de evacuación dinámica aplicando simulación mesoscópica de tránsito para evaluar diferentes escenarios de evacuación de personas a fin de apoyar la toma de decisiones en situaciones de emergencia en un caso de estudio.

## **Objetivos particulares**

1. Comprender el estado de la práctica en las estrategias de evacuación en nuestro país.
2. Conocer el estado del arte de la modelación de las estrategias de evacuación.
3. Analizar las bases de la teoría de los modelos de evacuación dinámicos.
4. Identificar diferentes parámetros para obtener los viajes generados de evacuación, destino de los viajes y características de las vialidades para el caso de estudio.
5. Desarrollar un modelo de evacuación de emergencia que sea capaz de predecir las condiciones de tráfico durante una evacuación y evaluar diferentes escenarios.
6. Calcular la flotilla vehicular necesaria para realizar una evacuación de acuerdo con los escenarios simulados.

## **Hipótesis**

La simulación mesoscópica de tráfico estima de forma más precisa la evolución de la evacuación de personas ante la ocurrencia de un huracán para evaluar de planes de evacuación respecto a los enfoques estáticos en escenarios de capacidad de vialidades e intersecciones.

## **Metodología**

La metodología que se seguirá en el presente Trabajo Terminal de Grado es la siguiente:

Se presenta el marco legal respecto a situaciones de emergencia para identificar las metodologías y documentos de apoyo orientados a la elaboración de planes de evacuación en nuestro país.

Posteriormente se hace la búsqueda de los modelos de evacuación en las bases de datos científicas internacionales focalizando la búsqueda en los contextos tecnológicos y en los de toma de decisiones y se realiza una taxonomía de estos de acuerdo con sus objetivos.

En seguida, se muestran las bases de la teoría de los modelos de evacuación dinámicos y modelos estáticos, y de este modo se identifican sus principales diferencias. Se hace una clasificación de los modelos de evacuación dinámicos, y se identifican sus alcances y limitaciones.

Posteriormente, y con base en el estado de la práctica, se identifican los componentes para la modelación dinámica y una taxonomía del software disponible en cuanto a sus características y funcionalidad en la modelación dinámica y estática.

El siguiente paso consiste en identificar los parámetros del caso de estudio para alimentar el modelo de evacuación dinámica y el modelo estático con base en el estado de la práctica

Finalmente se analizan los resultados del modelo de evacuación dinámica y del modelo estático aplicado a un caso de estudio para obtener datos para la toma de decisiones para la evaluación de un plan de evacuación.

El presente trabajo está conformado por cuatro capítulos, en los que se encuentra el contenido siguiente:

En el Capítulo 1 se presenta el estado del arte de la modelación de las estrategias de evacuación, así como el estado de la práctica en las estrategias de evacuación y las brechas que existen con respecto al estado del arte.

Posteriormente, el Capítulo 2 contiene el marco teórico que dará el sustento al proceso metodológico respecto a la evacuación de personas en caso de ocurrencia de huracanes: la descripción y los supuestos de los modelos de evacuación dinámicos y de los modelos de evacuación estáticos.

En el Capítulo 3 se presentan los componentes utilizados para la modelación dinámica de acuerdo con los objetivos de las autoridades en caso de evacuación de personas, así como una descripción del software para la modelación dinámica y estática.

En seguida, en el Capítulo 4 se muestra la aplicación de la modelación dinámica, así como se muestran las diferencias significativas con respecto a la modelación estática en un caso de estudio.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones derivadas de la realización de este trabajo, así como algunas líneas de trabajo futuro que se desprenden del presente Trabajo Terminal de Grado.

## **Capítulo 1. Antecedentes**

La evacuación de personas como acción protectora en el caso de la ocurrencia de un huracán requiere de planificación tanto individual como comunitaria y una coordinación de varias entidades gubernamentales, de acuerdo con su marco legal, para estimar el movimiento de la población, ayudar a planificar y comunicar rutas de evacuación apropiadas y determinar dónde y cuántos refugios públicos deben localizarse, así como prepararse para brindar apoyo y/o tomar decisiones con respecto a las personas que no pueden o no desean evacuar. En este sentido, es importante el desarrollo de protocolos de acción que sean de utilidad al momento de tomar decisiones, y aún más importante, poder adaptarlas al contexto particular de cada evento, minimizando la exposición a los efectos adversos de fenómenos naturales y que evolucionan de una forma imprecisa y tan compleja como es el caso de un huracán.

### **1.1. Evacuaciones en caso de huracanes**

El peligro que representan los huracanes a un determinado lugar está en función de la probabilidad que un huracán de cierta intensidad impacte y de la vulnerabilidad del país a dicho impacto. La vulnerabilidad es un concepto complicado, que tiene dimensiones físicas, sociales, económicas y políticas. Incluye aspectos tales como la capacidad de las estructuras a resistir las fuerzas de un evento peligroso, el grado en que la comunidad posee los medios para organizarse y cómo esté preparada para manejar las emergencias, el grado en el que la economía local dependa de un sólo producto o servicio que fácilmente puede ser afectado por el desastre, y del grado de centralización en la toma de decisiones del sector público (Wilches-Chaux, 1989).

Al entender el riesgo que representan los huracanes, se pueden tomar medidas específicas de mitigación para reducir el riesgo a las comunidades, la infraestructura y las actividades económicas. Las pérdidas humanas y económicas pueden ser reducidas considerablemente mediante esfuerzos bien organizados para implementar medidas preventivas apropiadas, respecto a la percepción del peligro por la población y la emisión de alertas oportunas.

La Gestión Integral de Riesgos (GIR) se puede realizar con pronósticos de tiempo o de clima en donde la condición de la amenaza no puede ser modificada por la acción humana. Aunque se expresen en probabilidades, las predicciones informan de la condición atmosférica esperada o más probable. El monitoreo continuo del estado del tiempo o clima adverso permite pronosticar el riesgo, y éste puede ser reducido o amplificado dependiendo de la respuesta que se dé ante el anuncio de la ocurrencia de una amenaza, pues aún en plazos cortos, el riesgo se puede reducir si se moviliza a la población a refugios o suspendiendo ciertas actividades.

Los sistemas de alerta temprana se consideran uno de los principales elementos de la reducción del riesgo y prevención de desastres. Su objetivo es: “facultar a los tomadores de decisión, individuos y comunidades que enfrentan una amenaza, a que actúen con suficiente tiempo y de modo adecuado para reducir la posibilidad de que se produzcan lesiones personales, pérdidas de vidas y daños a los bienes y al medio ambiente” (ISDR, 2009).

Cuando un huracán toca tierra, los vientos extremos e inundaciones causan daños a la infraestructura y una de las más afectadas es la de transporte; dicho daño puede restringir la capacidad de evacuación drásticamente si los caminos son afectados, además de las complicaciones en la etapa de post-desastre cuando se requiere la entrega de ayuda a los damnificados, se vuelve complicado realizar estas tareas, por lo tanto, evacuar al máximo número de personas antes de que un huracán toque tierra es de extrema importancia y llega a ser uno de los objetivos primarios para las autoridades (Swamy *et al.*, 2017).

Dixit y Wolshon (2014) han estudiado estrategias para administrar el tránsito durante una evacuación y los criterios de entrada de mayor importancia para la realizar análisis consistentes en los valores de las capacidades de las vialidades. Este dato representa el umbral en los flujos de salida durante la evacuación y afecta las operaciones de tráfico, dando lugar a congestionamientos. El cálculo de los valores de capacidad para los planes de evacuación puede estar basados en el Manual de Capacidad de Carreteras (*Highway Capacity Manual*, HCM) de la Agencia Federal de Carreteras de los Estados Unidos de América (*Federal Highway Administration*, FHWA) o en observaciones realizadas durante horarios de máxima demanda. En el HCM la capacidad es definida como la tasa horaria máxima en una sección de una vialidad

en un periodo bajo condiciones prevalecientes. Estos valores de capacidad son suficientes en la planeación y diseño del transporte, pero no son apropiados para el análisis a nivel operacional debido a condiciones las cuales los valores de capacidad no han sido medidos.

De acuerdo con Wolshon *et al.*, (2016) las características del flujo de tránsito durante las evacuaciones pueden ser fundamentalmente diferentes de las experimentadas durante períodos punta y en eventos especiales. Específicamente, a pesar de la enorme y sostenida demanda generada por una evacuación masiva, los flujos de evacuación pueden alcanzar un máximo valor durante un breve período y luego caer a tasas de flujo que pueden mantenerse durante varias horas debido a que la gran cantidad de flujo de entrada que puede saturar la vialidad.

## **1.2. Marco legal en México**

En México existe una Ley General de Protección Civil y leyes de Protección Civil en todas las entidades federativas, así como un Manual de Organización y Operación del Sistema Nacional de Protección Civil, que establece el marco de actuación y coordinación de todos los sectores que integran dicho sistema.

El Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) es un conjunto orgánico y articulado de estructuras, relaciones funcionales, métodos y procedimientos que establecen las dependencias y entidades del sector público entre sí, con las organizaciones de los diversos grupos voluntarios, sociales, privados y con las autoridades de las entidades federativas y los municipios, a fin de efectuar acciones coordinadas, destinadas a la protección de la población contra los peligros y riesgos que se presenten en la eventualidad de un desastre.

El artículo 14 de la Ley General de Protección Civil establece que: en una situación de emergencia, el auxilio a la población debe constituirse en una función prioritaria de la Protección Civil, por lo que las instancias de coordinación deberán actuar en forma conjunta y ordenada, en los términos de la Ley General de Protección Civil y de las demás disposiciones aplicables.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de acuerdo con la Ley General de Protección Civil “es la institución técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil encargada de crear, gestionar y promover políticas públicas en materia de prevención de desastres y reducción de riesgos a través de la investigación, el monitoreo, la capacitación y la difusión. Tiene entre sus atribuciones, el apoyo técnico al Sistema Nacional, así como la integración del Atlas Nacional de Riesgos, la conducción de la Escuela Nacional de Protección Civil, la coordinación del monitoreo y alertamiento de fenómenos perturbadores y promover el fortalecimiento de la resiliencia de la sociedad en su conjunto”.

De acuerdo con el CENAPRED un fenómeno hidrometeorológico “es una calamidad que se genera por la acción violenta de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, inundaciones pluviales, fluviales, costeras, lacustres, tormentas de nieve, granizo, heladas, sequías y las ondas cálidas y gélidas”.

El subprograma de auxilio del CENAPRED contempla diez funciones básicas de respuesta que a continuación se describen, las cuales no necesariamente se desarrollan en orden secuencial:

1. Alertamiento: es la acción que tiene por objeto informar de manera oportuna, precisa y suficiente a las autoridades responsables de participar en las acciones de respuesta y a la población sobre la presencia o impacto de un agente perturbador, con el fin de salvaguardar su integridad, sus bienes, la planta productiva y el medio ambiente y garantizar el funcionamiento de los servicios esenciales de la comunidad.
2. Planes de emergencia: instrumento orientado a dar una respuesta oportuna, adecuada y coordinada ante una situación de emergencia con la finalidad de minimizar los daños en el menor tiempo posible. Consiste en la planeación y organización de las acciones, personas, servicios y recursos disponibles con base en el análisis de riesgos y la evaluación de sus consecuencias.
3. Coordinación de la emergencia: consiste en el establecimiento de sistemas y mecanismos para la adecuada coordinación de las dependencias, entidades, organismos, sectores y recursos que intervienen en las acciones de atención durante una situación de emergencia o desastre.

4. Evaluación de daños: consiste en evaluar y cuantificar los daños producidos por un fenómeno perturbador para determinar la dimensión física y social de las afectaciones, la estimación de la pérdida de vidas humanas y bienes, las necesidades que deben satisfacerse y la determinación de posibles y nuevos riesgos.
5. Seguridad: acciones de protección a la población contra riesgos de cualquier tipo, susceptibles de afectar la vida, la paz social y bienes materiales en una situación de emergencia o desastre.
6. Búsqueda, salvamento y asistencia: búsqueda acción o efecto de localizar a personas reportadas como extraviadas o perdidas; Salvamento acción o efecto de salvar o salvaguardar a la población que se ubique en zonas catalogadas de alto riesgo para su traslado a zonas o lugares que garanticen su seguridad ante un peligro; Asistencia conjunto de acciones de ayuda que se presta a la población de carácter médico, jurídico, social o beneficencia.
7. Servicios estratégicos, equipamiento y bienes: función orientada a atender los daños causados por un fenómeno perturbador a los bienes de la colectividad, de importancia decisiva para su sostén y desarrollo; y reorganizar los servicios, ofreciendo en su caso alternativas de prestación.
8. Salud: acciones orientadas a proporcionar los servicios médicos necesarios que permitan salvar vidas, prevenir enfermedades y evitar epidemias ante una emergencia o desastre.
9. Aprovechamiento: acción orientada a suministrar víveres, agua, medicamentos, material de abrigo y otros elementos necesarios para la población afectada y aquella localizada en refugios temporales.
10. Comunicación social de la emergencia: acción orientada a brindar información oportuna y veraz a la población e instituciones, creando confianza, reduciendo la ansiedad y diluyendo rumores.

Durante la temporada de ciclones tropicales opera el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT CT), cuya pretensión es el oportuno alertamiento y adecuada coordinación interinstitucional que de manera consensuada genere una respuesta organizada del Sistema



Nacional de Protección Civil. El SIAT CT considera dos tablas que indican la fase de acercamiento y la de alejamiento de un ciclón tropical, cada una de ellas tiene cinco etapas de alerta, para hacer un seguimiento de dicho fenómeno, desde que se origina hasta que se disipa, incluye como parámetros principales la escala Saffir-Simpson de huracanes, velocidad de traslación, distancia a las costas nacionales y el tiempo de llegada del ciclón tropical, la Figura 1 muestra la tabla de acercamiento de la parte delantera del ciclón.

Las etapas de alerta están determinadas por cinco colores: azul, verde, amarillo, naranja y rojo, los cuales tienen como propósito emitir una serie de recomendaciones dirigidas hacia el Sistema Nacional de Protección Civil. Las etapas de alerta y las recomendaciones se describen a continuación:

- **Alerta azul:** esta etapa consiste en activar procedimientos internos de comunicaciones, mantener alto nivel de atención a información oficial.
- **Alerta verde:** Implica la notificación a los integrantes del Sistema Nacional de Protección Civil en ámbitos estatales y municipales, instalar centros estatales y municipales de coordinación y comunicación, revisar directorios de comunicaciones y el inventario de recursos materiales y humanos, planes y procedimientos de comunicación y operaciones, revisar listado y condiciones de operatividad de los refugios temporales, identificar instalaciones de emergencia.
- **Alerta amarilla:** en esta etapa se valora la posibilidad de instalar consejos estatales y municipales de protección civil, preparar posibles refugios temporales, en islas valorar y considerar inicio de evacuación, valorar y en su caso desplegar personal y recursos.
- **Alerta naranja:** involucra la notificación a integrantes del Sistema Nacional de Protección Civil en ámbitos estatales y municipales, resguardo de autoridades y población, sesión permanente de los consejos estatales y municipales de Protección Civil, así como de las instancias de coordinación y comunicación, información por conducto de los medios de comunicación masiva de los efectos del fenómeno y la necesidad de permanecer bajo resguardo.

- **Alerta roja:** en esta etapa se mantendrán a resguardo total la población y autoridades, cancelando toda actividad manteniéndose en sesión permanente los consejos estatales y municipales de Protección Civil, así como las instancias de coordinación y comunicación.

**Figura 1. Tabla de acercamiento/parte delantera del ciclón**

Tabla de acercamiento/parte delantera del ciclón									
Promedio de escalas	Detección o más de 72 hrs.	72 a 60 horas	60 a 48 horas	48 a 36 horas	36 a 24	24 a 18 horas	18 a 12 horas	12 a 6 horas	Menos de 6 horas
0 a 0.99									
1 a 1.99									
2 a 2.99									
3 a 3.99									
4 a 4.99									
5									

Fuente: Elaboración propia con datos SIT CT

### 1.2.1. Planes de evacuación en México

Riesgos como inundaciones, deslaves, erosión, flujos, entre otros, causados por un fenómeno natural hidrometeorológico como un huracán están documentados en el Atlas Nacional de Riesgo, Atlas Estatales de Riesgo y Atlas municipales de Riesgo y son integrados y publicados por el CENAPRED. En los Atlas de Riesgo están representados por mapas los niveles de riesgo (muy alto, alto, medio y bajo) y son útiles para identificar las zonas pobladas que requieren ser evacuadas y las zonas seguras para la instalación de albergues.

Los planes de evacuación para conocer el estado de la práctica se buscaron en páginas oficiales de Protección Civil de diversos estados y municipios con riesgo de huracanes, lo que se encontró fueron principalmente manuales de organización y planes operativos que contiene las responsabilidades de varios niveles y áreas de gobierno y sociedad civil. En páginas oficiales de Protección Civil si se identificaron listados de albergues temporales, pero no planes de evacuación con elementos como: puntos de reunión, rutas de evacuación, cantidad y tipo de vehículos. La Tabla 1 muestra algunos documentos que se encontraron en las páginas oficiales de Protección Civil y sus objetivos.

**Tabla 1. Documentos de Protección Civil para elaborar planes en casos de emergencias**

Estado	Documento	Objetivo
Oaxaca	Manual de organización interinstitucional de reducción de riesgos de desastres del Estado de Oaxaca	Instrumento de consulta para funcionarios y privados de las actividades que deben realizar
Oaxaca	Plan municipal de prevención y reducción de riesgos de desastres	Procesos de organización para la respuesta ante un desastre
Guerrero	Plan de contingencias para la temporada de lluvias y ciclones tropicales	Ubicación y responsables de zonas seguras, fases de emergencia
Yucatán	Programa especial de ciclones tropicales	Protocolos de operación y responsables de áreas
Quintana Roo	Sistema de alerta temprana de para ciclones tropicales	Fases de alerta y recomendaciones a la población
Baja California Sur	Plan de contingencias de riesgos hidrometeorológicos	Acciones generalizadas para que el gobierno del estado realice en una emergencia
Chiapas	Informe de acciones de prevención para temporada de lluvias y ciclones	Manual de acciones y responsables de cada área e identificar escenarios de emergencia

Fuente. Elaboración Propia

### 1.3. Modelos de evacuación

En una evacuación masiva, en donde la población amenazada en caso de la ocurrencia de un huracán de gran intensidad y tiene que ubicarse en lugares seguros, la evacuación se realiza por una combinación del uso de vehículos particulares y flotillas de vehículos de transporte público, militares, particulares, entre otras. La evacuación de personas involucra la gestión del flujo de tránsito cuando es en vehículos particulares. En el caso de evacuaciones utilizando flotillas de vehículos, éstas involucran recoger a las personas en lugares específicos como puntos de reunión y llevarlos a los refugios. En estos casos se analizan problemáticas referentes a la capacidad del vehículo y al ruteo (Ozdamar y Ertem, 2015).

Wolshon y Mcardle (2009) analizaron datos de tráfico durante las evacuaciones sugiriendo que el flujo de tráfico, particularmente los flujos máximos, en condiciones de evacuación difieren de los periodos que no son de emergencia resaltando la importancia del uso de tasas máximas de flujo de tráfico de evacuación para el modelado.

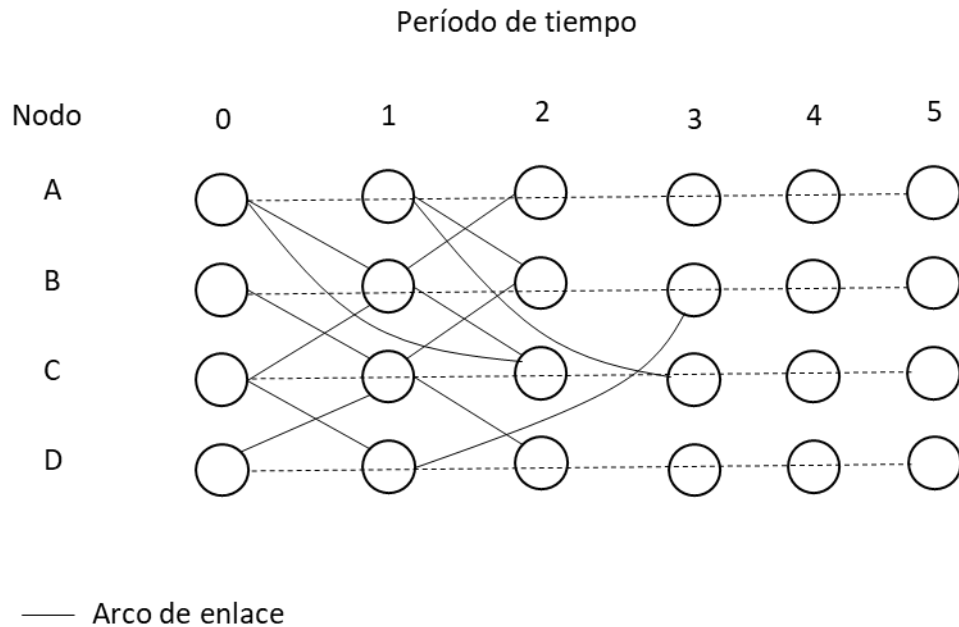
En el caso del modelo de Barbarosoglu y Arda (2004) considera vehículos capacitados, este modelo tienen restricciones relacionadas a la capacidad del vehículo, condiciones del camino, seguridad y accesibilidad, disponibilidad de vehículos, capacidad de refugios y de las zonas para recoger a las personas, ventanas de tiempo, limitaciones para suministrar combustible, respuesta a un plazo determinado, presupuesto limitado en flota vehicular, y vehículos trabajando en ventanas de tiempo. Las metas fijadas son usualmente costo/tiempo de viaje, satisfacción de la demanda, tiempo de respuesta, y los relacionados a los riesgos del camino.

### **1.3.1. Enfoque de los modelos dinámicos**

Según Ozdamar y Ertem (2015) el enfoque de flujo de red dinámico (FRD) los vehículos son representados como valores enteros de flujo que están enlazados con flujos de mercancías en un modelo de red de flujo multi-periodo. Las variables de flujo del vehículo tienen una lista de enlaces (desde y hacia los nodos) y lapsos que indican el tiempo del vehículo en atravesar un arco.

En Haghani (1996) el modelo de Flujo de Red Dinámico espacio-tiempo (FRD-ET) la red espacio-tiempo es usada para crear una copia de la red para cada intervalo de tiempo en el horizonte de planeación. Esta estructura conduce a relacionar las variables enteras del vehículo para una longitud del horizonte de planeación y un número de nodos en la red que representan origen, destino y transferencia en un período de tiempo como se observa en La Figura 2. Los enlaces de transferencia que se crean en el nodo A y B representan los enlaces de transferencia de suministro. Por otro lado, los enlaces de transferencia que se muestran en los nodos C y D denotan los enlaces de transferencia de demanda.

**Figura 2. Modelo de flujo de red dinámico espacio-tiempo**



Fuente: Haghani (1996)

Yi y Linet (2007) proponen un modelo FRD red excluyendo espacio-tiempo. Este es un modelo entero mixto de flujo de red para productos múltiples, con el objetivo de minimizar el tiempo de llegada de mercancías a centros de ayuda y en la provisión de atención médica. El modelo se resuelve mediante un procedimiento de dos etapas en el que se formula y resuelve.

- En la primera etapa un modelo compacto trata los vehículos como flujos enteros.
- Posteriormente en la segunda etapa, se obtienen instrucciones detalladas del vehículo utilizando un algoritmo simple de división del vehículo que convierte los flujos de vehículos enteros en itinerarios de vehículos binarios y luego
- Resuelve un conjunto de ecuaciones lineales para asignar un cronograma de carga / descarga a cada uno de estos itinerarios.

### 1.3.2. Modelos de evacuación masiva

Los modelos de evacuación masiva se centran en Evacuación de Vehículos (EV), administración del flujo del tránsito y en evacuación por flotillas de vehículos FV, los modelos EV frecuentemente son representados por enlazar modelos de flujo de red al Costo Mínimo

(FRCM) con las limitaciones sobre los arcos del flujo vehicular por hora (Wolshon y Mcardle, 2009).

Los modelos FV optimizan las rutas de los vehículos con componentes como lugares para recoger personas, albergues y almacenes. Estos modelos consisten en el problema de ruteo de vehículos para el caso de recoger personas. En algunos modelos los tiempos de partida de los autobuses son considerados para mitigar la congestión del tránsito. El objetivo de los modelos FV puede estar relacionado al tiempo, número de evacuados, costo y flujo. La representación del vehículo está de acuerdo con los modelos clásicos de ruteo de vehículos y enumeración de ruta.

En los modelos de gestión de flujo de tránsito se tienen Modelos de Evacuación de Automóviles (MEA) y Modelos de transmisión de celda (MTC), estos modelos se han utilizado para maximizar el flujo de tránsito y minimizar el tiempo de viaje, con grupos múltiples donde unos tienen diferencias sobre otros, problemas de asignación de tráfico tal que se minimicen los riesgos de tráfico. Chiu y Zheng (2007) utilizan la optimización robusta para tratar con la incertidumbre en el flujo de tránsito

Li *et al.* (2018) plantea un modelo multi objetivo donde se consideran grupos para evacuar, con dos objetivos para el usuario (minimizar el tiempo de espera y minimizar el tiempo total para cada grupo a evacuar) y dos objetivos óptimos para el sistema donde minimiza el tiempo libre de cada salida para maximizar la eficiencia de la evacuación y minimizar la variabilidad de la duración del tiempo ocupado en las salidas para equilibrar sus cargas de tráfico.

### **1.3.3. Modelos de ubicación-asignación**

Según Bayram (2016), los modelos de asignación de tráfico dinámico se utilizan por dos razones específicas e importantes:

- La primera, es estimar los tiempos de viaje del enlace en los que incurrirían los vehículos que ingresan a cada enlace de acuerdo con el momento de entrada y el estado del enlace en ese momento. Obtener estimaciones razonables de los tiempos de viaje en los enlaces

de tráfico y, por lo tanto, en las rutas ha sido una de las razones principales para modelar los flujos de tráfico que varían con el tiempo.

- La segunda razón, es representar la propagación del flujo de tráfico en redes que varían en el tiempo de manera realista, lo cual es una diferencia importante con respecto a la asignación de tráfico estático.

Ya que, en la asignación estática, se supone que el flujo de tráfico es constante en todas las rutas desde su origen hasta su destino y, por lo tanto, la propagación del flujo se logra de manera implícita. Sin embargo, en el flujo de tráfico de los modelos dinámicos de asignación debe propagarse a través de un enlace de manera consistente con la velocidad de los vehículos.

Kongsomsaksakul *et al.* (2005) utilizaron el modelo de ubicación-asignación en el problema de la planeación en caso de evacuación, minimizando el tiempo total para evacuar la red de acuerdo con el número y localización de los albergues, con restricciones de: la capacidad de los albergues, asegurando que la demanda total desde el origen a los albergues no supere la capacidad de estos y la capacidad máxima del arco.

#### **1.3.4. Modelos de flujo de red al costo mínimo**

Los modelos de flujo de red al costo mínimo (FRCM), minimizan claramente el tiempo de la red en un tiempo que depende de la rapidez del flujo del modelo, donde el tiempo de viaje y la capacidad de los arcos son las variantes de tiempo, un modelo de Programación Entera Mixta para la vía basado en el ruteo de la evacuación considera demoras debido a las intersecciones y a los cambios de carril (Lim *et al.*, 2012). Los métodos de solución están basados en algoritmos de la ruta más corta. Los modelos de Flujo Máximo Capacitado Entero Mixto se han propuesto para maximizar el número de evacuados (Miller-Hooks y Patterson, 2004).

Por su parte Shahabi y Wilson (2018) proponen una solución para la selección de la ruta más corta, basada en la capacidad en un entorno dinámico y estático, asumiendo que todos los vehículos empiezan la evacuación al mismo tiempo, que los automóviles en un punto de evacuación son inseparables y deben recorrer el mismo camino y los cambios en la red de

carreteras no se conocen inicialmente; Por lo tanto, el algoritmo solo puede ajustarse una vez que aprende sobre ellos, lo único que no puede cambiar son las ubicaciones de los albergues.

### **1.3.5. Modelos de ruteo clásico del vehículo (RCV), ruteo de localización (RL) enumeración de ruta (ER)**

Un modelo RCV minimiza el tiempo de viaje incluido el tiempo de espera en la evacuación donde se considera la capacidad de los vehículos para recoger a los evacuados y llevarlos a los albergues (Murray-Tuite y Mahmassani, 2003). Un modelo ER se ha usado para decidir el número de viajes realizados entre el punto de recogida y el albergue. La capacidad de los autobuses no puede excederse y el objetivo es maximizar el número de evacuados (Balcik *et al.*, 2008). Los modelos RL se han utilizado para una demanda incierta, localización de albergues, determinar el tamaño de la flota de vehículos, y optimizar las rutas de los autobuses usando una combinación de metaheurísticos. La meta es minimizar el tiempo total de viaje (Song *et al.*, 2009).

Cabe señalar que en el modelo de Goerigk *et al.* (2014) se obtiene un tiempo superior y uno inferior para la toma de decisiones, considerando que las personas abandonarán el área de desastre por su cuenta en automóvil, por lo que el tráfico se analiza desde el enfoque microscópico y para el caso de las personas que dependen de las flotillas de vehículos los evacuados deben ser transferidos desde un conjunto de puntos de recolección dentro del área en peligro a un conjunto de puntos de refugio en un área segura que minimiza el tiempo necesario para que la última persona sea llevada a un lugar seguro. Los puntos de recogida, así como los refugios deben elegirse antes de calcular el horario del autobús, lo que da como resultado un modelo secuencial de dos etapas.

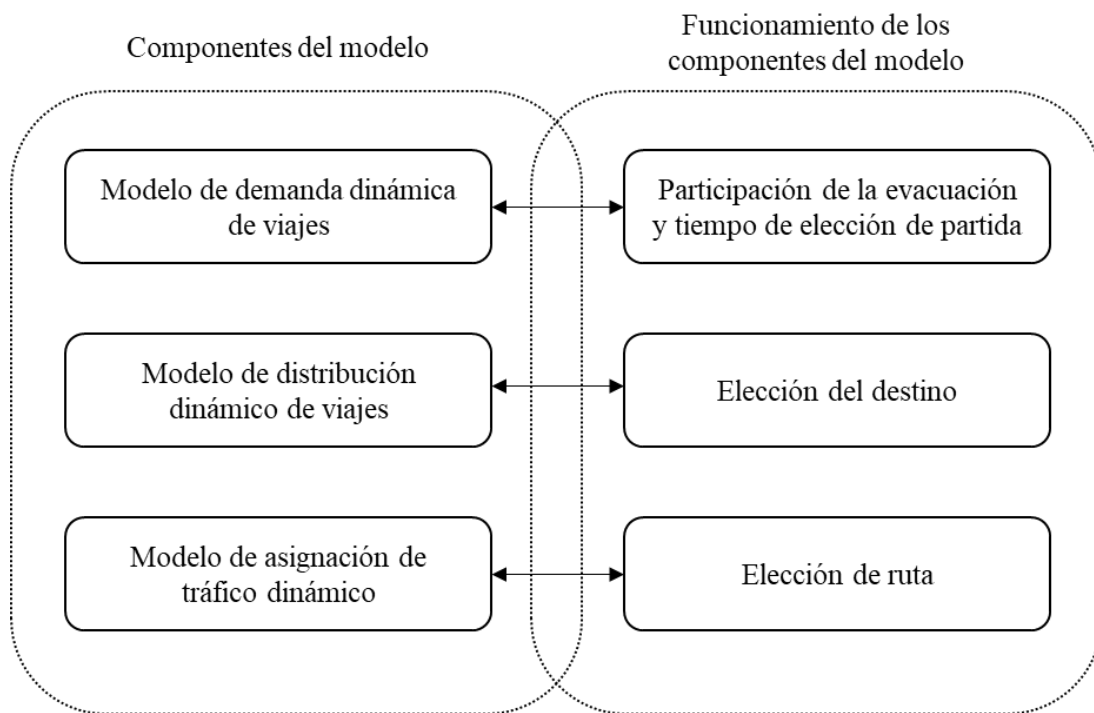
### **1.3.6. Modelos de simulación de tráfico dinámico**

En la investigación de Pel *et al.* (2012), los autores plantean un modelo de simulación de tráfico dinámico para estudios de evacuación. Los componentes del modelo están representados en la Figura 3 y descritos a continuación:



- Un modelo de demanda de viaje dinámico, donde se predicen la cantidad de personas que evacuarán y cuándo estas personas partirán, simulando las tasas de participación de evacuación y los patrones de tiempo de salida resultante,
- Un modelo de distribución de viaje, el cual describe el resultado de la elección del destino de los individuos de acuerdo con el tipo de ubicación y las preferencias del tipo de ubicación y,
- Un modelo de asignación de tráfico, el cual se refiere a la asignación de viajeros a las rutas, modelando así las decisiones de elección de ruta de los viajeros.

**Figura 3. Esquema del modelo de simulación de tráfico de evacuación**



**Fuente: Pel et al. (2012)**

Estos métodos eluden el comportamiento de la elección de ruta simplemente observando la demanda total de viajes distribuidos espacialmente, los puntos de salida de red disponibles y los cuellos de botella en la capacidad de la red de carreteras.

En el modelo de micro simulación de Robinson *et al.* (2018) se evalúa el rendimiento de la red durante las evacuaciones en huracanes con condiciones de incidentes de tránsito anticipadas, se

utilizaron flujos de tránsito de horas pico de la mañana y la noche de la zona de estudio para la simulación. Se simularon dos escenarios de tormenta, cada uno realista para el área probada y diseñada para acentuar la red de transporte de una manera diferente. Cada escenario de tormenta incluyó tres niveles de modelado de incidentes: sin incidentes, un bajo número de incidentes y un alto número de incidentes. El tráfico que se cargó a la red para representar las condiciones de la carretera durante una evacuación fue de 25% más que el tráfico de la hora punta.

En este contexto se presenta en la Tabla 2 un resumen de los modelos de evacuación masiva con sus características principales y objetivos.

**Tabla 2. Modelos de evacuación masiva.**

<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Característica</b>	<b>Objetivo</b>
Wolshon y McArdle (2009)	Evacuación de vehículos	Modelos de flujo de red al Costo Mínimo (FRCM) con limitaciones sobre los arcos del flujo vehicular por hora	Costo mínimo
Ozdamar y Ertem (2015).	Evacuación por flotilla de vehículos	Modelo clásico de ruteo de vehículos	Relacionado al tiempo, costo, flujo, número de evacuados
Chiu y Zheng (2007)	Modelos de gestión de flujo de tránsito	Grupos múltiples donde unos grupos tienen diferencias sobre otros	Maximizar el flujo de tránsito y minimizar el tiempo de viaje
Li <i>et al.</i> (2018)	Modelo multi objetivo	Considera grupos para evacuar con objetivos para el usuario y para el sistema	Minimiza tiempo de espera, tiempo total para evacuar cada grupo, y tiempo libre entre cada salida y variabilidad de tiempo de salidas
Kongsomsaksakul et al. (2005)	Modelos de ubicación-asignación	Selección de la ruta hacia los albergues, con límites en la capacidad de la red y los albergues.	Minimizar el tiempo para evacuar
Miller-Hooks y Patterson (2004)	Modelos de flujo de red al costo mínimo	Tiempo que depende de la rapidez del flujo del modelo, donde el tiempo de viaje y la capacidad de los arcos son las variantes de tiempo	Minimiza el tiempo de la red
Shahabi y Wilson (2018)	Modelo de la ruta más corta	Modelo de una etapa estática para cargar la red y una etapa dinámica para realizar cambios ya que aprendió de la etapa estática.	Evalúa la capacidad de la vialidad

<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Característica</b>	<b>Objetivo</b>
Lim <i>et al.</i> (2012)	Modelo de Programación Entera Mixta	Considera demoras debido a las intersecciones y a los cambios de carril.	Minimiza el tiempo de la red
Murray-Tuite y Mahmassani. (2003)	Modelos de ruteo clásico del vehículo	Considera la capacidad de los vehículos para recoger a los evacuados y llevarlos a los albergues	Minimiza el tiempo de viaje incluido el tiempo de espera en la evacuación
Balcik <i>et al.</i> (2008)	Modelo de enumeración de ruta	Decidir el número de viajes realizados entre el punto de recogida y el albergue	Maximizar el número de evacuados.
Song <i>et al.</i> (2009).	Modelo de ruteo de localización	Para una demanda incierta	Minimizar el tiempo total de viaje y tamaño de flota
Pel <i>et al.</i> (2012)	Modelos de simulación	Modela el tráfico dinámico de una red con un modelo de asignación, demanda y tiempos de partida de los evacuados.	Minimiza el tiempo de evacuar
Goerigk <i>et al.</i> (2014)	Modelo secuencial de dos etapas	Modelo de tráfico con enfoque microscópico para evacuación por vehículos privados y por flotilla de vehículos.	Minimiza el tiempo de evacuación
Robinson <i>et al.</i> (2018)	Modelos de micro simulación	Modelo que evalúa el rendimiento de la red con condición de incidentes.	Representa las condiciones de una evacuación

Fuente. Elaboración Propia

## Capítulo 2. Marco Teórico

Debido a la complejidad de las operaciones de logística humanitaria en la planeación, implementación y control de flujos de personas, productos, materiales e información en caso de un fenómeno meteorológico como un huracán, las herramientas de modelación matemática logran representar escenarios con los cuales se busca determinar alternativas que mejoren las actividades de logística humanitaria. En el caso específico de la evacuación de personas la modelación dinámica del flujo vehicular describe el comportamiento de una red para la toma de decisiones en la gestión del tránsito vehicular.

En el caso de las estrategias de preparación, en particular con la administración de operaciones en la evacuación de la población en caso de un huracán (Bayram, 2016) indica que la gestión del tránsito de evacuación es crítica ya que la vida de las personas corre peligro y si no se planifica y lleva a cabo de manera efectiva, el aumento de la demanda de tráfico que supera la capacidad de la red de transporte puede causar congestión y dejar a los evacuados en peligro, por lo que herramientas como la modelación con el enfoques de asignación de tráfico, modelos de tiempo de viaje para representar la congestión y los enfoques de propagación del flujo de tráfico, estudios de comportamiento para estimar la demanda de evacuación y tasa de respuesta y estrategias de gestión de oferta y demanda empleadas en modelos estáticos/dinámicos, determinísticos/estocásticos, son metodologías de solución empleadas para identificar brechas, limitaciones y sugerir futuras direcciones de investigación.

### 2.1. El concepto de modelo

Para Banks *et. al* (2014) para modelar un sistema, es necesario comprender el concepto de un sistema y los límites del sistema.

- Un sistema se define como un grupo de objetos que se unen en alguna interacción o interdependencia regular hacia el logro de algún propósito.
- Un sistema a menudo se ve afectado por los cambios que ocurren fuera del sistema. Se dice que tales cambios ocurren en el entorno del sistema.

- En los sistemas de modelado, es necesario decidir sobre el límite entre el sistema y su entorno. Esta decisión puede depender del propósito del estudio.

Un modelo como una representación de un sistema con el propósito de estudiar ese sistema, considerando para la mayoría de los estudios solo los aspectos que afectan el problema bajo investigación, estos aspectos deben estar representados en un modelo del sistema; El modelo, por definición, es:

- Una simplificación del sistema.
- El modelo debe ser lo suficientemente detallado como para permitir sacar conclusiones válidas sobre el sistema real.
- El modelo contiene solo aquellos componentes que son relevantes para el estudio.

Según Ortúzar y Willumsen (2011), un modelo es, esencialmente, una representación simplificada de la realidad: el sistema de interés. Es una abstracción que se utiliza para lograr mayor claridad conceptual acerca de la realidad, reduciendo su variedad y complejidad a niveles que permitan comprenderla y especificarla de forma adecuada para su análisis. Normalmente en un modelo se expresan de forma simplificada las características más relevantes (para el caso estudiado) de un cierto fenómeno o situación real. Una definición tan amplia permite diferenciar los modelos físicos de los abstractos. Por ejemplo, en la primera categoría están aquellos modelos tales como maquetas arquitectónicas, túneles de viento o modelos en canales, oleaje y presas en ingeniería hidráulica o modelos de regeneración de playas o de diques portuarios, los cuales están claramente limitados al aspecto del diseño. En la segunda categoría, la tipología de modelos abarca desde los modelos mentales, usualmente utilizados en nuestras interacciones diarias, hasta las representaciones formales y abstractas (típicamente analíticas) de alguna teoría acerca del sistema de interés de que se trate y de cómo funciona (modelos abstractos).

Entre los modelos formales, los que nos interesan son los modelos matemáticos, es decir, los modelos que usan el formalismo de las matemáticas para expresar las relaciones del sistema en términos cuantitativos. La forma habitual de establecer dicho formalismo consiste en establecer una relación entre los atributos que caracterizan a las entidades que componen el sistema y las

variables matemáticas que los representan formalmente. Las variables se pueden clasificar como variables de decisión, que representan los aspectos controlables del problema o cursos de acción, y variables no controladas, conjuntos de parámetros, coeficientes y constantes que son entradas del sistema que determinan las alternativas factibles para los cursos de acción. Aquellos aspectos que miden qué tan bien se logran los objetivos del que toma las decisiones se llaman medidas de desempeño, medidas de efectividad o funciones de utilidad. Cuando se puede expresar formalmente en términos de las variables de decisión, se suele llamar función objetivo.

## **2.2. El proceso de construcción de modelos: marco metodológico**

El proceso de construcción del modelo generalmente comienza por el análisis de sistemas, un proceso de adquisición de conocimiento que también puede interpretarse en términos de una abstracción de la realidad, que consiste en la conceptualización de la situación. Según Peck y Daellenbach (1995), este paso tiene tres componentes principales:

1. Elementos de estructura: aspectos o componentes de la situación que son estables o cambian muy lentamente en el marco de tiempo implicado en la situación: estructuras físicas, edificios, equipos, pero también aspectos estructurales funcionales, como propiedades de componentes físicos o lógicos, etcétera.
2. Elementos del proceso: Aspectos de la situación que experimentan cambios o están en un estado de flujo, como actividades en curso dentro de la estructura, flujo y procesamiento de material o información, y la toma de decisiones en curso.
3. Relaciones entre estructura y proceso y entre procesos: ¿Cómo afecta la estructura o condiciona los procesos?, ¿Qué cosas o aspectos son resultados directos o indirectos de tales relaciones?

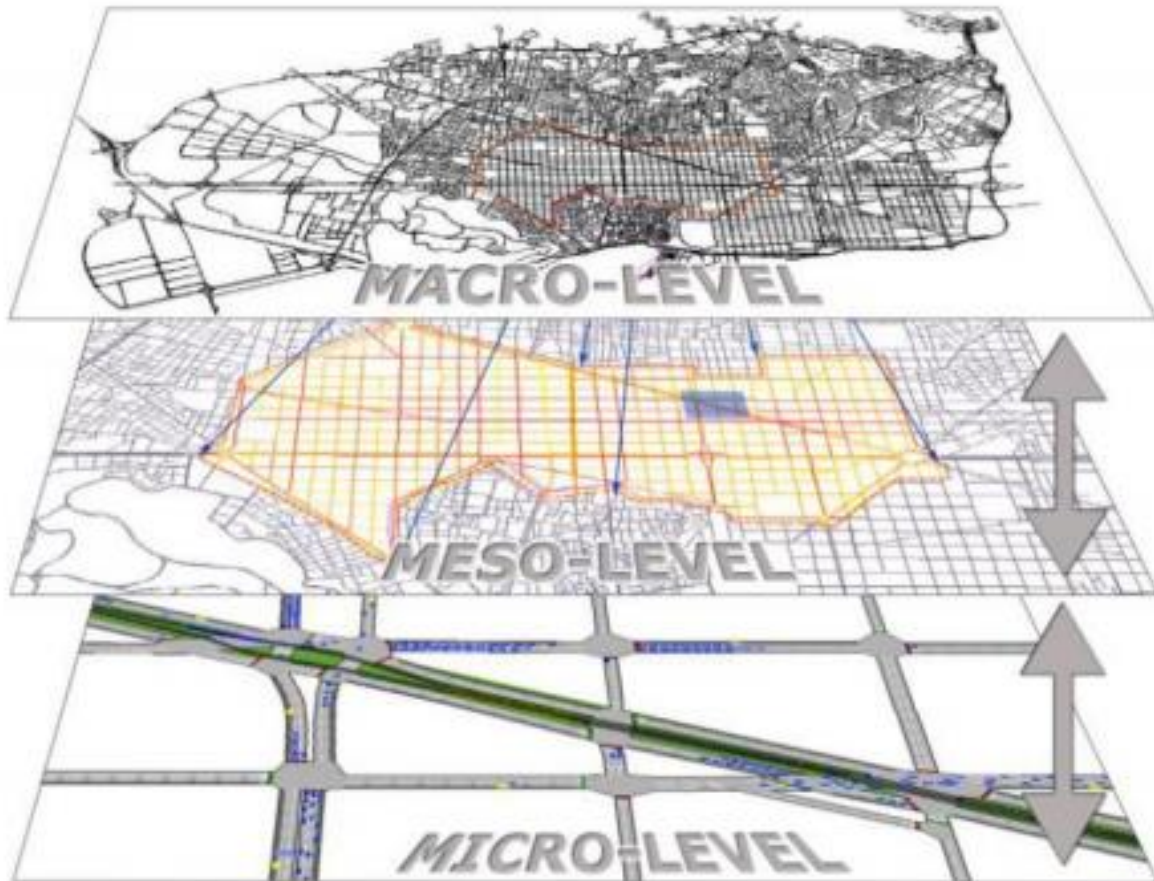
Una descripción del sistema identifica y caracteriza todos los componentes relevantes o entidades del sistema, incluidas las relaciones estructurales y de proceso entre ellos y cómo determinan o están determinados por los objetivos del sistema. Una descripción del sistema consiste en especificar lo siguiente:

1. El o los procesos de transformación o actividades del sistema.
2. Los límites del sistema.
3. Los componentes y subsistemas y las relaciones estables entre ellos o la estructura.
4. Las entradas al sistema desde el entorno.
5. Las salidas del sistema.

### **2.3. Principios del modelado de flujo de tráfico**

Un sistema se puede modelar de diferentes maneras según diversos enfoques, según los propósitos del modelador. Los flujos de tráfico se pueden modelar macroscópicamente desde un punto de vista agregado basado en una analogía hidrodinámica al considerar los flujos de tráfico como un proceso particular de fluido cuyo estado se caracteriza por variables macroscópicas agregadas: densidad, volumen y velocidad. Pero también pueden modelarse microscópicamente, es decir, desde un punto de vista completamente desagregado, destinado a describir el proceso de fluidos a partir de la dinámica de las partículas individuales (en este caso los vehículos) que lo componen. Los modelos mesoscópicos representan una tercera alternativa de modelado intermedio basada en una simplificación de la dinámica vehicular. En la Figura 4 se representan los tres niveles de modelado del flujo de tráfico.

**Figura 4. Enfoques del modelado del flujo vehicular**



Fuente: Aimsun y anexos 2013

### **2.3.1. Modelado mesoscópico de flujos de tráfico**

El modelado mesoscópico del Flujo de Tráfico Dinámico generalmente consiste en una simplificación que, al capturar los elementos esenciales de la dinámica, es menos exigente con los datos y los modelos mesoscópicos son computacionalmente más eficientes que los modelos microscópicos. Estos enfoques combinan aspectos microscópicos (en la medida en que tratan o pueden tratar con vehículos individuales) y aspectos macroscópicos, como los relacionados con la dinámica del vehículo. Básicamente, hay dos enfoques principales para la simulación de tráfico mesoscópico: aquellos en los que los vehículos individuales no se tienen en cuenta y los



vehículos se representan en paquetes o pelotones (aunque los pelotones pueden consistir en un vehículo) que se mueven a lo largo de los enlaces.

Otra diferencia principal entre los enfoques mesoscópicos radica en la forma en que manejan el tiempo. Los enfoques más comunes se basan en simulación sincronizada, es decir, simulaciones orientadas donde el tiempo en el modelo avanza en una unidad de tiempo elegido adecuadamente, también conocido como el paso de simulación. Otros enfoques son asincrónicos o basados en eventos, es decir, el estado del modelo cambia cuando ocurren algunos eventos. El tiempo avanza en cantidades variables, dependiendo de cuándo ocurren tales eventos (Burghout *et al.*, 2005).

Cabe señalar que los enfoques existentes modelan el enlace, explícita o implícitamente, dividiéndolo en dos partes: la parte de ejecución y la parte de cola. La parte de ejecución es la parte del enlace donde los vehículos aún no están retrasados por el derrame de cola en el nodo de aguas abajo, donde la capacidad está limitada por detener, ceder o semáforos. Los nodos se modelan de acuerdo con las interacciones entre los flujos de tráfico en las intersecciones, como módulos de transferencia de nodos o como un servidor de cola, para tener en cuenta explícitamente los semáforos y las demoras que causan (Yang *et al.*, 2000). La dinámica individual del vehículo en la parte de funcionamiento se aproxima mediante un modelo de seguimiento simplificado que es compatible con la relación de velocidad-densidad macroscópica en el enlace. Esta velocidad se usa para estimar la hora más temprana en la que el vehículo podría salir del enlace, a menos que se vea afectado por el rebote de la cola al alcanzar el límite entre la parte en ejecución y la parte de la cola. La dinámica del vehículo se rige por el proceso de descarga de la cola. El límite entre la parte en ejecución y la parte de la cola es dinámico, de acuerdo con los procesos de vertido de colas y descarga de colas.

### **2.3.2. Enfoque macroscópico**

En este caso el flujo de vehículos en la carretera se concibe como el flujo compresible de un fluido descrito por variables macroscópicas asociadas al comportamiento colectivo del sistema. Para ello necesitamos un número grande de vehículos circulando en la carretera, de manera que hablar de variables como la densidad, la velocidad promedio y, algunas otras nos proporcionen

una medida significativa del comportamiento en el flujo. Para trabajar a lo largo de este enfoque se recurre a modelos fenomenológicos que recogen cualitativamente el comportamiento colectivo del flujo, y los parámetros que intervienen en la modelación se determinan al comparar con los datos empíricos (Easa, 1991).

### **2.3.3. Enfoque microscópico**

Desde el punto de vista microscópico, cada vehículo puede seguirse en su trayectoria a lo largo de una carretera y estudiar la dinámica de un conjunto de carros, siguiendo reglas particulares para su movimiento. Este enfoque se conoce como enfoque microscópico y existen una gran cantidad de modelos como el modelo de seguimiento de vehículos, cuyo objetivo es describir el movimiento: aceleración, velocidad, posición, entre otras, en relación con los vehículos precedentes, en condiciones de tránsito congestionado. En este enfoque al especificar las reglas de movimiento individual se tiene una dinámica para el tránsito (Easa, 1991).

## **2.4. Modelo de transporte**

La movilidad debe entenderse como un fenómeno social y económico, una consecuencia de las actividades humanas distribuidas en el espacio y el tiempo (Ortúzar y Willumsen, 2011). Estas actividades generan necesidad de mover personas y mercancías entre varios puntos, que a su vez generan los viajes para lograrlos. El sistema de transporte proporciona la infraestructura y los modos, asegurando que tanto las personas como el flete estarán en el lugar correcto y en el momento adecuado para llevar a cabo las actividades que darán como resultado productos y servicios cuando el mercado los requiera. En términos generales, se puede interpretar la dinámica del proceso en términos de las interacciones entre dos componentes principales: el sistema y los usuarios. Desde el punto de vista del usuario, el objetivo principal al construir un modelo es comprender cómo se toman las decisiones de viaje. Esto supone que los usuarios, es decir, los viajeros, tienen requisitos y preferencias, y una evaluación de cómo funcionan los sistemas de transporte, basándose, por ejemplo, en la experiencia obtenida del uso diario del sistema.

Esta experiencia respalda la percepción de cómo funciona el sistema, lo que, combinado con los objetivos del usuario, es la base del proceso de toma de decisiones del usuario. Esto a su vez determina sus elecciones: la hora de inicio  $t$  del viaje, la ruta  $r$  desde el origen hasta el destino y el modo de transporte  $m$  para hacer el viaje (es decir, automóvil de pasajeros, autobús de transporte público, tranvía, metro, y ferrocarril). Teniendo en cuenta que los orígenes y destinos están determinados por la distribución espacial de las actividades socioeconómicas (una consecuencia de las políticas de uso de la tierra), la combinación de todos estos ingredientes se origina en la demanda de transporte, que es el componente principal en el modelo de cualquier sistema de transporte.

La demanda de transporte se puede modelar de varias maneras. La más detallada consiste en describir la demanda en términos de las actividades. Sin embargo, hasta ahora, el enfoque más utilizado para modelar la demanda es en términos de una representación agregada por medio de una matriz de origen-destino (O-D). La región geográfica abarcada por el objeto de estudio de la red de transporte se divide en términos de zonas de transporte, cada una de las cuales generan y atrae viajes para un fin determinado durante un período de tiempo. Estas zonas de transporte generarán los flujos de viajes desde los orígenes hasta los destinos a lo largo de las rutas disponibles en la red. Los orígenes y destinos generalmente se modelan en términos de nodos ficticios, o "centroides", en la red. La demanda se modela en términos de una matriz cuyas filas son orígenes y cuyas columnas son destinos.

Una suposición es que las autoridades de transporte tienen su propia evaluación sobre el rendimiento del sistema. También se asume que las autoridades tienen objetivos específicos para evitar o mitigar, si es posible, conflictos que pueden escalar en la red, es decir, administrar la red de la manera más eficiente posible para minimizar los retrasos, los tiempos de viaje, administrar congestión, etcétera. Esto se logra mediante esquemas de gestión de tráfico, políticas de control de tráfico y otras estrategias de gestión. El conjunto de estrategias de control y gestión y las condiciones para su uso determina el rendimiento del sistema de transporte o, en otros términos, la capacidad del sistema de transporte para asignar la demanda.

La mayoría de los enfoques de modelado están basados explícita o implícitamente en un enfoque de entidad del objeto que caracteriza los valores del sistema en términos de atributos. En el caso de los modos de transporte, la entidad de un sistema podría ser un enlace que represente una sección de carretera; sus atributos pueden ser la capacidad del enlace, la cantidad de carriles, los modos de transporte que pueden usar cada carril, las funciones de retardo de volumen que calculan el tiempo de viaje del enlace en función del volumen del flujo de tráfico de esta ruta, las relaciones de velocidad y densidad que rigen la dinámica del flujo de tránsito en el enlace, densidad de demoras, entre otras (Barceló, 2010).

Modelar la interacción entre la capacidad y la demanda es la principal hipótesis subyacente, en donde los viajeros van desde el origen hasta los destinos en la red a lo largo de las rutas disponibles que los conectan, lo que implica modelar cómo los viajeros eligen sus rutas a través de la red. La hipótesis que respalda los principales modelos de transporte se basa en el concepto de equilibrio del usuario, que supone que los viajeros intentan minimizar sus tiempos de viaje individuales, es decir, los viajeros eligen las rutas que perciben como las más cortas en las condiciones de tráfico predominantes. Esta hipótesis de modelado se formula en términos del primer principio de Wardrop (1952): los tiempos de viaje en todas las rutas realmente utilizadas son iguales y menores que los que experimentaría un solo vehículo en cualquier ruta no utilizada.

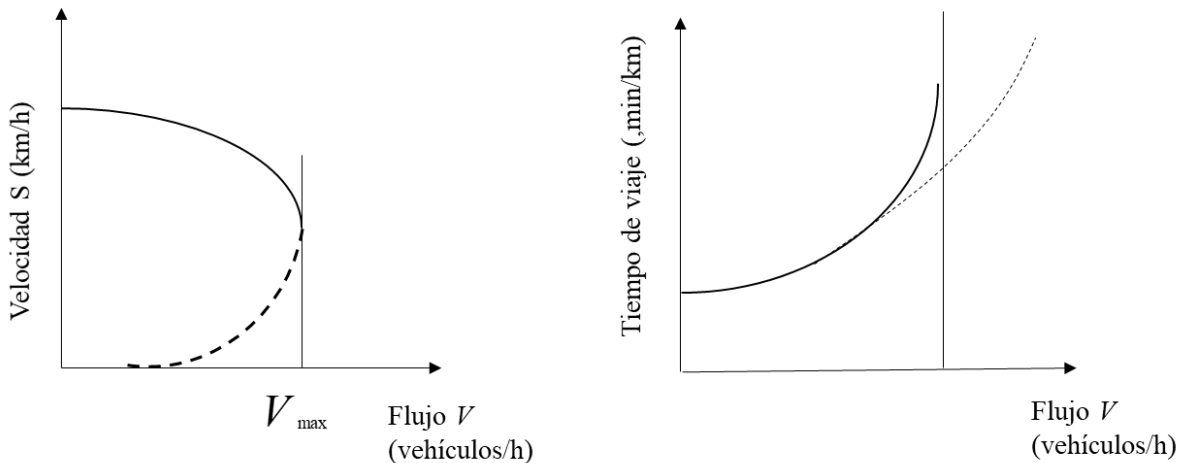
#### **2.4.1. Asignación del tráfico**

La asignación de tráfico es el proceso de determinar cómo el tráfico de la demanda, generalmente definido en términos de una matriz de origen-destino, se carga en la red, y proporciona los medios para calcular los flujos de tráfico en los enlaces de red. Los modelos de asignación de tráfico basados en el principio de Wardrop se conocen como modelos de equilibrio del usuario (Florian y Hearn, 1995). Esta hipótesis de modelado, implementada para demandas de tráfico y flujos promedio que no dependen de la hora del día, ha respaldado los modelos tradicionales de planificación del transporte utilizados en la práctica para el análisis de planificación estratégica.

Para definir el costo de la red Ortúzar y Willumsen (2011) indica que en la elección de ruta los conductores tratan de minimizar una combinación lineal de tiempo y distancia, denominado costo generalizado de viaje (en adelante costo), y se distinguen dos casos cuando se modeliza el tiempo o costo de viaje como una función de flujo existente; el primero cuando las demoras de un arco dependen solo del flujo del arco y el segundo caso cuando el tiempo o costo de viaje en un arco dependen de forma importante en del flujo en otros arcos

En la Figura 5 se observa la relación flujo-velocidad a medida que el flujo crece, la velocidad tiende a decrecer. El flujo alcanza el valor máximo con la capacidad y cuando se intentan forzar los volúmenes de tráfico más allá de ese valor se alcanza una región inestable caracterizada por velocidad y flujos bajos.

**Figura 5. Curvas flujo velocidad y costo flujo**



**Fuente: Ortúzar y Willumsen (2011)**

En la asignación de tráfico la relación velocidad-flujo se trata en términos de tiempo de viaje por unidad de longitud en función del flujo, o más generalmente, como relación costo-flujo.

Los métodos de asignación que consideran los efectos de la congestión requieren la utilización de funciones que relacionan los atributos del arco (capacidad, velocidad a flujo libre) y el flujo sobre la red con las velocidades o los costos resultantes.

$$C_a = C_a(\{V\})$$

Ecuación 1

Donde:

$C_a$  es el costo en el arco  $a$

$V$  es el flujo en el arco

En el costo en el arco  $a$  depende de su propio flujo y de los flujos en los otros arcos de la red que interactúan con el flujo propio.

#### **2.4.2. Modelos de tráfico dinámico**

Los modelos de transporte dinámico corresponden al problema de Asignación de Tráfico Dinámico (ATD) estos modelos son capaces de determinar las variaciones de tiempo de los flujos de enlace o de ruta y permiten describir cómo los patrones de flujo de tráfico evolucionan en el tiempo y el espacio en la red (Mahmassani, 2001).

Para que un modelo de ATD se convierta en uno de Equilibrio Dinámico del Usuario (EDU), las suposiciones de comportamiento sobre cómo los viajeros eligen las rutas tienen que ser coherentes con el principio de Equilibrio Dinámico del Usuario (EDU). Ran y Boyce (1996) formularon la versión del EDU de Wardrop en los siguientes términos: si, para cada par de Origen-Destino en cada instante, los tiempos reales de viaje experimentados por los viajeros que parten al mismo tiempo son iguales y mínimos, la dinámica del flujo de tráfico a través de la red está en un estado de equilibrio dinámico de usuario basado en el tiempo de viaje.

Para resolver el modelo de asignación de tráfico dinámico, Florian *et al.*, (2002) proponen un marco algorítmico que consta de dos componentes principales:

1. Un método para determinar las velocidades de flujo dependientes de la ruta dentro de la red.
2. Un método de carga de red dinámica, que determina cómo estos flujos de ruta dan lugar a volúmenes de arco dependientes del tiempo, tiempos de viaje de arco y tiempos de viaje de ruta.

### **2.4.3. Equilibrio dinámico en redes de transporte**

Una red de flujos dinámicos es un modelo matemático abstracto que permite describir la evolución temporal de los flujos que circulan dentro de una red de transporte. Se puede mencionar la circulación de vehículos en la red de calles y avenidas de una ciudad, el movimiento de pasajeros en un sistema de transporte público, los flujos de evacuación de un estadio al término de un evento deportivo, el flujo vehicular saliendo de una ciudad a las distintas regiones de un país, la transmisión de datos en una red de telecomunicaciones, o el movimiento de partes y piezas dentro de una cadena de montaje.

En las decisiones de ruteo estas son tomadas de forma descentralizada por los distintos individuos, cada uno buscando minimizar su tiempo de traslado desde su origen al destino tomando en cuenta la congestión y tiempos de viaje que se observarán al momento de atravesar cada arco de la ruta escogida. En el contexto de sistemas de transporte, caracterizados por la presencia de una gran cantidad de agentes y donde cada individuo tiene un efecto marginal sobre la congestión, el enfoque clásico considera los flujos como variables continuas y utiliza el concepto de Wardrop para describir la situación de equilibrio de los flujos. Cabe señalar que la saturación de las colas provoca un cambio en los caminos óptimos de viaje, fenómeno que se refleja en la realidad donde el uso creciente de sistemas de ruteo guiado que utilizan información en línea del estado de la red, tales como Tom-Tom o Waze, plantean la necesidad de considerar los fenómenos temporales y espaciales en la propagación de los flujos y la congestión.

El estudio de flujos dinámicos fue inicialmente hecho en el área de optimización en los años 1958 por Ford y Fulkerson que estudiaron el caso de tiempo discreto logrando encontrar su conocido algoritmo de flujo máximo en una red (Ford y Fulkerson, 1958).

Los siguientes trabajos descritos desde un enfoque de flujo dinámico de acuerdo con diversas consideraciones son:

El estudio de flujos dinámicos considerando que las partículas se comportan egoístamente ha sido principalmente considerado en modelos de transporte, los modelos de colas fluidas vistos

desde la teoría de juegos que buscan reducir la congestión en sistemas de transporte (Vickrey, 1969).

También se tiene los modelos que corresponden a una generalización dinámica de los equilibrios de Wardrop estáticos, utilizando formulaciones mediante desigualdades (Friesz *et al.*, 1993).

Por otro lado, los modelos de equilibrios dinámicos para redes de transporte, modelando el problema como una desigualdad variacional en dimensión infinita (Zhu y Marcotte, 2000).

Se tiene el modelo de una red de cola fluida y caracterizadas las derivadas de los equilibrios dinámicos, relacionándolos con flujos finos normalizados, demostrando la existencia y unicidad de equilibrios (Koch y Skutella, 2011).

Cabe señalar que los problemas más comunes en los modelos de asignación con un método estático es que no se consideran fenómenos dinámicos; y el análisis de los impactos de las estrategias de gestión de tráfico no es adecuado debido a que sea muy limitada en términos de comportamiento de los conductores en nivel microscópico o mesoscópico.

El comportamiento dinámico en un área grande que pertenece un modelo con muchas secciones, nodos y una demanda alta, se puede modelar con el enfoque mesoscópico y evaluar la situación implementando escenarios con estrategias de gestión de tráfico. El objetivo principal del método dinámico es demostrar que se pueden evaluar casos de evacuación en términos de planificación y operación en comparación con los métodos que utilizan modelos estáticos. La modelación dinámica pertenece dos tipos:

- a. Asignación dinámica de tráfico (DTA) y
- b. Equilibrio dinámico de usuario (DUE).

La primera es muy útil para casos de evacuación, mientras el método conocido como equilibrio dinámico debe utilizarse en casos donde el comportamiento de tráfico es habitual y la población no se cambia las rutas para ir a su destino (Aymamí *et al.*, 2012).



#### **2.4.4. Modelo estático**

Una forma de clasificar los métodos de asignación de tráfico es según la variación, o no, de las características de la red en el tiempo, en modelos dinámicos y modelos estáticos, respectivamente.

Los modelos estáticos asumen que la oferta y demanda de transporte son independientes del tiempo. También son llamados modelos bidimensionales, puesto que la asignación se hace en las dos dimensiones del área de la red y la dimensión del tiempo no se tiene en cuenta. Por el contrario, los modelos dinámicos, tienen en cuenta la variación en la demanda de transporte y los posibles cambios en las características de la red. Los modelos dinámicos de asignación también son llamados modelos tridimensionales (Immers y Stada, 1998).

Entre los modelos estáticos, están los modelos de tipo "todo o nada" que asignan todos los viajes (demanda) a la ruta más corta, sin tener en cuenta la capacidad de la ruta y por tanto la congestión generada en los arcos. El término "todo o nada" significa que todos los viajes se asignan a la ruta de menor costo fijo y nada a las demás rutas. Este tipo de modelos de asignación son usados por su facilidad y bajo costo computacional, con la desventaja de que no son muy representativos de la realidad. Los modelos de asignación "todo o nada", dados sus supuestos, pueden ser útiles para la asignación en modos en donde no afecta mucho la congestión (disminución de la velocidad debido al exceso de flujo) como por ejemplo trenes y tranvías (Marín y Jaramillo, 2008).

#### **2.4.5. Principales alcances de los modelos estáticos y dinámicos**

Conforme a la revisión de la literatura se ha identificado que en una evacuación de personas en caso de huracanes se tienen ventanas cortas de tiempo para realizarla y la decisión de evacuar o no evacuar, así como el tiempo de salida se da a nivel hogar. Los modelos de asignación dinámica representan de una forma más realista el comportamiento de una red y el tiempo de evacuación, debido a que estos modelos son capaces de determinar las variaciones en el tiempo y considerar los efectos de la congestión. Los modelos de asignación estática no consideran una variación del tiempo y restricciones de capacidad en la red, por lo tanto, subestiman los tiempos

de evacuación al considerar que todos los hogares evacuan en un instante del tiempo, siendo un escenario poco realista. En los siguientes capítulos se describirán los componentes de un modelo de evacuación estático y un modelo dinámico para realizar su respectiva modelación y comparar resultados en un caso de estudio.

## **Capítulo 3. Enfoque de asignación dinámica y selección de tiempo de viajes**

### **3.1. Equilibrio de tráfico dinámico con elección de tiempo de salida**

En el modelo de equilibrio de tráfico dinámico con elección de tiempo de salida de Heydecker y Addison, 2005 muestran que se requieren ciertas propiedades en los componentes del modelo de equilibrio para lograr un rendimiento confiable, los requisitos en los modelos de flujo de tráfico a través de redes deben de respetar cada uno de los siguientes puntos: conservación del tráfico, disciplina primera entrada primera salida (*FIFO*) y causalidad. También se deducen las relaciones necesarias entre flujos y tiempos de viaje y varios costos y cargos que pueden aplicarse a los viajeros, incluidas multas por horarios no ideales de salidas y llegadas, y se utiliza la propiedad de las soluciones de equilibrio para que todos los viajeros de cada par origen-destino incurran en costos idénticos.

#### **3.1.1. Modelos dinámicos de viaje**

En los modelos dinámicos de viaje se hace la suposición de que el comportamiento de los viajeros puede ser representado como una respuesta a diferentes costos asociados con el viaje, considerando un concepto general del costo de viaje con tres distintos componentes:

- El primero es un costo variable en el tiempo que se determina según la hora de salida del origen,
- El segundo es un costo de viaje incurrido como parte del proceso de viaje, y
- El tercero es un costo por tiempo específico que se determina según la hora de llegada al destino.

#### **3.1.2. Costo específico de tiempo de salida**

Cuando  $h(s)$  es el costo incurrido al partir del origen en el momento o tiempo  $s$ . En el caso de un viaje del hogar al trabajo se puede incluir un componente monótono que no aumenta,

representando una preferencia de permanecer en el hogar hasta que exista una atracción al destino, en este caso la primera derivada de este costo tiene una magnitud correspondiente al valor marginal de permanecer en el hogar. Si el valor  $m$  de esta derivada fuera constante  $m \geq 0$ , representaría el valor del tiempo en el hogar, de modo que el tiempo adicional en el hogar conferiría beneficios a esta tasa uniforme.

### 3.1.3. Costo de viaje

El segundo componente es el costo asociado con el viaje a través de cierta ruta empezando en un cierto tiempo. Donde  $p$  denota una ruta a través de la red y  $T_p(s)$  denota el tiempo de llegada al destino que resulta de partir del origen en el tiempo  $s$  y siguiendo la ruta  $p$ . El componente de costo de viaje  $C_p(s)$  asociado con la combinación de elegir puede ser expresada como:

$$C_p(s) = \alpha [T_p(s) - s] + \beta_p \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $\alpha$  representa el valor del tiempo gastado en el viaje, el cual se supone es el mismo para todas las rutas, y  $\beta_p$  representa el costo asociado con esa ruta que son constantes con el tiempo y es independiente de la cantidad de tráfico. Todos los costos son expresados en términos equivalentes del tiempo gastado en viajar, por lo que  $\alpha=1$ . El principio *FIFO* del flujo de tráfico especifica que, si un viajero pospone su salida de su origen, puede esperar llegar a su destino más tarde que si no pospone su salida.

### 3.1.4. Costos específicos de tiempo de llegada

El tercer componente de costo es el asociado con la llegada al destino en un cierto tiempo. Dejando  $f(t)$  como el costo incurrido por llegar al destino en el tiempo  $t$ , por lo que el costo de llegada asociado con el costo de salida del origen en el tiempo  $s$  y usando la ruta  $p$  es:

$$f [T_p(s)] \quad \text{Ecuación 3}$$

### 3.1.5. Condición de equilibrio

De Acuerdo con el modelo el costo total  $C_p(s)$  asociado con la salida en una ruta  $p$  en un tiempo  $s$ , es la suma del costo específico del tiempo de salida  $h(s)$ , el costo de viaje, y el costo específico del tiempo de llegada, por lo que

$$C_p(s) = h(s) + T_p(s) - s + \beta_p + f[T_p(s)] \quad \text{Ecuación 4}$$

Para que la asignación este en equilibrio cuando los viajeros pueden elegir su tiempo de salida, el costo debe ser el mismo para todas las combinaciones de tiempo de salida y ruta que son usados para cada par origen destino. Por lo que el costo total incurrido para todos los viajeros entre cada par origen destino es idéntico y en equilibrio.

### 3.2. Modelos de demanda dinámica de viajes

Los modelos de demanda de viaje predicen la cantidad de personas que evacuarán y cuándo estas personas lo realizarán. En otras palabras, estos modelos describen las decisiones de los viajeros con respecto a la participación en la evacuación y la hora de salida. Estas decisiones generalmente se toman a nivel domicilio (Dash y Gladwin, 2007).

Un enfoque comúnmente utilizado para el modelado dinámico de la demanda de viajes es hacerlo en dos o tres pasos consecutivos. El primer paso es identificar la región que necesita ser evacuada. Para las evacuaciones de huracanes, este procedimiento está formalizado por Wilmot y Meduri (2005) utilizando atributos de huracanes como, la velocidad y el tamaño para identificar las zonas de evacuación. Después de realizar el primer paso e identificar la región de evacuación, se predice la proporción de personas que participarán en la evacuación, así como sus horarios de salida.

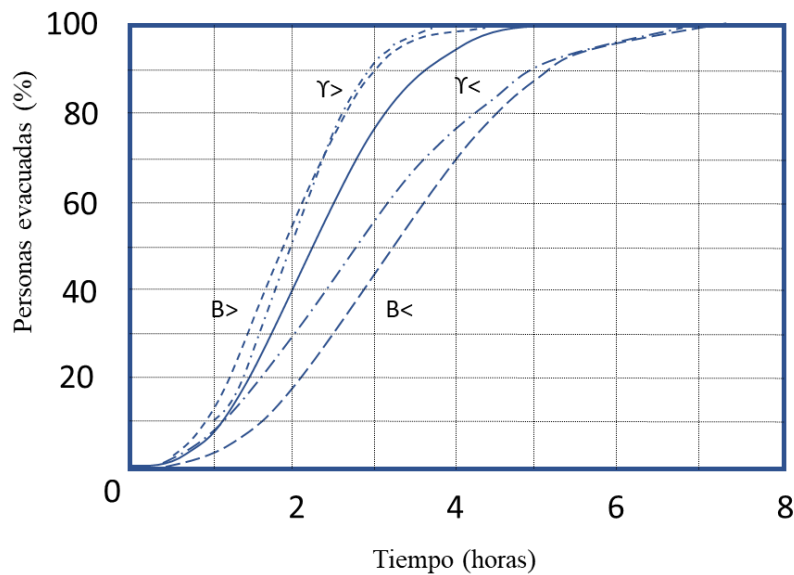
El tercer paso para predecir la dinámica demanda de viajes es modelar la elección de la hora de salida de los viajeros. Esto se hace a menudo aplicando una curva de respuesta exógena que indica el porcentaje de salidas en cada intervalo de tiempo. Se ha asumido que la curva de respuesta de salida sigue muchas distribuciones diferentes. Algunos ejemplos son la salida

instantánea (Chen y Zhan, 2008), una distribución uniforme (Liu *et al.*, 2007; Yuan *et al.*, 2006), una distribución de Rayleigh (Tweedie *et al.*, 1986), una Distribución de Poisson (Cova y Johnson, 2002), una distribución de Weibull (Jonkman, 2007; Lindell, 2008) o curva sigmoidea (Kalafatas y Peeta 2009; Xie *et al.*, 2010). La distribución de Weibull y la curva sigmoidea se usan con mayor frecuencia y se afirma que son las más realistas (Pel *et al.*, 2012).

La forma de la distribución de Weibull está determinada por dos parámetros,  $\beta$  y  $\gamma$ . El efecto de estos parámetros se muestra en la Figura 6 Los valores más altos para  $\beta$  y  $\gamma$  conducen a una respuesta más rápida, mientras que los valores más bajos representan una respuesta más lenta, los parámetros de la distribución se encuentran en la Tabla 3. La distribución de Weibull está dada por la ecuación 5.

$$D(t) = 1 - \exp(-\beta t^\gamma) \quad \text{Ecuación 5}$$

**Figura 6. Curva de respuesta de evacuación con distribución de Weibull**



**Fuente: Pel *et al.*, (2012)**

**Tabla 3. Parámetros de la distribución Weibull para la respuesta de evacuación**

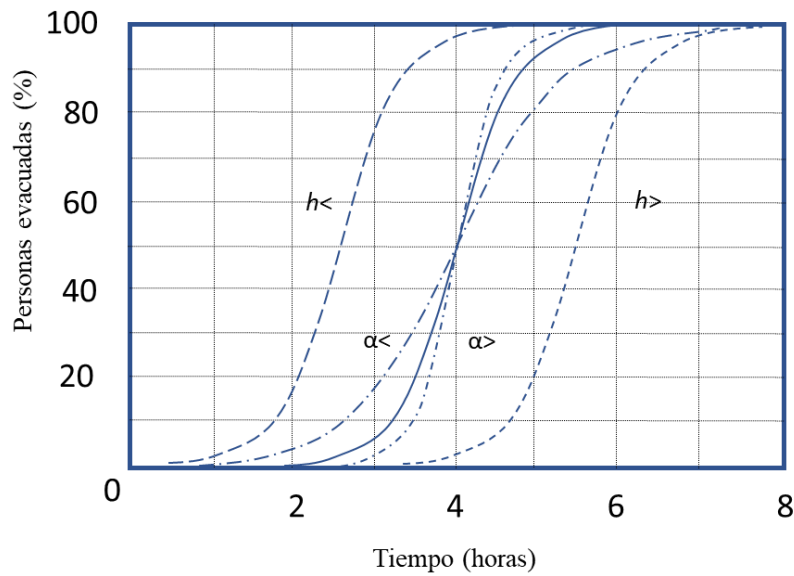
<b>Curva</b>	<b>Parámetros</b>	
Guion corto	$\beta = 0.135$	$\Upsilon = 2.55$
Guion punteado corto	$\beta = 0.085$	$\Upsilon = 3.055$
Curva solida	$\beta = 0.085$	$\Upsilon = 2.55$
Guion punteado largo	$\beta = 0.085$	$\Upsilon = 2.05$
Guion largo	$\beta = 0.035$	$\Upsilon = 2.55$

**Fuente:** Elaboración propia con datos de Pel *et al.*, (2012)

La forma de la curva de la distribución de Sigmoid Figura 7 está determinada por dos parámetros,  $\alpha$  y  $h$ . La tasa de respuesta  $\alpha$  establece la pendiente de la curva, de modo que los valores bajos producen un perfil de salida más uniforme (respuesta más lenta). La mitad del tiempo de carga  $h$  establece el punto medio de la curva y, por lo tanto, indica el tiempo en el que la mitad del número total de viajeros se han ido, los parámetros de la distribución se observan en la Tabla 4. La curva de Sigmoid Ecuación 6 está dada por:

$$D(t) = \left(1 + \exp[-\alpha(t-h)]\right)^{-1} \quad \text{Ecuación 6}$$

Figura 7. Curva de respuesta de evacuación con distribución de Sigmoid



Fuente: Pel *et al.*, (2012)

Tabla 4. Parámetros de la distribución Sigmoid para la respuesta de evacuación

Curva	Parámetros	
Guion largo	$\alpha = 2.5$	$h = 2.5$
Guion punteado largo	$\alpha = 1.5$	$h = 4$
Curva solida	$\alpha = 2.5$	$h = 4$
Guion punteado corto	$\alpha = 3.5$	$h = 4$
Guion corto	$\alpha = 2.5$	$h = 5.5$

Fuente: Elaboración propia con datos de Pel *et al.*, (2012)

### 3.3. Probabilidad de evacuación

Con relación a la decisión de realizar una evacuación en los hogares ante un huracán puede ser visto como una simple decisión: evacuar o permanecer en el hogar, sin embargo, en el proceso de toma de decisiones de los individuos están involucrados diversos aspectos complejos de comportamiento y otros factores externos como la magnitud del huracán, advertencias por parte de las autoridades a la población, experiencia previa, entre otros (Sadri *et al.*, 2014). En



Espinosa (2019), se identifican y clasifican los factores que influyen en la decisión de evacuar o permanecer en el hogar ante la presencia de un huracán en costas de México. Mediante la teoría de utilidad aleatoria plantea un modelo de elección discreta logit binario para estimar la probabilidad de evacuación de la población. La Tabla 5 muestra el valor de probabilidad de evacuación con las variables significantes del modelo.

**Tabla 5. Determinación de probabilidad de evacuación**

		Percepción de la efectividad de la autoridad				
		Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Ingresos	Muy bajo	0.06717	0.54339	0.95162	0.99693	0.99981
	Bajo	0.01038	0.14780	0.74135	0.97933	0.99872
	Medio	0.00153	0.02465	0.29463	0.87347	0.99131
	Alto	0.05738	0.00367	0.05738	0.50150	0.94327
	Muy Alto	0.12786	0.00054	0.00879	0.12786	0.70786

Fuente: Espinosa (2019)

### 3.4. Capacidad efectiva en condiciones de evacuación

Al evaluar planes de evacuación y desarrollar estrategias de administración del tráfico en situaciones de emergencia una de las entradas críticas de un modelo de evacuación es la capacidad vial debido a que limitan las tasas de flujo de salida e influyen en las operaciones de tráfico y la formación de congestión en los modelos mesoscópicos y microscópicos. Dixit y Wolshon (2014) estudiaron sistemáticamente y cuantificaron los flujos máximos de evacuación de diferentes situaciones de emergencia, identificando una reducción del 20% en promedio de la capacidad vial. Esto se puede explicar debido al cambio de comportamiento del conductor durante una evacuación (Hasan *et al.*, 2011).

### 3.5. Tamaño de parque vehicular

La cantidad de vehículos es el parámetro que mejor refleja el equilibrio entre la oferta y la demanda de transporte, por lo que un adecuado dimensionamiento evita el desperdicio de recursos tanto como humanos como económicos (Molinero y Sánchez, 2002).

Los elementos básicos de dimensionamiento son; intervalo es  $i$  es la porción de tiempo entre dos salidas sucesivas de vehículos, la capacidad vehicular  $C_v$  es el número total de espacios en el vehículo, el volumen de pasajeros  $P$  es el número de usuarios en un periodo de tiempo específico, tiempo de ciclo  $t_c$  es el tiempo total de viaje redondo para una unidad de transporte

Para el cálculo del intervalo se tiene:

$$i = \frac{(60)(C_v)}{P} \quad \text{Ecuación 7}$$

La determinación del tamaño del parque vehicular se calcula mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{t_c}{i} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$N$  es el tamaño del parque vehicular

$T_c$  es el tiempo de ciclo

$i$  es el intervalo

### 3.6. Software para modelación dinámica

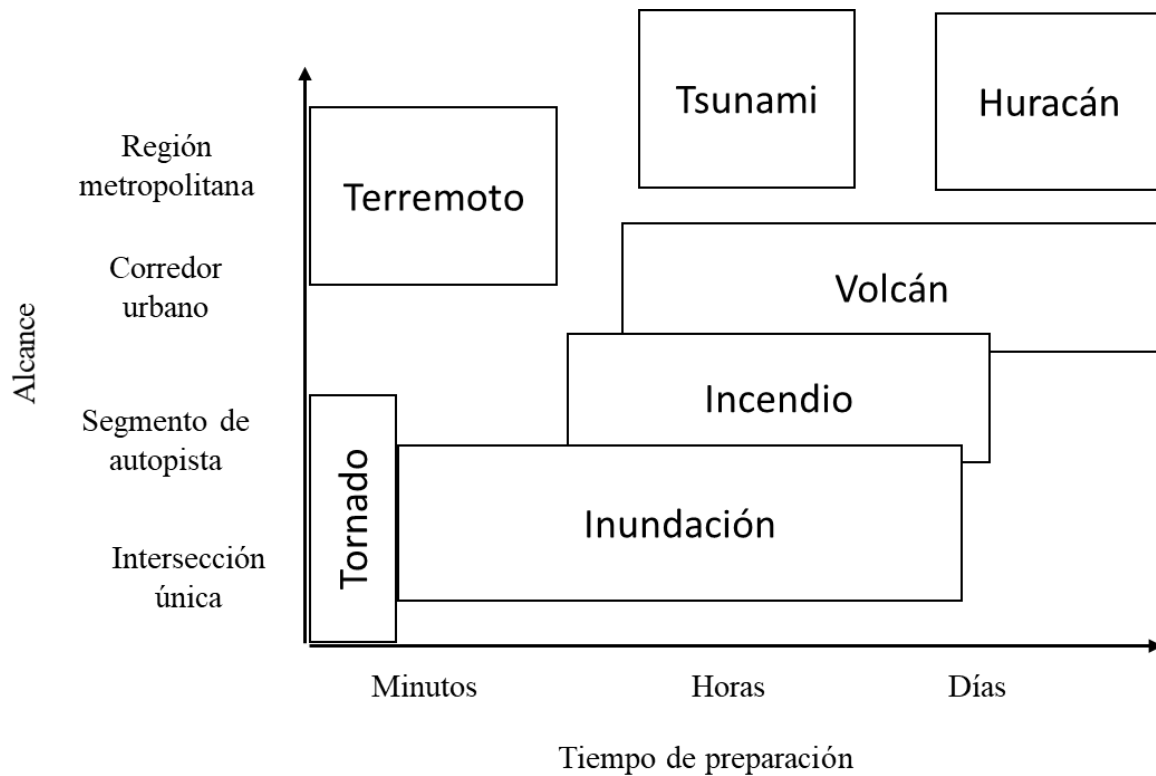
Las evacuaciones pueden asociarse con una amplia gama de eventos naturales y provocados por el hombre. La naturaleza básica de estos eventos, su previsibilidad, frecuencia, alcance geográfico, intensidad y otros factores definen las decisiones que deben tomar las autoridades tanto en la planificación previa al evento como en la respuesta operativa.

Los análisis de modelos en apoyo a estas decisiones también están claramente influenciados por la naturaleza de los propios eventos de evacuación. Los eventos de evacuación por fenómenos naturales que pueden ocurrir en cualquier momento o lugar o con los que ya se cuenta con una probabilidad de ocurrir por los datos históricos y de monitoreo pueden desencadenar operaciones de evacuación, cada evento de evacuación tiene un impacto

geográfico y una cantidad de tiempo disponible para prepararse una vez que un evento específico es inminente (Hardy *et al.*, 2008).

La Figura 8 representa la cantidad de tiempo generalmente disponible para prepararse para el evento (eje X, tiempo de preparación) y el impacto geográfico relativo del evento (eje Y, alcance). Los huracanes y las tormentas tropicales pueden ser volubles en su curso, pero debido a que son frecuentes (una o más cada temporada) y hasta cierto punto predecibles (en términos de tiempo general y amplia amenaza geográfica) generalmente se prestan a largos preparativos y ejecución de un plan. La cantidad de tiempo disponible para la planificación operativa con respecto a una amenaza de un huracán suele ser de días. Sin embargo, los huracanes o tormentas tropicales pueden afectar múltiples jurisdicciones y regiones. Como resultado, el impacto relativo de un huracán o tormenta tropical puede ser bastante grande y puede afectar varios estados o territorios.

**Figura 8. Área afectada y tiempo de preparación ante un desastre natural**

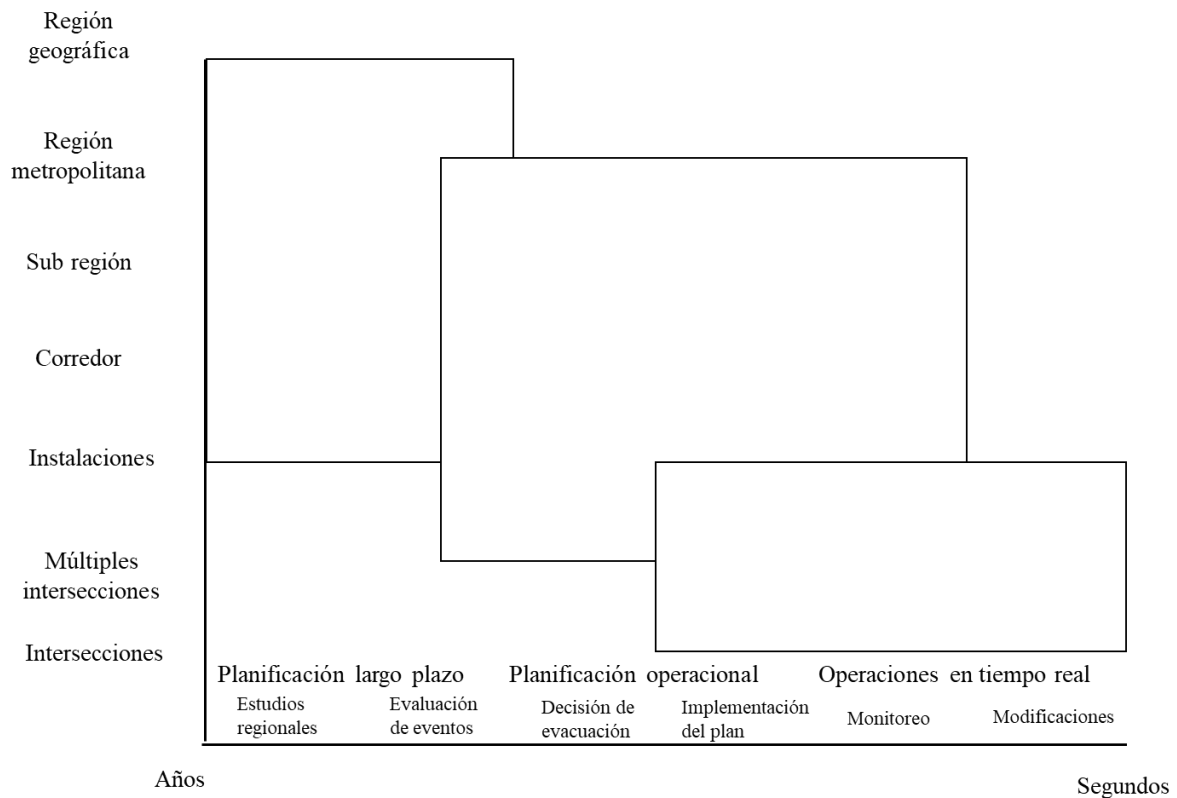


Fuente: Hardy *et al.*, (2008)

### 3.6.1. Marco de tiempo para tomar decisiones

Un aspecto importante en el uso de un modelo de transporte para la gestión y las operaciones de evacuación es la capacidad de los tomadores de decisiones para recopilar, analizar y tomar una serie de decisiones relacionadas con respecto a un evento de evacuación. El propósito de esta sección es proporcionar un marco con el cual considerar el contexto para el modelado del transporte para situaciones de emergencia en una etapa de planificación (mucho antes de una amenaza), planificación operativa (en respuesta a una amenaza inminente) y en operaciones en tiempo real (adaptación al plan). El desglose de decisiones específicas dentro de un evento como un huracán ayuda a comprender la relación entre la toma de decisiones y las etapas de planificación y operación, lo cual es fundamental para comprender dónde se pueden implementar modelos y datos para respaldar estas decisiones de manera efectiva y oportuna.

**Figura 9. Marco de tiempo para la toma de decisiones**



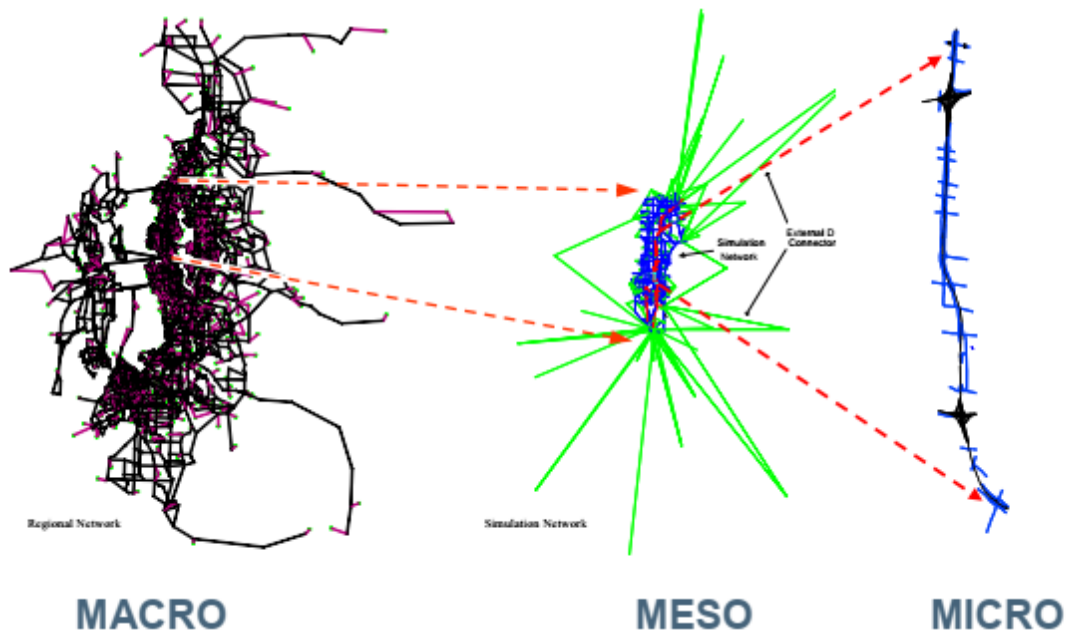
**Fuente: Hardy et al., (2008)**

El marco que se presenta (Hardy *et al.*, 2008), y que se muestran en la Figura 9 separa los diversos aspectos de las decisiones de evacuación en tres categorías clave: planificación a largo plazo, planificación operativa y operaciones en tiempo real. Estas categorías se colocan en el eje horizontal con una escala de tiempo entre años (planificación a largo plazo) a segundos (operaciones en tiempo real). El ancho de estos cuadros indica aproximadamente qué decisiones deben tomarse para cada categoría. Por ejemplo, la planificación a largo plazo generalmente incluye estudios regionales y tiempo permitiendo, algún aspecto del impacto de los posibles eventos de evacuación (huracanes, inundaciones, terremotos, etc.). La planificación operativa incluye la evaluación del impacto del evento, así como la decisión de implementar una evacuación, implementar el plan de evacuación y algunos aspectos del monitoreo del sistema. Las operaciones en tiempo real incluyen monitoreo del sistema y modificación del sistema.

### **3.6.2. Enfoques de modelado**

Existen tres enfoques básicos para modelar una red de tráfico como se mencionó en la sección 4.4.: macroscópico, mesoscópico y microscópico. Estos tres enfoques se distinguen principalmente por su capacidad para modelar un área geográfica (escala) y la precisión del análisis (nivel de detalle). Elegir un cierto enfoque es una compensación entre estos dos criterios. La Figura 10 muestra las diferentes escalas en las que los tres modelos los enfoques operan.

Figura 10. Enfoques Macro, Micro y Meso de modelado de tráfico



Fuente: Hardy et al., (2008)

Los modelos macro pueden representar una región metropolitana completa, pero no pueden representar vehículos individuales y carecen de sensibilidad al tiempo.

En el otro extremo del espectro hay micro modelos que generalmente pueden representar solo un cierto segmento de carretera. Los micro modelos rara vez se usan para representar grandes áreas geográficas, como una región metropolitana entera, ya que requeriría una gran cantidad de datos de entrada y capacidad informática.

Los mesomodelos se encuentran entre estos dos enfoques de modelado. Los modelos Meso pueden representar áreas geográficas más grandes que los micro modelos y permiten resultados más precisos que los modelos macro. Los modelos Meso generalmente representan enlaces de carreteras individuales y vehículos en una red.

La Administración Federal de Carreteras (*The Federal Highway Administration, FHWA*) ha creado un informe exhaustivo que identifica una serie de criterios para seleccionar una herramienta entre muchas, la caja de herramientas de análisis de tráfico (*Traffic Analysis Toolbox*,

TAT) incluye información sobre una gran cantidad de herramientas que van desde la planificación de bocetos hasta el programa de simulación microscópica. De acuerdo con la FHD el primer paso para seleccionar la TAT es identificar el contexto analítico del proyecto que incluye:

- **Planificación:** Esta fase incluye estudios a corto o largo plazo u otros planes de transporte estatales, regionales o locales.
- **Diseño:** Esta fase incluye proyectos aprobados y financiados que están pasando por un análisis de las alternativas o un diseño preliminar para determinar la mejor opción para la implementación. Esta fase también incluye el análisis de las características de la carretera necesarias para operar en el nivel de servicio deseado.
- **Operación:** Estos proyectos comparten muchas características similares con los proyectos de diseño, pero se realizan para determinar el mejor enfoque para optimizar o evaluar los sistemas existentes.

Respecto al alcance geográfico del proyecto se incluyen cuatro tipos de áreas de estudio:

- **Ubicación aislada:** Área de estudio limitada, como una sola intersección o intercambio.
- **Segmento:** red de carreteras lineal o de cuadrícula pequeña.
- **Corredor/red pequeña:** Área de estudio ampliada que generalmente incluye un corredor principal con una o dos arterias paralelas y sus calles transversales conectadas, típicamente menos de 520 kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>).
- **Región:** Área de estudio de la ciudad o del condado que involucra todos los corredores de autopistas y arterias principales, típicamente 520 km<sup>2</sup> o más.

Los tipos de instalaciones están basados en el HMC y estas contienen:

- **Intersección aislada:** Punto de cruce único entre dos o más instalaciones viales.
- **Rotonda:** Intersección no señalizada con una carretera circulatoria alrededor de una isla central con todos los vehículos entrantes cediendo al tráfico circulante.

- Arteria: Calle señalizada que sirve principalmente a través del tráfico y que secundariamente proporciona acceso a propiedades contiguas (espacio de señal de 3.2 kilómetros (km) (2 millas (mi)) o menos).
- Autopista: Carretera de alta velocidad que conecta áreas principales o arteriales, con poca o ninguna interrupción de la señal de tráfico (por ejemplo, autopista de dos carriles, autopista).
- Autopista: Autopista dividida de varios carriles con un mínimo de dos carriles para el uso exclusivo del tráfico en cada dirección y control total del acceso sin interrupción del tráfico.
- Carriles reversibles: Carril de la carretera que cambia de dirección durante diferentes horas del día (los carriles reversibles generalmente se usan para ayudar a aliviar la congestión al acomodar la dirección máxima del tráfico).
- Plaza de peaje: Instalación donde se realiza la transacción de pago por el uso de la carretera (puede estar ubicada aguas arriba o aguas abajo de la instalación de peaje).

Las definiciones de los modos de viaje para analizarse en la TAT se basan en el HCM y son:

- SOV: Vehículo con el conductor como único ocupante.
- Autobús: Vehículo de carretera autopropulsado, con neumáticos de goma, diseñado para transportar una cantidad considerable de pasajeros y comúnmente operado en calles y carreteras.
- Peatón: Individuo que viaja a pie.

La Tabla 6 es un subconjunto del TAT que se centra únicamente en los tres enfoques Macro, Micro y Meso enfocándose en los criterios operativos para cuatro categorías; Contexto analítico, Alcance geográfico, Tipo de instalación y Modo de viaje (Krista *et al.*, 2004).



**Tabla 6. Criterios operativos de la TAT**

● La herramienta aborda adecuadamente el criterio, Ø Algunas herramientas abordan el contexto, O Generalmente no aborda el contexto específico

	Macroscópico	Mesoscópico	Microscópico
<b>Contexto analítico</b>			
Planificación	Ø	Ø	Ø
Diseño	●	●	●
Operación	●	●	●
<b>Alcance Geográfico</b>			
Ubicación aislada	O	O	●
Segmento	Ø	Ø	Ø
Corredor o red pequeña	Ø	Ø	Ø
Región	●	●	Ø
<b>Tipo de instalación</b>			
Intersección aislada	●	●	●
Rotonda	Ø	O	Ø
Arteria	●	●	●
Carretera	●	●	●
Autopista	●	●	●
Carriles reversibles	O	●	●
Plaza de peaje	O	O	●
<b>Modo de viaje</b>			
SOV	●	●	●
Autobús	Ø	●	●
Peatones	Ø	Ø	Ø

Fuente: Modificada a partir de Krista et al., (2004)

Las herramientas de modelación mesoscópica que se encontraron para uso en caso de evacuaciones y actualmente disponibles comercialmente se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7. Software disponible para modelar el tráfico con enfoque mesoscópico**

<b>Software</b>	<b>Objetivo de la herramienta</b>	<b>Tipo de Licencia</b>	<b>Dirección electrónica</b>
<b>Cube Avenue</b>	Simulación de tráfico	Comercial	<a href="http://www.citilabs.com">www.citilabs.com</a>
<b>DYNASMART</b>	Simulación de tráfico	Académico / Comercial	<a href="http://www.dynasmart.umd.edu">www.dynasmart.umd.edu</a>
<b>Simulex</b>	Administración de evacuaciones	Comercial	<a href="http://simulex.io">http://simulex.io</a>
<b>TRANSIMS</b>	Planificación/simulación	Libre	<a href="http://sourceforge.net/projects/transimsstudio/">http://sourceforge.net/projects/transimsstudio/</a>
<b>TransModeler</b>	Planificación/simulación	Comercial	<a href="https://www.caliper.com/transmodeler">https://www.caliper.com/transmodeler</a>
<b>PTV Vissim</b>	Simulación de tráfico	Comercial	<a href="http://vision-traffic.ptvgroup.com">http://vision-traffic.ptvgroup.com</a>
<b>TransDNA</b>	Simulación de tráfico	Comercial	<a href="https://www.caliper.com/transdna/transdna-dta-software">https://www.caliper.com/transdna/transdna-dta-software</a>
<b>AnyLogic Road Traffic</b>	Simulación de tráfico	Comercial	<a href="https://www.anylogic.com">https://www.anylogic.com</a>

**Fuente: Elaboración propia**

## **Capítulo 4. Caso de Estudio. Salina Cruz, Oaxaca**

### **4.1. Espacio físico**

El presente caso de estudio tiene su ubicación en el municipio de Salina Cruz perteneciente al estado de Oaxaca, Salina Cruz, se localiza en la región del Istmo de Tehuantepec, al sureste del Estado, en las coordenadas 95° 12' longitud oeste, 16° 11' latitud norte, a una altura de 22 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Santo Domingo Tehuantepec y San Blas Atempa, al sur con el Océano Pacífico, al oriente con Santo Domingo Tehuantepec y al poniente con San Mateo del Mar. Su distancia aproximada a la capital del Estado es de 269 km y su extensión territorial total es de 133.89 km<sup>2</sup>.

El municipio de Salina Cruz (Figura 11) es considerado un puerto de altura. Se encuentra dentro de los 10 principales puertos de altura de México, ya que realiza actividades económicas de exportación. Así mismo se le puede considerar como puerto de Cabotaje, Comercial, Pesquero y Petrolero.

Según el Índice de evaluación de pobreza en el Estado de Oaxaca publicado en por CONEVAL en el año 2012, Salina Cruz es el 4º Municipio que alberga más personas en situación de pobreza, casi la mitad de la población (46.1%) se encuentra en situación de pobreza.

**Figura 11. Mapa de ubicación del Municipio de Salina Cruz, Oaxaca.**



**Fuente: Plan municipal de desarrollo de Salina Cruz, Oaxaca**

El municipio de Salina Cruz cuenta con una población total de 89,211 habitantes de acuerdo con datos de la encuesta intercensal 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), de los cuales 42,336 son hombres y 46,875 mujeres.

#### **4.2. Antecedentes de fenómenos hidrometeorológicos**

El municipio de Salina Cruz se localiza en la zona del Golfo de Tehuantepec, que es una región ciclo génica en que se forman huracanes que anualmente provocan afectaciones al emplazamiento físico, así como a los habitantes. La secuela de inundaciones constituye uno de los mayores peligros que cíclicamente se presentan en el municipio de Salina Cruz, especialmente cuando aquellos fenómenos hidrometeorológicos conllevan mucha precipitación. Su potencialidad de ocurrencia está permanentemente planteada.

Salina Cruz se ubica al norte de la trayectoria de los ciclones tropicales del Pacífico.

De un total de 138 ciclones y tormentas tropicales que incidieron en las costas del pacífico mexicano en el periodo de 33 años, entre 1947 y 1979, solo dos ciclones y tres tormentas tropicales tocaron el puerto de Salina Cruz. Su trayectoria fue corta y con una dirección de sur a norte. Los vientos máximos al tocar tierra no fueron mayores a los 30 m/seg. En la Tabla 8 se muestra el conjunto de huracanes y tormentas tropicales que han producido inundaciones en el municipio de Salina Cruz.

**Tabla 8. Huracanes y tormentas que han producido afectaciones en Salina Cruz Oaxaca**

Nombre	Fenómeno	Año	Afectaciones
Pauline	Huracán	1997	Precipitación de 200 a 400 mm causando deslizamientos de lomeríos e inundaciones en la llanura
Stan	Huracán	2005	El Diario Oficial de la Federación declaró a Salina Cruz como Municipio de Desastre Natural en virtud de la ocurrencia de severas precipitaciones causadas por el Huracán “Stan” los días 3, 4 y 5 de octubre
Frank	Huracán	2010	El Diario Oficial de la Federación declaró a Salina Cruz como Municipio de Desastre Natural en virtud de la ocurrencia de severas precipitaciones causadas por el Huracán “Stan” los días 3, 4 y 5 de octubre
Olaf	Tormenta tropical	2003	En Reporte de Ciclones Tropicales, reportando que en Salina Cruz se presentaron vientos máximos de 55 km/h.
Carlos	Tormenta tropical	2010	La Comisión Nacional del Agua registró el día 26 de junio una precipitación pluvial de 93.9 mm en el municipio de Salina Cruz. El municipio fue declarado Municipio de desastre natural
Beatriz	Depresión Tropical	2017	Severas inundaciones
Calvin	Depresión	2017	Severas inundaciones

**Fuente: Elaboración propia con datos de CENAPRED**

En asociación con los huracanes y tormentas tropicales se han producido deslizamientos de detritos ocasionalmente acompañados con rocas, que han afectado los asentamientos humanos

enclavados en las laderas. Otros efectos causados por aquellos fenómenos son las inundaciones de las estribaciones del lomerío este y oeste, pero sobre todo de las partes bajas de la llanura.

Los deslaves y las inundaciones más graves han ocurrido en el año 2011 en el municipio de Salina Cruz ocasionando pérdidas materiales y humanas, y poniendo de manifiesto los inconvenientes de la urbanización carente de planeación urbana (SEDESOL, 2011).

Por lo que ante la probabilidad de ocurrencia de un huracán las autoridades responsables deben activar los procesos de planeación con el fin de disminuir el riesgo a la población. Una de las principales actividades para disminuir el riesgo y la sobreexposición es contar con un plan adecuado de evacuación, debido a que se cuenta con una ventana de tiempo corta para evacuar a las personas y recursos tecnológicos limitados. Para el caso de estudio del municipio de Salina Cruz se planea aplicar el modelo de asignación de tráfico dinámico para determinar un procedimiento para cargar una demanda dependiente del tiempo en la red y que trate explícitamente las dependencias de tiempo de los flujos de tráfico en los enlaces de la red, determinando las rutas que se utilizarán y la proporción de la demanda en cada instante a tiempo.

### **4.3. Organización y funciones de las autoridades**

El Sistema Nacional de Protección civil, está compuesto a su vez por los Consejos Estatales y Municipales, con la finalidad establecer entre los habitantes de la República Mexicana acciones preventivas y de mitigación, es por ello que cada Municipio deberá constituir su Consejo Municipal de Protección Civil.

En la Ley Orgánica Municipal del Estado de Oaxaca, en su artículo 43, establece como atribución del Ayuntamiento, la Constitución del Consejo Municipal de Protección Civil, el cual se constituye mediante el Acta Constitutiva del Consejo Municipal de Protección Civil. La Coordinación Municipal de Protección Civil es el órgano ejecutivo-operativo del Plan Municipal de Contingencias y tiene la responsabilidad de integrar, coordinar y operar el Plan Municipal de Prevención y Reducción de Riesgos de desastres.

Entre las funciones del Consejo Estatal y Municipal de Protección Civil está la de analizar cada fenómeno perturbador de origen natural identificando su periodicidad, área de ocurrencia y grado o nivel de impacto sobre el sistema afectable zonificando áreas vulnerables expuestas a amenazas (zonas de riesgo), proponiendo obras, acciones que tiendan a disminuir el riesgo.

Los fenómenos hidrometeorológicos que consideran las autoridades son: ciclones-huracanes, ciclones-ondas tropicales, inundaciones, tormentas eléctricas, sequías y temperaturas máximas extremas, así como deslizamientos de laderas causadas por lluvias.

### **4.3.1. Factores y Niveles de Riesgo**

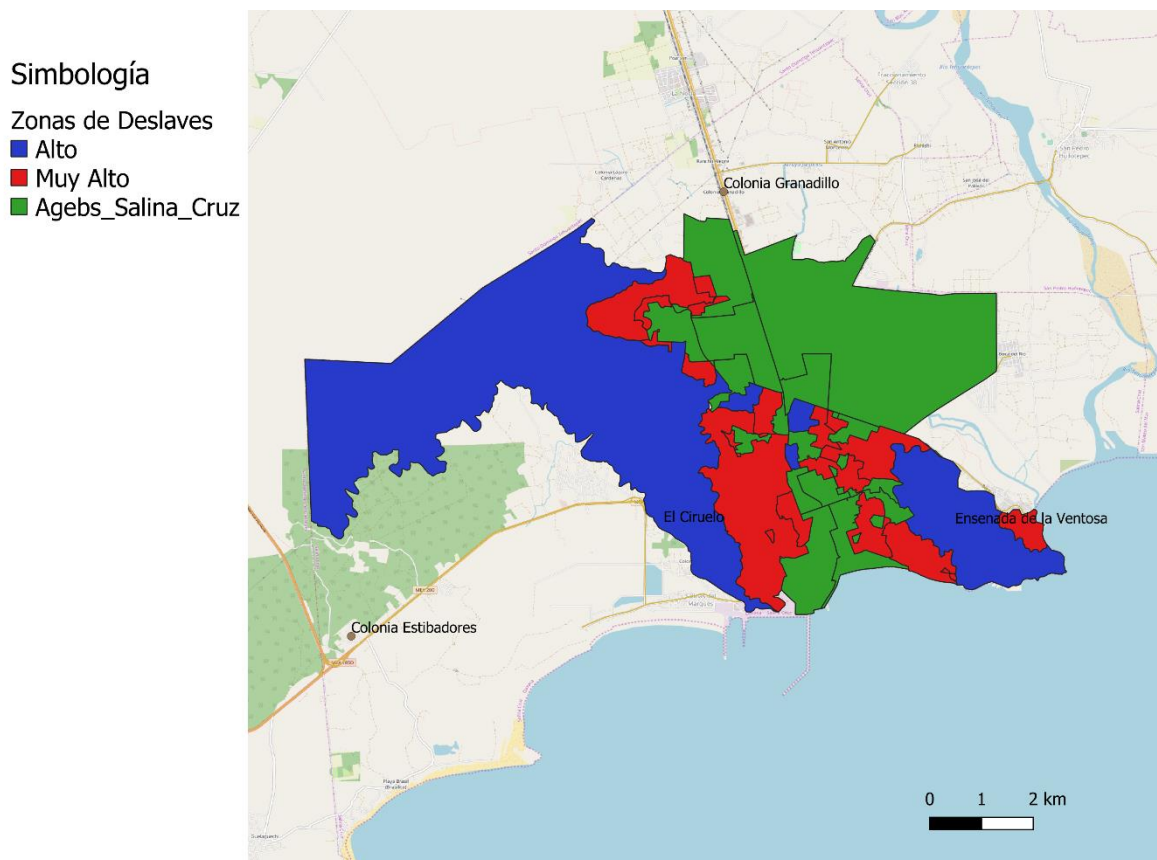
En el proceso de identificación de amenazas por un fenómeno perturbador se han encontrado una gran diversidad de situaciones que pueden afectar, entre las cuales se encuentran asentamientos de pobladores en lugares que no son adecuados para ser habitados; pobreza, marginación, entre otras, esto aunado a la ocurrencia de amenazas naturales, hacen que, en el Municipio de Salina Cruz existan condiciones de riesgo. Para la determinación del grado de peligro se utiliza una tabla llamada “Análisis de Peligros” en el Atlas de riesgo del municipio donde se realiza la descripción del tipo de fenómeno perturbador: la frecuencia e intensidad, asignando valores de estos para cada fenómeno adverso que puede ocurrir en la Entidad y con los siguientes criterios:

- Amenazas: Fenómenos naturales u originados por la acción del ser humano, que pueden afectar un lugar determinado. Se trata de un elemento externo.
- Vulnerabilidades: Condiciones de fragilidad o debilidad intrínseca (interna), que aumenta la susceptibilidad de ser afectada por una amenaza en específico.
- Riesgos: Existe cuando una amenaza específica, tiene probabilidad de afectar a una población y bienes en situación de vulnerabilidad.
- Comunidades / barrios: Mencionar los puntos en las localidades que se ven mayormente afectadas por las vulnerabilidades detectadas.
- Nivel de riesgo: Grado de riesgo que puede ser Alto, Medio o Bajo en función a las amenazas y vulnerabilidades identificadas (CEPC, 2017).

### 4.3.2. Deslizamientos

Los deslizamientos o deslaves se clasifican de acuerdo con los parámetros técnicos establecidos por el CENAPRED y documentados en el Atlas de Riesgos del Municipio de Salina Cruz Oaxaca. Tales parámetros implican indicadores que en este caso se emplean como base para los apartados de “indicadores de vulnerabilidad” en el análisis de peligros que se aplican a cada manifestación particular de deslizamiento, flujo o derrumbe. La Figura 12 muestra en color rojo las zonas de deslave de muy alto riesgo y de color azul las zonas de alto riesgo, de color verde se muestran las zonas pobladas (AGEB´s).

Figura 12. Zonas de deslizamiento en el municipio de salina Cruz



Fuente: Elaboración propia con datos del SINAPROC



### **4.3.3. Inundaciones**

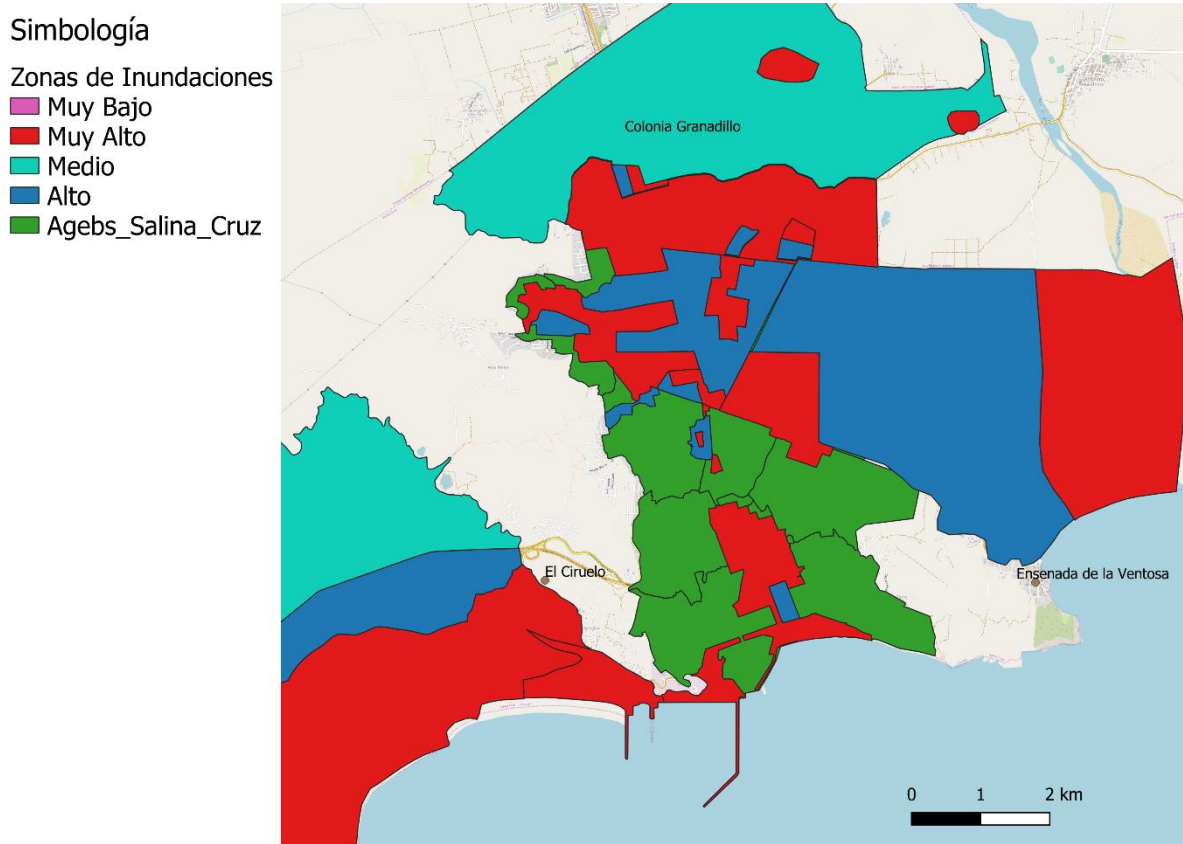
El municipio de Salina Cruz se localiza en la zona del Golfo de Tehuantepec, que es una región ciclo génica en que se forman huracanes anualmente que provocan afectaciones al emplazamiento físico, así como a los habitantes.

La vulnerabilidad física es grave debido a que el municipio se sitúa en zona costera, además el material de construcción es tabique y concreto armado en la cabecera municipal, pero en las zonas marginadas están construidas con adobe, madera, techos de lámina. Sus lomeríos admiten deslizamientos y flujos, mientras que la llanura tiene zonas inundables. Los huracanes actúan como un agente detonante. No presentan vulnerabilidad por marea de tormenta.

La vulnerabilidad social es grave cuando a pesar de brindar los reportes meteorológicos la población no atiende a prepararse para este tipo de fenómenos y la infraestructura de vialidades públicas se ve afectada por inundaciones, derrumbes y flujos, las zonas con riesgo de inundación se observan en la

Figura 13, de color rojo están las zonas con muy alto riesgo de inundación, en color azul de alto riesgo y en color azul claro las zonas de riesgo medio.

**Figura 13. Zonas de inundaciones**



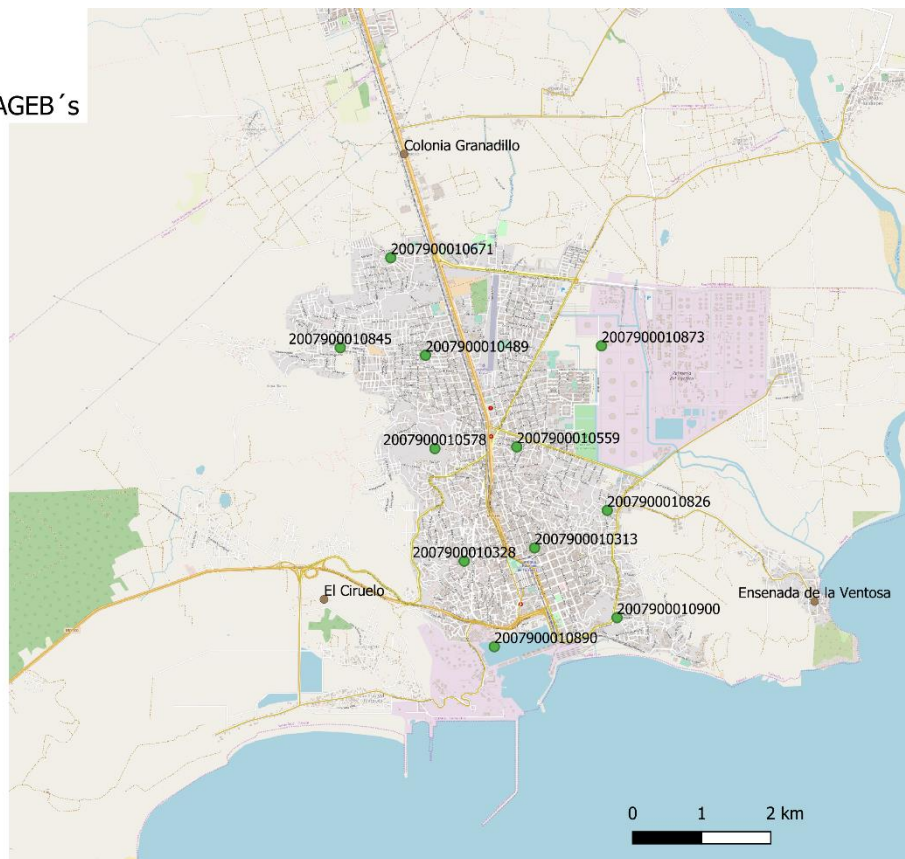
**Fuente. Elaboración propia con datos de SINAPROC**

Las zonas y el número de hogares para evacuar se obtuvieron con datos del INEGI y del Atlas de Riesgos del Municipio de Salina Cruz, en promedio el tamaño de cada hogar es de 3.6 personas. Los hogares que cuentan con vehículo son el 21.4% para el estado de Oaxaca. Realizando el análisis en un sistema de información geográfica con estos datos se obtuvieron las zonas de evacuación de acuerdo con el riesgo, estas zonas están representadas como centroides como se muestran en la Figura 14. En la Tabla 9 se considera que las Zonas 10, 11, 12 y 13 que son localidades rurales se deben de evacuar al 100% debido al mayor grado de marginalidad, las zonas 14, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23 y 24 evacuarán el 100% por el riesgo de deslave alto y muy alto, las zonas 15 y 16 solo evacuarán 56% de acuerdo con la probabilidad de evacuación.

**Figura 14 Centroides de las zonas de evacuación**

**Simbología**

- Localidades rurales
- Zonas de Evacuación AGEB´s



Fuente. Elaboración propia con datos de SINAPROC

**Tabla 9. Zonas y números de hogares a evacuar con su nivel de riesgo por inundaciones y deslaves**

ID_ZONA	Nombre	Riesgo Inundación	Riesgo Deslave	Hogares	Hogares con vehículo	Hogares sin vehículo
10	ESTIBADORES	Alto	Muy Alto	303	65	238
11	CIRUELO		Muy Alto	399	85	314
12	GRANADA		Medio	313	67	246
13	ENSENADA	Alto	Muy Alto	589	125	464
14	2007900010559	Muy Alto	Muy Alto	2488.05556	532	1956
15	2007900010873	Muy Alto		1533.75	328	1206
16	2007900010890		Muy Alto	2013.33333	431	1582
17	2007900010578		Muy Alto	2580.55556	552	2029
18	2007900010328		Muy Alto	3359.44444	719	2640
19	2007900010900	Muy Alto	Muy Alto	1218.61111	261	958

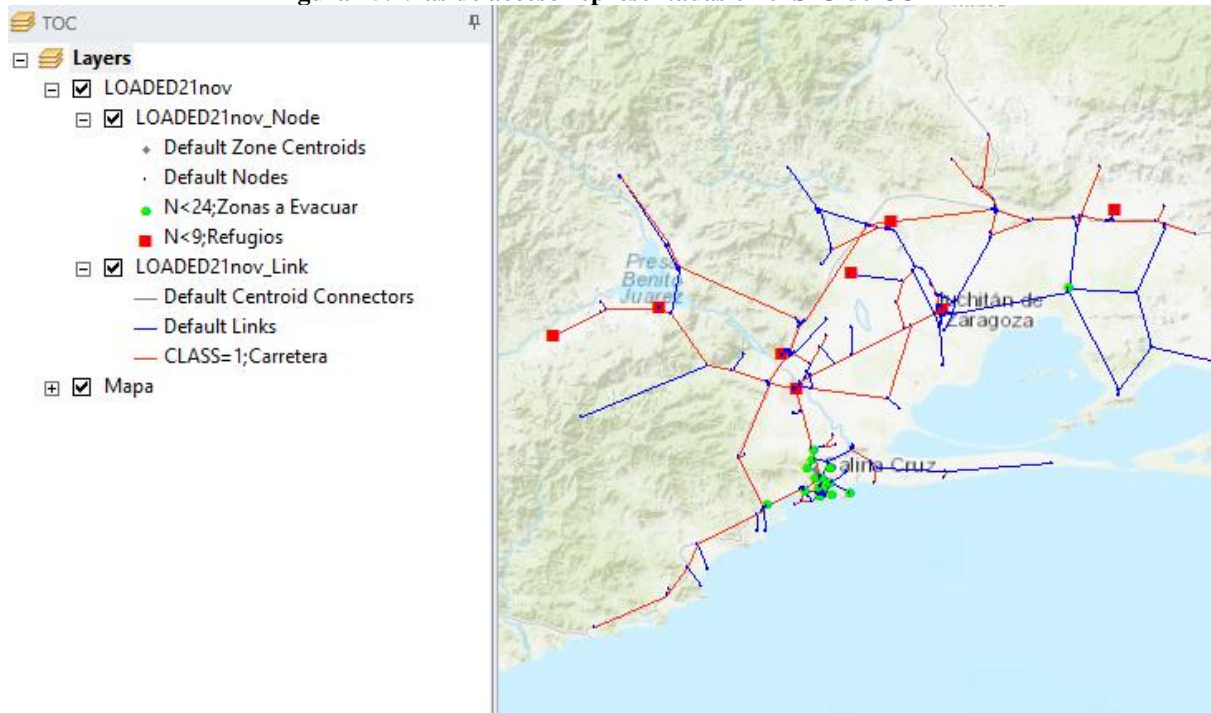
ID_ZONA	Nombre	Riesgo Inundación	Riesgo Deslave	Hogares	Hogares con vehículo	Hogares sin vehículo
20	2007900010826		Muy Alto	1727.22222	370	1357
21	2007900010313	Muy Alto		431.1	92	339
22	2007900010671		Muy Alto	760.277778	163	597
23	2007900010845		Muy Alto	980.555556	210	771
24	2007900010489	Alto	Muy Alto	1491.66667	319	1173

Fuente. Elaboración propia con datos de SINAPROC e INEGI

#### 4.3.4. Vías de acceso

Las vías de acceso primarias y secundarias están definidas en la Figura 15, además de las calles de las localidades que se encuentran dentro del municipio de Salina Cruz. Es de suma importancia conocer de manera general cómo se encuentran las vías de acceso, ya que es un elemento clave en la identificación de las alternativas de salida al momento de evacuar a la población. La red vial está conformada por 1208 arcos y 438 nodos, los arcos de acuerdo con su clasificación tienen características de capacidad, velocidad, número de carriles y distancia principalmente como se muestra en la Tabla 10.

Figura 15. Vías de acceso representadas en el SIG de CUBE



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI

Tabla 10. Capacidad y velocidad de los arcos en base a su clasificación

Tipo de vialidad	Capacidad (veh/hr)	Velocidad (Km/hr)
Carretera	1590	40
Avenida	1590	40
Calle	790	30
Enlace	790	20
Glorieta	790	10
Retorno	790	10
Calzada	1590	40
Circuito	790	30

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI

#### 4.3.5. Refugios temporales

La Coordinación de Protección Civil de Oaxaca (CEPCO), el DIF Estatal, Protección Civil y Bomberos del H. Ayuntamiento de Salina Cruz (PCSC) y el DIF de Salina Cruz son los encargados de instalar y suministrar víveres a los refugios temporales para la temporada de

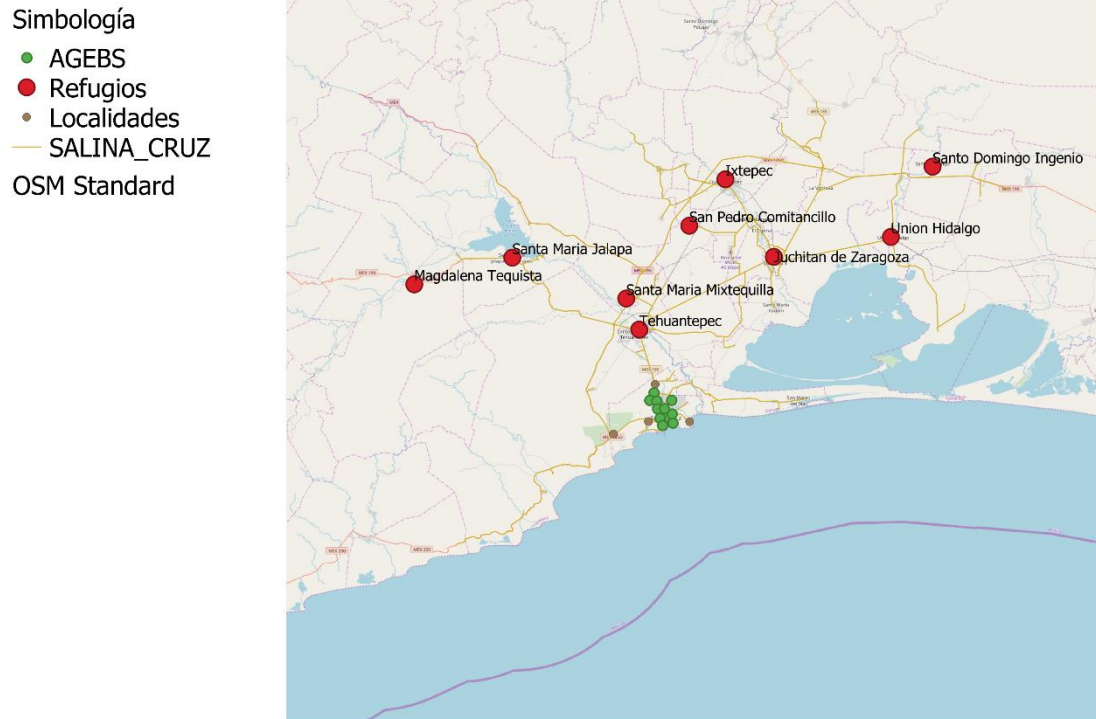
tormentas y huracanes. Los refugios están ubicados en 9 municipios cercanos a Salina cruz con capacidad para 21,000 hogares, los refugios son representados por 9 centroides con su ubicación geográfica en la Tabla 11 y en la Figura 16.

**Tabla 11. Refugios temporales en caso de huracanes**

<b>Municipio</b>	<b>ID</b>	<b>Capacidad de hogares</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Magdalena Tequisitlán	1	639	222125.177	1814703.74
San Pedro Comitancillo	2	667	269614.597	1824611.21
Santa María Jalapa del Marqués	3	6278	239067.842	1819264.89
Santa María Mixtequilla	4	56	258616.192	1811738.73
Santo Domingo Tehuantepec	5	3001	260788.363	1806164.1
Cd. Ixtepec	6	2820	275917.598	1832844.12
Heroica Juchitán de Zaragoza	7	5627	284115.447	1818907.01
Santo Domingo Ingenio	8	639	311591.301	1834746.44
Unión Hidalgo	9	417	304301.065	1822268.9

**Fuente: Elaboración propia con datos de CEPCO**

**Figura 16. Ubicación de refugios**



Fuente: Elaboración propia con datos de CEPCO e INEGI

#### 4.4. Solución al Modelo estocástico en Software Cube Highway

El *modelo de asignación todo o nada* es un modelo estocástico que utiliza una serie de reglas para asignar una matriz de viajes a una red y así obtener una serie de flujos de los arcos, los principales objetivos del modelo son:

- Estimar los costos (tiempo) de viaje entre zonas para un nivel dado de demanda.
- Conseguir valores y flujos en los arcos e identificar los arcos más congestionados
- Estimar los recorridos utilizados entre cada origen-destino
- Analizar qué orígenes-destinos utilizan arcos o rutas o recorridos particulares.

El programa Highway construye rutas basadas en los costos de enlace y asigna viajes a las rutas de cada zona de origen. Una vez que se han procesado todas las zonas de origen, los costos de enlace se actualizan según el nivel de congestión de cada arco. Este proceso continúa hasta que se alcanzan algunos criterios para finalizarlo.

El algoritmo de asignación lo constituye el propio procedimiento de carga de la matriz Origen-Destino  $T$  a los árboles de camino mínimo y de la determinación de los flujos  $V_{a,b}=0$ , el algoritmo se describe a continuación:

Se parte de un origen y un destino a la vez, iniciando todos los  $V_{a,b}=0$ . A continuación para cada par  $(ij)$ :

1. Se fija B igual al destino  $j$ ;
2. Si  $(A,B)$  es el arco predecesor de B entonces se incrementa  $V_{a,b}$  en  $T_{ij}$ , es decir  $V_{a,b}= V_{a,b}+ T_{ij}$ ;
3. Se fija B igual a A;
4. Si  $A=i$  el procedimiento se termina (es decir se pasa a examinar el próximo par  $(i,j)$ , en otro caso se vuelve al punto 2.

#### **4.5. Escenarios para modelar**

Para resolver el modelo estático se plantearon tres escenarios a evaluar:

- El primer escenario considera una evacuación por vehículos particulares **Tabla 12** con capacidad para un hogar como se muestra en la Tabla 12 matriz origen-destino vehículos particulares, y para los hogares sin vehículo se realiza con vehículos proporcionados por la autoridad con capacidad para 20 personas (camiones militares) y cuenta con 21 rutas de evacuación como se muestra en la Tabla 13. La distribución de los viajes (zonas de evacuación a zonas seguras) se realizó con datos proporcionados por Protección Civil Salina Cruz. Las características de la red son las indicadas en la sección 4.3.4. vías de acceso.



- En el segundo escenario la capacidad de los vehículos particulares es de un hogar Tabla 12 matriz origen-destino vehículos particulares y el transporte para hogares sin vehículo son proporcionados por las autoridades con capacidad máxima para 48 personas (Autobuses) y 21 rutas, como se observa en la Tabla 14 la matriz origen-destino hogares sin vehículo. La distribución de los viajes (zonas de evacuación a zonas seguras) se realizó con datos proporcionados por Protección Civil Salina Cruz. Las características de la red son las indicadas en la sección 4.3.4. vías de acceso y el tipo de vehículo seleccionado es debido al tipo de autobuses de transporte público de la zona del Istmo.
- El tercer escenario para modelar se mantienen las capacidades vehiculares del segundo escenario (vehículos particulares y autobuses), pero se ajusta la matriz origen-destino tanto para los vehículos particulares de la Tabla 15 como para los autobuses matriz origen-destino Tabla 16 disminuyendo las rutas de evacuación a 13. La distribución de los viajes (zonas de evacuación a zonas seguras) se modificó con datos proporcionados por Protección Civil Salina Cruz. Las características de la red son las indicadas en la sección 4.3.4. vías de acceso.

**Tabla 12. Matriz Origen-Destino viajes en vehículos particulares para el escenario 1 y 2**

Clave		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Nombre	Magdalena Tequisitlán	San Pedro Comitancillo	Santa María Jalapa del Marqués	Santa María Mixtequilla	Santo Domingo Tehuantepec	Cd. Ixtepec	Heroica Juchitán de Zaragoza	Santo Domingo Ingenio	Unión Hidalgo
10	ESTIBADORES	66	0	0	0	0	0	0	0	0
11	CIRUELO	18	2	66	0	0	0	0	0	0
12	GRANADA	0	0	67	0	0	0	0	0	0
13	ENSENADA	0	0	124	0	0	0	0	0	0
14	2007900010559	0	0	533	0	0	0	0	0	0
15	2007900010873	0	0	330	0	0	0	0	0	0
16	2007900010890	0	0	430	0	0	0	0	0	0
17	2007900010578	0	0	554	0	0	0	0	0	0
18	2007900010328	0	0	323	1	106	35	257	0	0
19	2007900010900	0	0	246	0	0	0	0	14	0
20	2007900010826	0	0	266	0	0	0	0	0	102
21	2007900010313	0	0	91	0	0	0	0	0	0
22	2007900010671	0	0	162	0	0	0	0	0	0

Clave		1	2	3	4	5	6	7	8	9
23	2007900010845	0	0	210	0	0	0	0	0	0
24	2007900010489	0	0	316	0	0	0	0	0	0
Total		84	2	3718	1	106	35	257	14	102

**Fuente: Elaboración propia con datos de PCSC**

**Tabla 13. Matriz Origen-Destino viajes en camiones para el escenario 1**

Clave	Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Magdalena Tequisitlán	San Pedro Comitancillo	Santa María Jalapa del Marqués	Santa María Mixtequilla	Santo Domingo Tehuantepec	Cd. Ixtepec	Heroica Juchitán de Zaragoza	Santo Domingo Ingenio	Unión Hidalgo
10	ESTIBADORES	47	0	0	0	0	0	0	0	0
11	CIRUELO	64	0	0	0	0	0	0	0	0
12	GRANADA	0	49	0	0	0	0	0	0	0
13	ENSENADA	0	84	7	0	0	0	0	0	0
14	2007900010559	0	0	0	11	379	0	0	0	0
15	2007900010873	0	0	0	0	200	41	0	0	0
16	2007900010890	0	0	0	0	0	316	0	0	0
17	2007900010578	0	0	0	0	0	200	205	0	0
18	2007900010328	0	0	0	0	0	0	528	0	0
19	2007900010900	0	0	0	0	0	0	191	0	0
20	2007900010826	0	0	0	0	0	0	150	120	0
21	2007900010313	0	0	0	0	0	0	0	5	63
22	2007900010671	0	0	118	0	0	0	0	0	0
23	2007900010845	0	0	151	0	0	0	0	0	0
24	2007900010489	0	0	236	0	0	0	0	0	0
Total		111	133	512	11	579	557	1074	125	63

**Fuente: Elaboración propia con datos de PCSC**

**Tabla 14. Matriz Origen-Destino viajes en autobuses para el escenario 2**

Clave	Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Magdalena Tequisitlán	San Pedro Comitancillo	Santa María Jalapa del Marqués	Santa María Mixtequilla	Santo Domingo Tehuantepec	Cd. Ixtepec	Heroica Juchitán de Zaragoza	Santo Domingo Ingenio	Unión Hidalgo
10	ESTIBADORES	18	0	0	0	0	0	0	0	0
11	CIRUELO	23	0	0	0	0	0	0	0	0
12	GRANADA	0	18	0	0	0	0	0	0	0
13	ENSENADA	0	31	1	0	0	0	0	0	0

Clave		1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	2007900010559	0	0	0	4	145	0	0	0	0
15	2007900010873	0	0	0	0	76	15	0	0	0
16	2007900010890	0	0	0	0	0	122	0	0	0
17	2007900010578	0	0	0	0	0	75	77	0	0
18	2007900010328	0	0	0	0	0	0	202	0	0
19	2007900010900	0	0	0	0	0	0	73	0	0
20	2007900010826	0	0	0	0	0	0	56	47	0
21	2007900010313	0	0	0	0	0	0	0	2	23
22	2007900010671	0	0	44	0	0	0	0	0	0
23	2007900010845	0	0	59	0	0	0	0	0	0
24	2007900010489	0	0	90	0	0	0	0	0	0
Total		41	49	194	4	221	212	408	49	23

Fuente: Elaboración propia con datos de PCSC

Tabla 15. Matriz Origen-Destino viajes en vehículos particulares para el escenario 3

Clave	Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Magdalena Tequisitlán	San Pedro Comitancillo	Santa María Jalapa del Marqués	Santa María Mixtequilla	Santo Domingo Tehuantepec	Cd. Ixtepec	Heroica Juchitán de Zaragoza	Santo Domingo Ingenio	Unión Hidalgo
10	ESTIBADORES	0	0	0	0	0	0	0	0	66
11	CIRUELO	0	0	0	86	0	0	0	0	0
12	GRANADA	67	0	0	0	0	0	0	0	0
13	ENSENADA	124	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2007900010559	0	0	0	0	0	0	533	0	0
15	2007900010873	0	0	0	0	330	0	0	0	0
16	2007900010890	0	0	0	0	0	0	430	0	0
17	2007900010578	0	0	554	0	0	0	0	0	0
18	2007900010328	0	0	722	0	0	0	0	0	0
19	2007900010900	0	0	0	0	0	260	0	0	0
20	2007900010826	0	0	0	0	368	0	0	0	0
21	2007900010313	0	0	0	0	0	0	0	91	0
22	2007900010671	0	162	0	0	0	0	0	0	0
23	2007900010845	0	210	0	0	0	0	0	0	0
24	2007900010489	0	0	0	0	0	316	0	0	0
Total		191	372	1276	86	698	576	963	91	66

Fuente: Elaboración propia con datos de PCSC

**Tabla 16. Matriz Origen-Destino viajes en autobuses para el escenario 3**

Clave	Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Magdalena Tequisitlán	San Pedro Comitancillo	Santa María Jalapa del Marqués	Santa María Mixtequilla	Santo Domingo Tehuantepec	Cd. Ixtepec	Heroica Juchitán de Zaragoza	Santo Domingo Ingenio	Unión Hidalgo
10	ESTIBADORES	0	0	0	0	0	0	0	0	18
11	CIRUELO	0	0	0	23	0	0	0	0	0
12	GRANADA	12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	ENSENADA	32	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2007900010559	0	0	0	0	0	0	149	0	0
15	2007900010873	0	0	0	0	91	0	0	0	0
16	2007900010890	0	0	0	0	0	0	122	0	0
17	2007900010578	0	0	152	0	0	0	0	0	0
18	2007900010328	0	0	202	0	0	0	0	0	0
19	2007900010900	0	0	0	0	0	73	0	0	0
20	2007900010826	0	0	0	0	103	0	0	0	0
21	2007900010313	0	0	0	0	0	0	0	25	0
22	2007900010671	0	44	0	0	0	0	0	0	0
23	2007900010845	0	59	0	0	0	0	0	0	0
24	2007900010489	0	0	0	0	0	90	0	0	0
<b>Total</b>		44	103	354	23	194	163	271	25	18

Fuente: Elaboración propia con datos de PCSC

#### 4.6. Modelo de evacuación dinámica

Cube Avenue es un simulador de tráfico mesoscópico para la asignación dinámica del tráfico. Está diseñado para permitir la predicción de costos y flujos que varían en el tiempo dada una demanda de viajes que varía en el tiempo.

El tiempo modelado se divide en dos períodos principales: un período de calentamiento, durante el cual la red se llena de tráfico, y el período modelo, durante el cual se agregan las estadísticas de la red (volumen, tiempo, velocidad, colas, entre otros). Además, el tiempo también se divide en segmentos de tiempo más pequeños. Se supone que la demanda de viaje es aproximadamente constante durante cada segmento de tiempo, pero varía entre segmentos de tiempo.

Inicialmente, los tiempos de enlace y unión se consideran iguales para todos los segmentos de tiempo (y se consideran los valores de los archivos de datos de entrada). Sin embargo, una vez que comienza el modelado, los tiempos segmento por segmento se recalculan independientemente. Entonces, en la segunda y posteriores iteraciones, habrá diferentes estimaciones de demora para los vehículos que llegan a un enlace para cada segmento de tiempo.

Cuando se requiere una demanda dinámica para un par de origen-destino para un segmento de tiempo, se divide en varios paquetes de vehículos. Cada paquete tiene una hora de inicio y varios vehículos en cada campo de volumen. También tiene una ruta para cada iteración de asignación. La ruta se calcula en función de la estimación actual de los retrasos de cada segmento de tiempo y de la hora estimada de llegada del paquete en cada punto de su ruta.

Para lograr el equilibrio dinámico del usuario se utiliza el **Método de los promedios sucesivos**, este es un algoritmo iterativo para tratar de superar el problema de asignar demasiado flujo a un arco con capacidad restringida. El algoritmo se describe a continuación:

1. Seleccionar un conjunto de costos de arco iniciales (actualizados), normalmente en condiciones de flujo libre; se inicia haciendo todos los flujos  $V_a=0$ ; hacer  $n=0$ .
2. Construir los árboles de mínimo costo con los costos actualizados y hacer  $n=n+1$ .
3. Cargar toda la matriz Origen-Destino  $T$ , con el método todo o nada, a los árboles de costo mínimo para así conseguir un conjunto de flujos auxiliares  $F_a$ ;
4. Calcular el flujo actualizado como:

$$V_a^n = (1 - \Phi)V_a^{n-1} + \Phi F_a \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Con } 0 \leq \Phi \leq 1$$

5. Calcular un nuevo conjunto de costos de arco en base a los flujos  $V_{an}$ . Si los flujos o los costos de arco no se han modificado significativamente en dos iteraciones consecutivas, el procedimiento se para; en caso contrario ir al paso 2.

#### 4.6.1. Distribución de la demanda de evacuación

Como se menciona en la sección 3.2 los modelos de demanda predicen la cantidad de personas que evacuaran y la hora de salida, como dato de entrada en el modelo dinámico de Cube se utiliza la distribución de Weibull con parámetros  $\beta=0.085$  y  $\Upsilon=2.55$  para obtener la cantidad de viajes que evacuan en periodos de 15 minutos para un tiempo total de evacuación de 6 horas. La Tabla 17 contiene el porcentaje de viajes de evacuación que se realizarían por los 24 periodos de tiempo para los 3 escenarios a evaluar.

**Tabla 17. Porcentaje de viajes de evacuación en periodos de 15 minutos**

Periodo	Intervalo (min)	Porcentaje de viajes de evacuación
1	0-15	0.25%
2	15-30	1.19%
3	30-45	2.56%
4	45-60	4.15%
5	60-75	5.79%
6	75-90	7.32%
7	90-105	8.56%
8	105-120	9.39%
9	120-135	9.73%
10	135-150	9.55%
11	150-165	8.92%
12	165-180	7.92%
13	180-195	6.70%
14	195-210	5.39%
15	210-225	4.13%
16	225-240	3.02%
17	240-255	2.09%
18	255-270	1.38%
19	270-285	0.86%
20	285-300	0.51%
21	300-315	0.29%
22	315-330	0.15%
23	330-345	0.08%
24	345-360	0.04%

Fuente: Pel *et al.*, (2012)

#### 4.7. Resultados del modelo estático

Con el uso del software Cube Voyager se determinaron los tiempos de evacuación del modelo estático, volúmenes de los arcos y la flota vehicular necesaria para la evacuación para los escenarios 1, 2 y 3.

Los resultados de tiempos de evacuación del escenario 1 del modelo estático están representados en la cuarta columna (tiempo de evacuación O-D) de la Tabla 18 con un tiempo máximo de evacuación en las rutas 6 y 7 de 369.29 minutos, un tiempo mínimo en la ruta 11 con 67.38 minutos, y un tiempo promedio de evacuación de 165.92 minutos. El total de vehículos para realizar la evacuación es de 3,165 camiones con una capacidad de 20 pasajeros.

**Tabla 18. Resultados del tiempo de evacuación del escenario 1**

N° Ruta	Zona de Evacuación (origen)	Refugio (destino)	Tiempo de evacuación O-D (min)	Tiempo D-O (min)	Tiempo de Ciclo (min)
1	10	1	318.99	55.71	374.7
2	11	1	336.26	45.27	381.53
3	12	2	85.63	29.7	115.33
4	13	2	93.77	34.38	128.15
5	13	3	375.4	34.94	410.34
6	22	3	369.29	28.01	397.3
7	23	3	369.29	28.01	397.3
8	24	3	369.11	28.4	397.51
9	14	4	79.6	19.99	99.59
10	14	5	66.97	7.5	74.47
11	15	5	67.38	8.04	75.42
12	15	6	89.07	28.79	117.86
13	16	6	87.45	29.63	117.08
14	17	6	89.62	30.46	120.08
15	17	7	88.85	26.98	115.83
16	18	7	87.33	25.21	112.54
17	19	7	88.81	27.1	115.91
18	20	7	88.16	25.89	114.05
19	20	8	118.98	57.87	176.85
20	21	8	118	118	236
21	21	9	96.5	36.65	133.15

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Los tiempos de evacuación del escenario 2 se muestran en la cuarta columna (tiempo de evacuación O-D) de la Tabla 19 con un tiempo máximo de evacuación en las ruta 5 con 209.73 minutos, un tiempo mínimo en la ruta 10 con 34.74 minutos, y tiempo promedio de evacuación de 95.52 minutos. El total de vehículos para realizar la evacuación es de 1201 autobuses con una capacidad de 48 pasajeros.

**Tabla 19. Resultados del tiempo de evacuación del escenario 2**

N° Ruta	Zona de Evacuación (origen)	Refugio (destino)	Tiempo de evacuación O-D (min)	Tiempo D-O (min)	Tiempo de Ciclo (min)
1	10	1	172.4	50.69	223.09
2	11	1	183.45	44.61	228.06
3	12	2	53.65	29.7	83.35
4	13	2	61.59	34.38	95.97
5	13	3	209.73	34.94	244.67
6	22	3	202.52	28	230.52
7	23	3	202.52	28	230.52
8	24	3	203.05	28.4	231.45
9	14	4	47.23	19.99	67.22
10	14	5	34.74	7.5	42.24
11	15	5	35	8.04	43.04
12	15	6	55.76	28.79	84.55
13	16	6	56.71	29.63	86.34
14	17	6	57.55	30.46	88.01
15	17	7	54.97	26.98	81.95
16	18	7	53.21	25.2	78.41
17	19	7	55.11	27.1	82.21
18	20	7	54.01	25.89	79.9
19	20	8	85.87	57.87	143.74
20	21	8	85.01	57.15	142.16
21	21	9	63.52	35.65	99.17

**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**

Los resultados de tiempos de evacuación del escenario 3 están en la cuarta columna (tiempo O-D) de la Tabla 20 con un tiempo máximo de evacuación en la ruta 12 con 89.52 minutos, un tiempo mínimo en la ruta 6 con 36.7 minutos, y tiempo promedio de evacuación de 59.14



minutos. El total de vehículos para realizar la evacuación es de 1195 autobuses con una capacidad de 48 pasajeros.

**Tabla 20. Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3**

N° Ruta	Zona de Evacuación (origen)	Refugio (destino)	Tiempo O-D (min)	Tiempo D-O (min)	Tiempo de Ciclo (min)
1	10	9	58.84	47.34	106.18
2	11	4	51.43	25.99	77.42
3	12	1	65.92	40.38	106.3
4	13	1	73.65	45.06	118.71
5	14	7	59.32	24.77	84.09
6	15	5	36.7	8.04	44.74
7	16	7	60.47	26.14	86.61
8	17	3	59.75	30.7	90.45
9	18	3	58.07	28.93	87
10	19	6	61.43	30.59	92.02
11	20	5	37.7	8.62	46.32
12	21	8	89.52	57.15	146.67
13	22	2	57.67	27.45	85.12
14	23	2	57.67	27.45	85.12
15	24	6	58.98	28.16	87.14

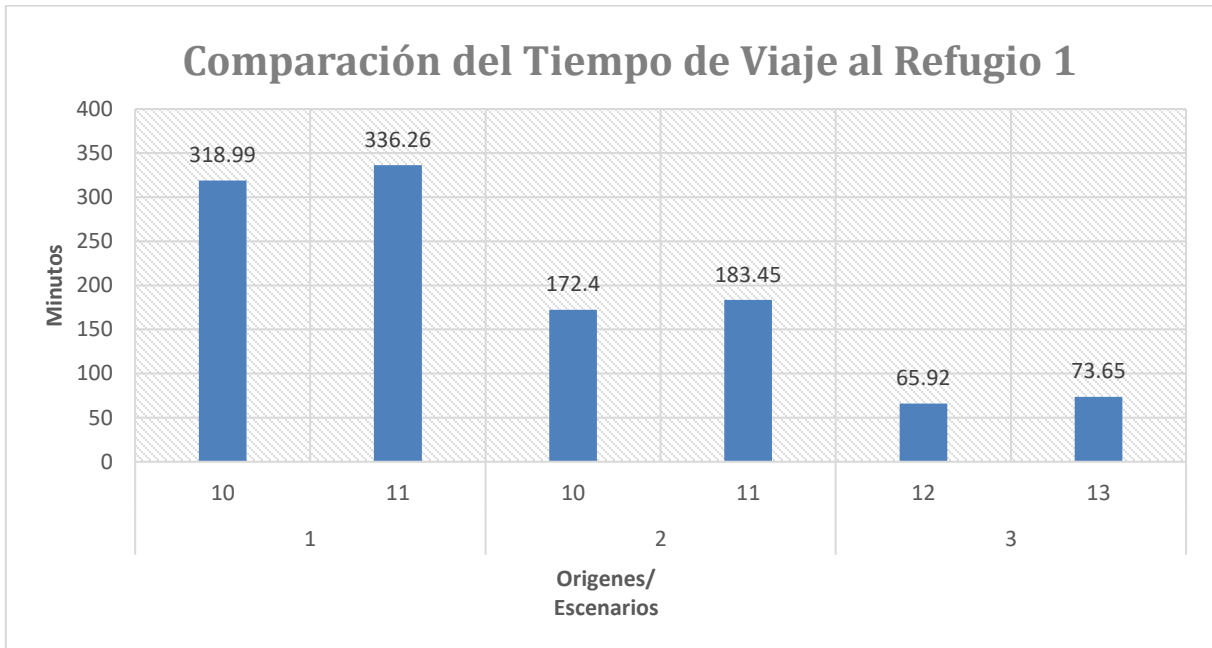
**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**

Al comparar los resultados de los tiempos de evacuación de los 3 escenarios se obtienen un menor tiempo promedio de evacuación en el escenario 3 con 59.14 minutos, el tiempo promedio de evacuación del escenario 1 es 2.8 veces mayor respecto al 3 y el tiempo de promedio de evacuación del escenario 2 es 1.6 veces mayor al escenario 3.

Se realizó la comparación grafica de los tiempos de evacuación para todos los orígenes que tengan el mismo destino (zona de refugios) para los tres escenarios, en la Figura 17 se comparan los tiempos de los orígenes 10 y 11 de los escenarios 1 y 2 con dirección al destino 1 y los orígenes 12 y 13 del escenario 3 (debido a que en el escenario 3 se modificaron las rutas) al destino 1, la comparación de los resultados de todas las rutas se encuentran en el Anexo B.

Los tiempos de evacuación del escenario 1 hacia el destino 1 son en promedio son 4.6 veces mayores al escenario 3 y los tiempos de evacuación del escenario 2 son 2.5 veces mayores que el escenario 3.

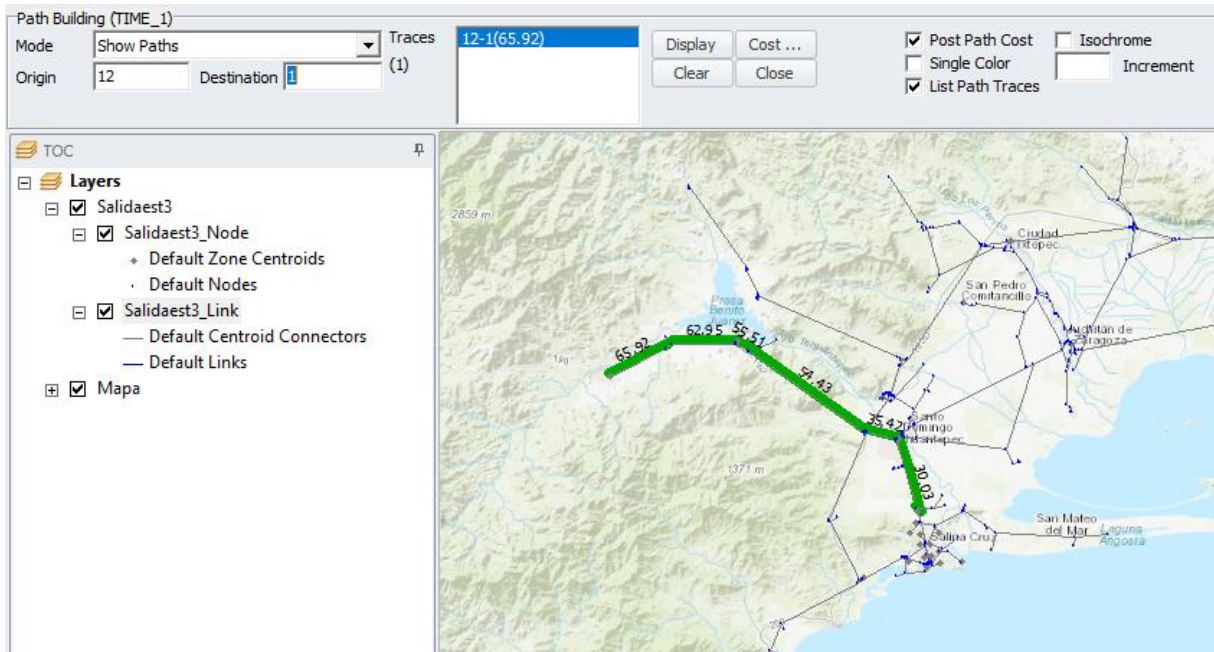
**Figura 17. Comparación de los tiempos de evacuación de los orígenes 10, 11, 12 y 13 al destino 1**



**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**

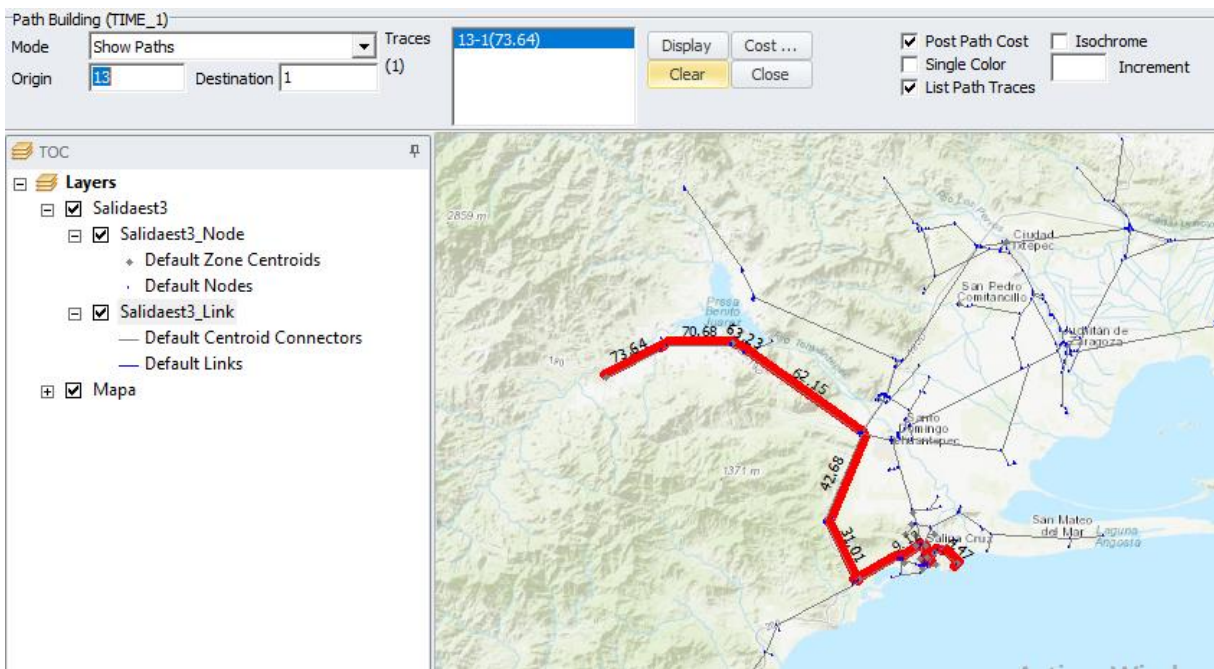
Las rutas de evacuación 2 (Origen 12-Destino 1) y 3 (Origen 13-Destino 1) se muestran en la Figura 18 y en la Figura 19.

Figura 18. Representación de la ruta 2 (origen 10 al destino 1)



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Figura 19. Representación de la ruta 3 (origen 13 al destino 1)

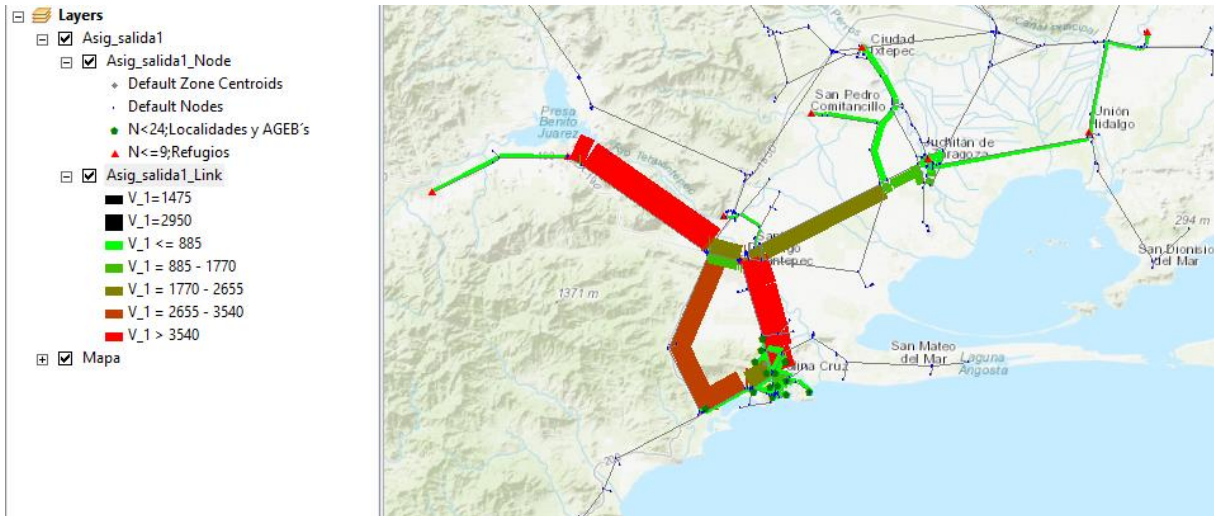


Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

### 4.7.1. Volumen de vehículos en la red

Los volúmenes de los vehículos están representados en la Figura 20; Figura 21 y Figura 22, como el modelo de asignación Todo o Nada no considera la restricción de capacidad se observa que varios arcos rebasan la capacidad vial, debido a esta condición este modelo no representa el tráfico de una manera adecuada para ser utilizado en una situación de emergencia.

Figura 20. Volumen vehicular del escenario 1 todas las rutas



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Figura 21. Volumen vehicular del escenario 2 todas las rutas



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

**Figura 22. Volumen vehicular del escenario 3 todas las rutas**



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

#### 4.8. Resultados del modelo dinámico

El modelo de evacuación dinámico se solucionó con el software de simulación mesoscópica Cube Avenue, se obtuvieron 24 tiempos de evacuación para cada ruta, cada tiempo de evacuación representa un periodo de 15 minutos de acuerdo con el tiempo de salida de los hogares, el tiempo total de simulación fue de seis horas.

La Tabla 21 contiene los resultados de tiempo de evacuación de los 24 periodos de salida para la ruta 1 y 2 del primer escenario de simulación.

**Tabla 21. Resultados del tiempo de evacuación del modelo dinámico de la ruta 1 y 2 del escenario 1**

Periodo\Escenario	Ruta 1	Ruta 2
	Tiempo de evacuación de 10 a 1	Tiempo de evacuación de 11 a 1
1	55.76	67
2	55.76	67
3	55.77	67.12
4	55.78	67.03
5	61.19	72.66
6	70.29	84.06

Periodo\Escenario	Ruta 1	Ruta 2
	Tiempo de evacuación de 10 a 1	Tiempo de evacuación de 11 a 1
7	76.17	93.16
8	96.14	117.98
9	115.08	142.15
10	130.54	166.22
11	121.92	152.47
12	129.34	161.21
13	134.6	168.97
14	134.36	168.85
15	133.3	165.47
16	153.45	182.87
17	152.06	184.9
18	156.04	184.11
19	154.37	184.45
20	160.46	186.34
21	158.77	186.16
22	154.76	181.08
23	155.37	181.24
24	227.75	254.25

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

La Tabla 22 contiene los resultados de tiempo de evacuación de los 24 periodos de salida para la ruta 1 y 2 del segundo escenario de simulación.

**Tabla 22. Resultados del tiempo de evacuación del modelo dinámico de la ruta 1 y 2 del escenario 2**

Periodo	Ruta 1	Ruta 2
	Tiempo de evacuación de 10 a 1	Tiempo de evacuación de 11 a 1
1	55.76	47.99
2	55.76	48.67
3	55.78	53.87
4	55.88	77.43
5	63.66	108.77
6	66.75	123.22
7	73.75	135.24
8	95.72	159.06
9	103.46	165.24
10	126.52	194.78

Periodo	Ruta 1	Ruta 2
	Tiempo de evacuación de 10 a 1	Tiempo de evacuación de 11 a 1
11	113.62	159.29
12	119.88	180.3
13	127.45	209
14	128.35	209.41
15	127.3	197.43
16	130.88	269.03
17	131.67	315.29
18	128.24	285.49
19	133.12	193.36
20	133.74	210.13
21	133.23	205.78
22	141.43	211.21
23	139.58	192.09
24	214.94	221.96

**Fuente.** Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

La Tabla 23 contiene los resultados de tiempo de evacuación de los 24 periodos de salida para la ruta 1 y 2 del tercer escenario de simulación.

**Tabla 23.** Resultados del tiempo de evacuación del modelo dinámico de la ruta 3 y 4 del escenario 3

Periodo	Ruta 3	Ruta 4
	Tiempo de evacuación de 12 a 1	Tiempo de evacuación de 13 a 1
1	73	73.9
2	73	73.9
3	73.2	73.93
4	74.09	74.5
5	78.71	80.1
6	87.01	86.27
7	95.75	94.75
8	114.08	111.6
9	123.3	120.05
10	170.04	170.88
11	132.34	129.11
12	162.5	157.44
13	183.24	186.17
14	200.62	202.1

Periodo	Ruta 3	Ruta 4
	Tiempo de evacuación de 12 a 1	Tiempo de evacuación de 13 a 1
15	193.29	193.95
16	211.19	211.36
17	216.13	216.68
18	214.26	215.17
19	205.25	205.94
20	186.72	186.35
21	176.44	177.13
22	158.98	159.88
23	158.84	158.91
24	160.94	159.11

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Debido a que los escenarios 2 y 3 tienen menor tiempo de evacuación en comparación con el escenario 1, solo se calcularon la cantidad de autobuses con capacidad de 48 pasajeros para las diferentes rutas. La Tabla 24 contiene la cantidad de autobuses necesarios para la evacuación para el escenario 2, con un total de 590 autobuses realizando en promedio 2.01 viajes por vehículo. En la Tabla 25 se tiene la cantidad de autobuses para las rutas del escenario 3 con un total de 578 autobuses con capacidad de 48 pasajeros realizando 2.06 viajes por vehículo.

**Tabla 24. Cantidad de autobuses por origen destino para evacuar en el escenario 2**

Nº Ruta	Zona de Evacuación (origen)	Refugio (destino)	Autobuses
1	10	1	10
2	11	1	18
3	12	2	5
4	13	2	15
5	13	3	4
6	22	3	22
7	23	3	29
8	24	3	42
9	14	4	4
10	14	5	80
11	15	5	26
12	15	6	7
13	16	6	57
14	17	6	31



Nº Ruta	Zona de Evacuación (origen)	Refugio (destino)	Autobuses
15	17	7	32
16	18	7	100
17	19	7	34
18	20	7	27
19	20	8	32
20	21	8	4
21	21	9	11
Total			590

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Tabla 25. Cantidad de autobuses por origen destino para evacuar en el escenario 3

Nº Ruta	Zona de Evacuación (origen)	Refugio (destino)	Autobuses
1	10	9	8
2	11	4	11
3	12	1	7
4	13	1	19
5	14	7	85
6	15	5	34
7	16	7	49
8	17	3	91
9	18	3	101
10	19	6	30
11	20	5	37
12	21	8	17
13	22	2	21
14	23	2	28
15	24	6	40
Total			578

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

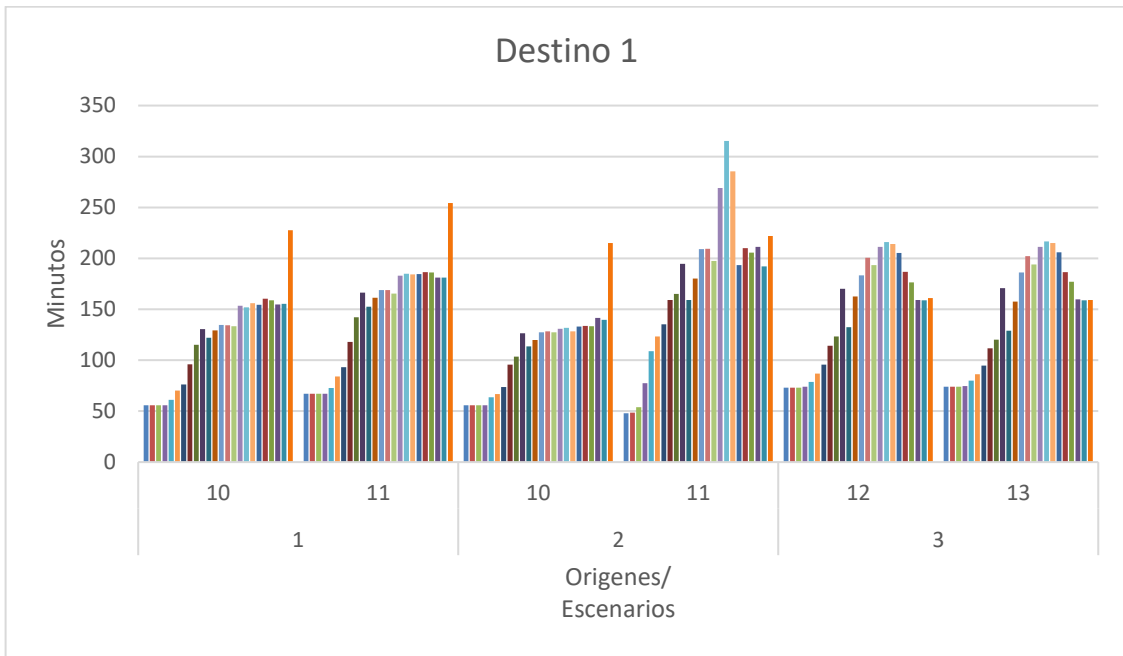
La Figura 23 contiene los tiempos de evacuación de los 3 escenarios evaluados, en el escenario uno están los orígenes 10 y 11 hacia el destino 1; en el escenario dos los orígenes 10 y 11 hacia el destino 1, y en el escenario tres los orígenes 12 y 13 con dirección al destino 1. Cada Origen-Destino contiene los 24 periodos de tiempo de evacuación dependiendo del tiempo de salida de los hogares. En el escenario 1 los orígenes 10 y 11 con destino a 1 tienen un máximo tiempo de evacuación en el periodo 24 con 254.25 y 221.96 minutos respectivamente, y un tiempo

promedio de 120.7 minutos para 10-1 y 145.28 para 11-1, el valor máximo de estas dos rutas en el periodo 24 se debe al número de vehículos que permanecen en cola al final de la simulación, como se muestra en la Figura 24 se tienen dos secciones con dirección al destino 1 con más de 977 vehículos en cola debido a la acumulación de congestión.

En el escenario 2 los tiempos máximos de evacuación para 10-1 es de 214.94 minutos en el periodo 24 y un promedio de 110.6 minutos, los tiempos para 11-1 son de 315.19 minutos en el periodo 17 y un promedio de 173.9 minutos, como se observa en la Figura 25 los vehículos en cola al final del periodo 24 en una sección de la carretera hacia el destino 1 contiene más de 906 vehículos debido a la acumulación de congestión.

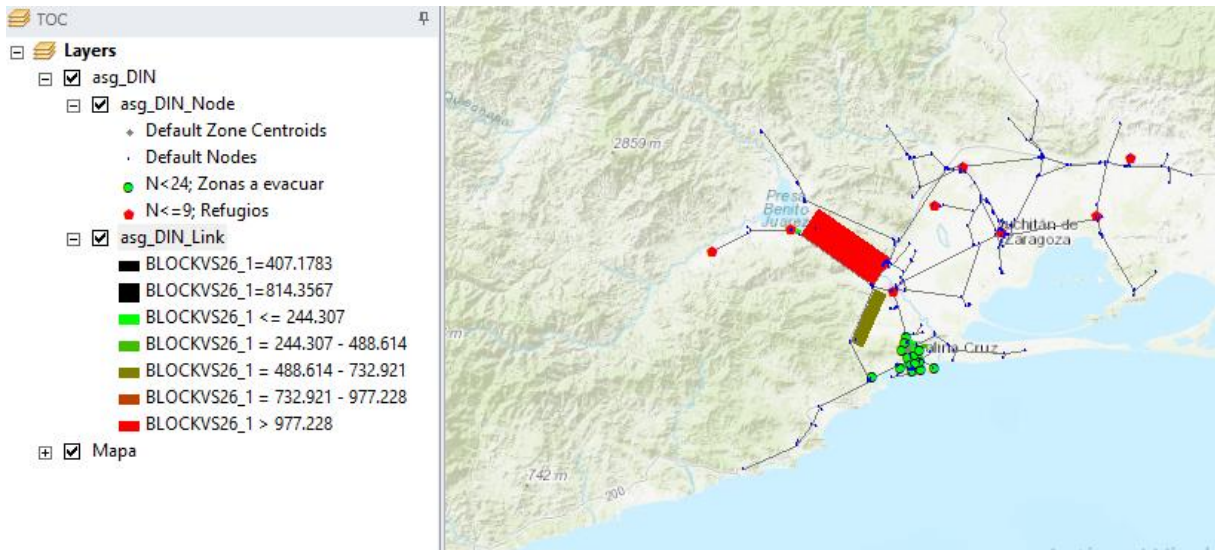
En el escenario 3 donde se modificaron los orígenes para el destino 1 se obtuvo un tiempo máximo de evacuación para 12-1 de 216.9 minutos en el periodo 17 y un promedio de 146.78, para el O-D 13-1 se obtuvo un máximo de 216.68 minutos y 146.6 minutos de tiempo promedio. En la Figura 26 se muestra que los vehículos en cola al final del periodo 24 en la sección de carretera hacia el destino 1 es de 66 vehículos y un máximo de 266, la menor cantidad de vehículos en cola en el último periodo de simulación significa una mejor distribución de los viajes de evacuación hacia las zonas seguras al no saturar pocas vialidades. La comparación de los demás tiempos de evacuación de los 3 escenarios y los tiempos de evacuación del escenario 3 se pueden consultar en el Anexo C.

Figura 23. Comparación de tiempos de evacuación de todos los orígenes con un mismo destino para los 3 escenarios



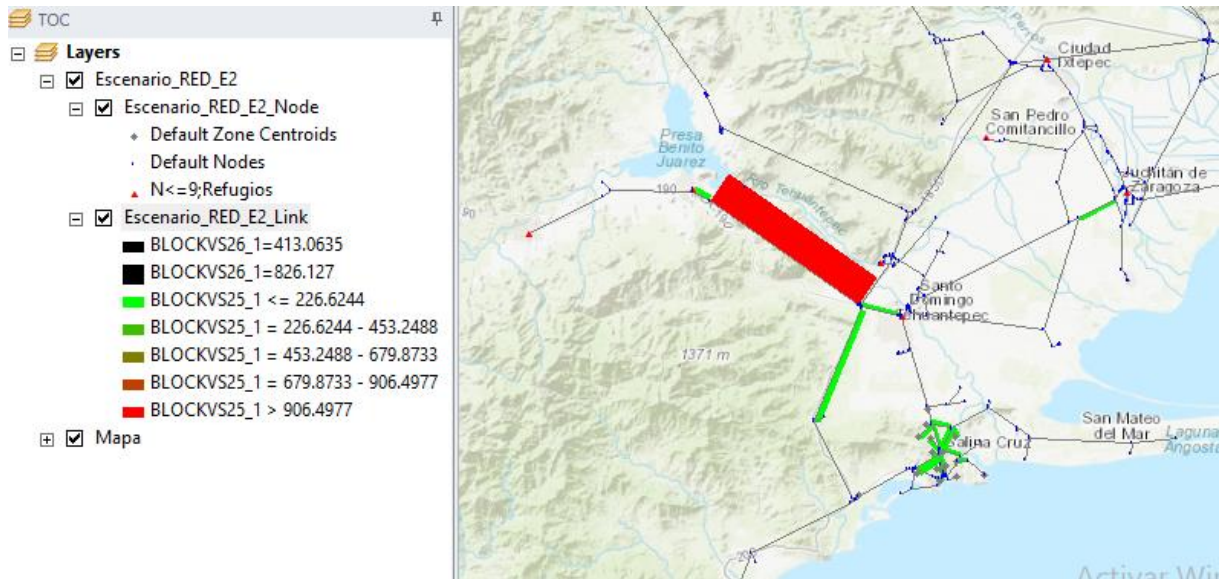
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Figura 24. Vehículos en cola al final del periodo 24 en el escenario 1



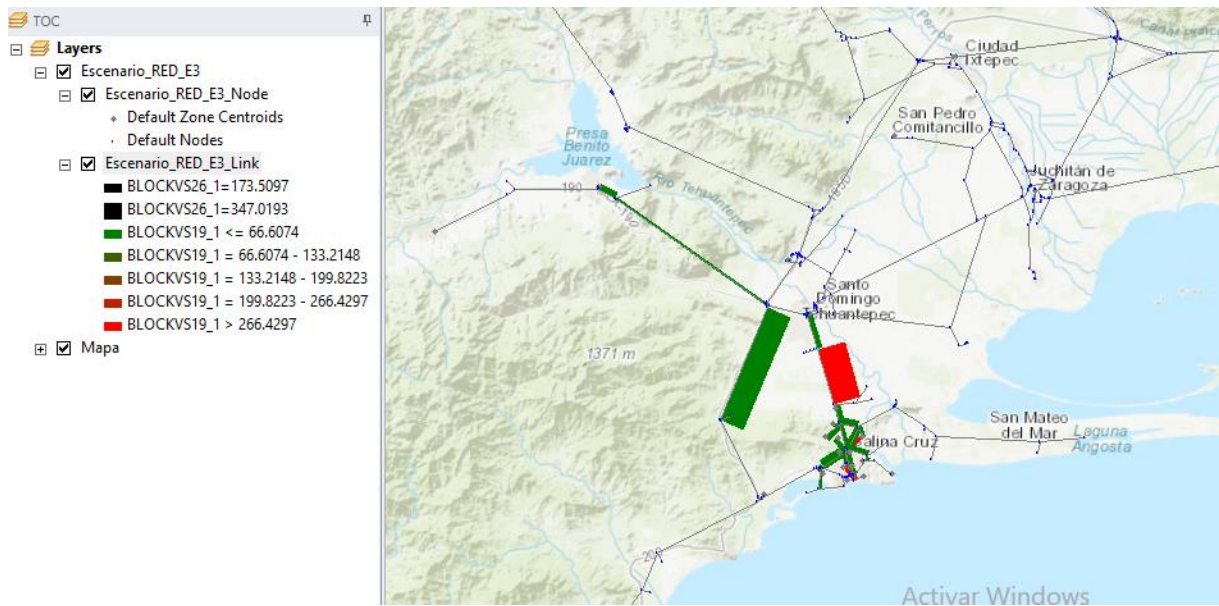
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Figura 25. Vehículos en cola al final del periodo 24 en el escenario 2



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

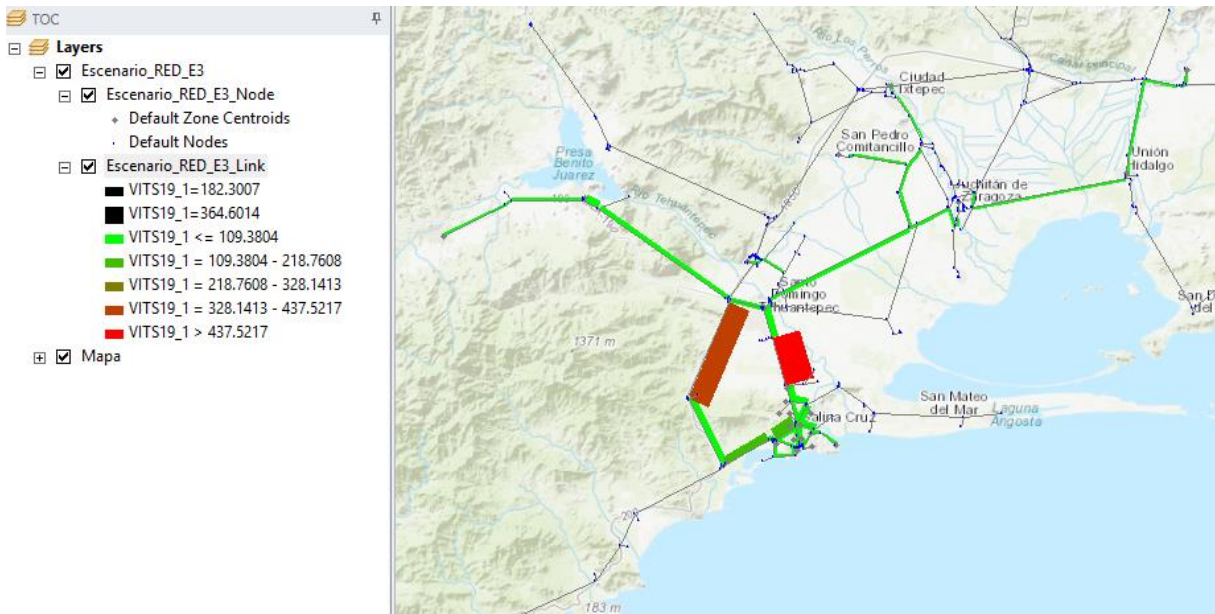
Figura 26. Vehículos en cola al final del periodo 24 en el escenario 3



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

La representación del volumen de vehículos del escenario 3 está en la Figura 27, en color rojo y café se observan los valores más altos, la importancia de identificar los volúmenes más altos es para crear estrategias de gestión de tránsito que disminuyan o eviten congestionamientos.

**Figura 27. Volumen vehicular del escenario 3 en el periodo 19**



**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**

## **Conclusiones y recomendaciones**

Las evacuaciones en caso de emergencia como un huracán en un área densamente poblada resultan en cambios drásticos de la demanda de viajes en una red carretera, por lo tanto, la estimación de los cambios en una red de transporte es crítica para la planeación estratégica en caso de huracanes por parte de la autoridad. Debido a que la planeación debe hacerse mucho antes que ocurra el evento se pueden evaluar diferentes escenarios para tomar las mejores decisiones y disminuir el tiempo de exposición y la posible pérdida de vidas.

Al realizar el presente trabajo y finalizar la comparación de los resultados del modelo estático y la simulación mesoscópica de tráfico para la evacuación de personas en caso de huracanes, se concluye que:

Los resultados del modelo proporcionaron estimaciones del tiempo necesario para evacuar, además de diferentes medidas de rendimiento del sistema de transporte, como volumen de secciones de la red, colas y las rutas más cortas. Además, con los tiempos de evacuación se obtuvo la cantidad de flotilla de transporte para la evacuación.

La mejor asignación de los viajes se logró en el modelo dinámico en específico en el escenario 3, debido a que representa los niveles de congestión a través del tiempo y sin dejar un número cercano a la capacidad de las vialidades en cola al final de la simulación como en los escenarios 1 y 2, y en comparación con el modelo estático que solo representa el tiempo de evacuación basado en la ruta más corta sin restricciones de capacidad.

Representar las condiciones de una red en condiciones de emergencia permite identificar problemas como; cuellos de botella, capacidad insuficiente para evacuar en un corto tiempo, elaboración de estrategias de gestión de tráfico como carriles a contra flujo, cierre de intersecciones, u obras de mitigación.

La congestión del tráfico causada en situaciones de emergencia como una evacuación por la ocurrencia de un huracán puede llegar a causar pérdida de vidas. El aumento repentino de la demanda dará como resultado cargas excesivas en las carreteras que generalmente no están diseñadas para manejar esos volúmenes de tráfico. La gestión del tránsito durante los eventos de emergencia regionales es fundamental para lograr una evacuación segura y eficiente. El modelo dinámico desarrollado en este trabajo podría aplicarse para diversos escenarios dependiendo las características del evento hidrometeorológico para desarrollar de gestión del tráfico para apoyar las evacuaciones de emergencia. El estudio podría ampliarse en el futuro para lo siguiente:

- Desarrollar un modelo de demanda para conocer la distribución de evacuación de los hogares, el tiempo de salida y la preferencia de destino si es que existe. Con estos nuevos datos el modelo de asignación dinámica se podría usar para diferentes escenarios dependiendo de las características de magnitud de un huracán, así como, determinar los tiempos totales de evacuación.
- Con datos de modelación numérica de huracanes se podrían observar cambios en la capacidad de la red lo que modificaría el tiempo de evacuación y la cantidad de vehículos requeridos.
- Este estudio utilizó el principio de Equilibrio del Usuario para asignar tráfico a sus rutas de viaje. Este enfoque supone que los usuarios tienen un conocimiento perfecto sobre las condiciones del tráfico en el sistema de transporte y usan la ruta que minimiza su costo de viaje. Durante las evacuaciones, los evacuados pueden usar el camino que les es más familiar, y el modelo no es capaz de capturar las preferencias sociales en la asignación de tráfico. Para lograrlo, se deben recopilar más datos sobre los factores que afectan la elección de la ruta de viaje del evacuado.

## Referencias

- Aimsun y anexos (2013) Curso Teórico y de Práctica Guiada por Aimsun. Transmilenio. Colombia.
- Aymamí, J.M., Torday, A., Triantafyllos, D., Casas, J. and Perarnau, J. (2006) ‘Estimación de tiempos de evacuación mediante simulación dinámica. Evaluación de estrategias de gestión para su reducción.’ TSS – Transport Simulation Systems.
- Balcik, B., Beamon, B.M. and Smilowitz, K. (2008) ‘Last Mile Distribution in Humanitarian Relief’, *Journal of Intelligent Transportation Systems Technology, Planning, and Operations*, Vol. 12(2), pp. 51-63.
- Barceló, J. (2010) ‘Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation’. In Barceló Ed. *Fundamentals of Traffic Simulation, International Series in Operations Research and Management Science*, 145(1), pp. 1–62.
- Banks, J., Carson II, J.S., Nelson, B.L. and Nicol, D.M. (2014) *Discrete Event System Simulation*. Fifth Edition. Pearson.
- Barbarosoglu, G., and Arda, Y. (2004) ‘A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response’, *Journal of the Operational Research Society* Vol. 55(1), pp. 43–53.
- Bayram, V. (2016) ‘Optimization Models in Large Scale Evacuation Planning and Management: A Literature Review’. *Surveys in Operations Research and Management Science incorporated into Computers and Operations Research*, Vol. 21, pp. 63–84.
- Burghout, W., Koutsopoulos, H.N. and Andréasson, I. (2005) ‘Hybrid Mesoscopic – Microscopic Traffic Simulation’, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1934 (1), pp. 218–225.
- CEPC (2017) ‘Plan Municipal de Prevención y Reducción de Riesgos de Desastres, Oaxaca’.
- Chen, X. and Zhan, F. (2008) ‘Agent-Based Modeling and Simulation of Urban Evacuation: Relative Effectiveness of Simultaneous and Staged Evacuation Strategies’, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 59(1), pp. 25-33.
- Chiu, Y. and Zheng, H. (2007) ‘Real-time mobilization decisions for multi-priority emergency response resources and evacuation groups: Model formulation and solution’, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 43(6), pp. 710–736.



- Cova, T.J. and Johnson, J.P. (2002) ‘Microsimulation of neighborhood evacuations in the urban-wildland interface’, *Environment and Planning A*, Vol. 34, pp. 2211–2229.
- Dash, N. and Gladwin, H. (2007) ‘Evacuation Decision Making and Behavioral Responses: Individual and Household’, *Natural Hazards Review*, Vol. 8(3), pp. 69–77.
- Dixit, V. and Wolshon, B. (2014) ‘Evacuation Traffic Dynamics’, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 49, pp. 114–125.
- Easa, S.M. (1991) ‘Traffic assignment in practice: overview and guidelines for users’, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 117(6), pp. 602–623.
- Espinosa, B. (2019) ‘Identificación de los Factores que Influyen en la Decisión de Evacuación ante un Evento Hidrometeorológico y Diseño de un Instrumento de Medición’. Trabajo Terminal de Grado Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Florian, M. and Hearn, D. (1995). Chapter 6 Network equilibrium models and algorithms. *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Vol. 8, pp. 485-550.
- Florian, M., Mahut, M. and Tremblay, N. (2002) ‘Application of a Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Model’, In: Kitamura R., Kuwahara M. (eds) *Simulation Approaches in Transportation Analysis*. *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, Vol 31, Springer, pp. 1–22.
- Ford, L.R. and Fulkerson, D.R. (1958). Constructing Maximal Dynamic Flows from Static Flows, *Operations Research*, Vol. 6(3), pp. 307-460.
- Friesz, T., Bernstein, D., Smith, T., Tobin, R., and Wie, B. (1993) A Variational Inequality Formulation of the Dynamic Network User Equilibrium Problem. *Operations Research*, Vol. 41(1), pp. 179-191.
- Goerigk, M., Grün, B. and Heßler, P. (2014) ‘Combining bus evacuation with location decisions: A branch-and-price approach’, *Transportation Research Procedia*, Vol. 2, pp. 783–791.
- Haghani, A. L. (1996) ‘Formulation and Solution of a Multi-commodity, Multi-modal Network Flow Model for Disaster’, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 30(3), pp. 231–250.
- Hardy, M. and Wunderlich, K. (2008) ‘Evacuation management operations modeling assessment: Transportation modeling inventory’, *15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America Annual Meeting 2008*, Vol. 4, pp. 2648–2664.

- Hasan, S., Ukkusuri, S., Gladwin, H., and Murray-Tuite, P. (2011) ‘Behavioral Model to Understand Household-Level Hurricane Evacuation Decision Making’, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137(5), pp. 341–348.
- Heydecker, B.G. and Addison, J.D. (2005) ‘Analysis of Dynamic Traffic Equilibrium with Departure Time Choice’, *Transportation Science*, Vol. 39(1), pp. 39–57.
- Immers, L. and Stada, J. (1998) ‘Traffic Demand Modelling’, Katholieke Universiteit Leuven.
- ISDR (2009). Global assessment report on disaster risk reduction: (2009). Report a. Geneva, Switzerland: UNISDR. (International Strategy for Disaster Reduction).
- Jonkman, S.N. (2007) ‘Loss of life estimation in flood risk assessment Theory and application’s. Edited by D. Cluster.
- Kalafatas, G. and Peeta, S. (2009) ‘Planning for Evacuation: Insights from an Efficient Network’, *Journal of Infrastructure System*, Vol. 15(1), pp. 21–30.
- Koch, R. and Skutella, M. (2011) ‘Nash Equilibria and the Price of Anarchy for Flows over Time’, *Theory of Computing Systems*, Vol. (49), pp. 71–97.
- Kongsomsaksakul, S., Yang, C., and Chen, A. (2005) ‘Shelter location-allocation model for flood evacuation planning’, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 4237–4252.
- Krista, J., Chandra, A., Alexiadis, V., and Skabardonis, A. (2004) ‘Traffic Analysis Toolbox Volume II: Decision support methodology for selecting traffic analysis tools’, Report No. FHWA-HRT-04-039, II, p. 108.
- Li, X., Li, Q. and Claramunt, C. (2018) ‘A time-extended network model for staged evacuation planning’, *Safety Science*, Vol. 108, pp. 225–236.
- Lim, G.J., Zangeneh, S., Baharnemati, M.R., Assavapokee, T. (2012) ‘A capacitated network flow optimization approach for short notice evacuation planning’, *European Journal of Operational Research*, Vol. 223(1), pp. 234–245.
- Lindell, M. K. (2008) ‘EMBLEM2: An empirically based large scale evacuation time estimate model’, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, pp. 140–154.
- Liu, Y., Lai, X., and Chang, G. (2007) ‘Two-Level Integrated Optimization System for Planning of Emergency Evacuation’, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132(10), pp. 800–807.

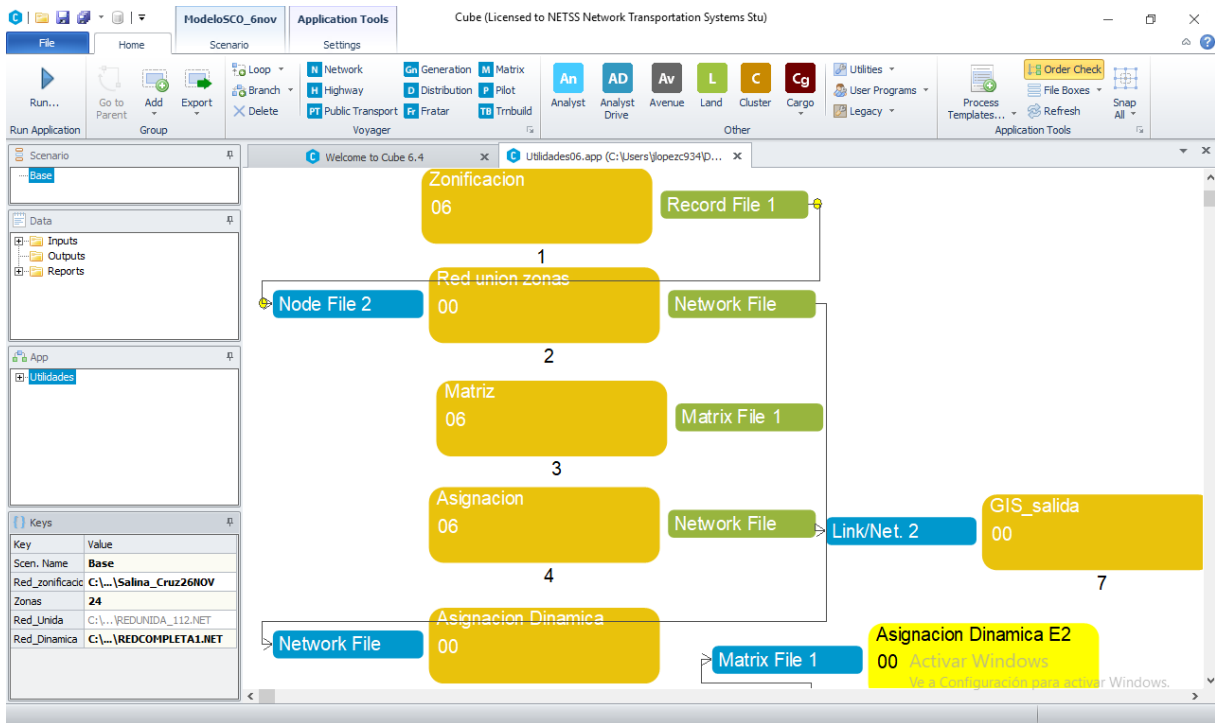
- Mahmassani, H.S. (2001) ‘Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications’, *Networks and Spatial Economics* Vol.1(3–4), pp. 267–292.
- Marín, A. and Jaramillo, P. (2008) ‘Urban rapid transit network capacity expansion’, *European Journal of Operational Research*, Vol. 191(1), pp. 45–60.
- Miller-Hooks, E. and Patterson, S.S. (2004) ‘On Solving Quickest Time Problems in Time-Dependent Dynamic Networks’, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 3(1), pp. 39–71.
- Molinero, A. y Sánchez, I. (2002) ‘Transporte Público Planeación, Diseño, Operación y Administración’. Fundación ICA, A.C. México
- Murray-Tuite, P.M. and Mahmassani, H.S. (2003) ‘Model of Household Trip-Chain Sequencing in Emergency Evacuation’, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1831(1), pp. 21–29.
- Ortúzar, J.D. and Willumsen, L.G. (2011) *Modelling Transport*. 4th edition, Wiley.
- Ozdamar, L. and Ertem, M.A. (2015) ‘Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics’, *European Journal of Operational Research*, Vol. 244(1), pp. 55–65.
- Peck, S. and Daellenbach, H. (1995) ‘Systems and Decision Making: A Management Science Approach.’, *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 46(11), pp. 1396–1397.
- Pel, A.J., Bliemer, M.C.J. and Hoogendoorn, S.P. (2012) ‘A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations’, *Transportation*, Vol. 39(1), pp. 97–123.
- Ran, B. and Boyce, D. (1996) *Modeling dynamic transportation networks*. Springer.
- Robinson, R.M., Collins, A.J., Jordan, C.A., Foytik, P. and Khattak, A.J. (2018) ‘Modeling the impact of traffic incidents during hurricane evacuations using a large scale microsimulation’, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 31, pp. 1159–1165.
- Sadri, A., Ukkusuri, S., Murray-Tuite, P., and Gladwin, H. (2014) ‘Analysis of hurricane evacuee mode choice behavior’, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 48, pp. 37–46.

- SEDESOL (2011) ‘Actualización del Atlas de Riesgos de Salina Cruz, Oaxaca, 2011’, México.
- Shahabi, K. and Wilson, J.P. (2018) ‘Scalable evacuation routing in a dynamic environment’, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 67, pp. 29–40.
- Song, R., He, S. and Zhang, L. (2009) ‘Optimum Transit Operations during the Emergency Evacuations’, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 9(6), pp. 154–160.
- Swamy, R., Eun Kang, L., Batta, R. and Chung, Y. (2017) ‘Hurricane evacuation planning using public transportation’, *Socio-Economic Planning Sciences*. Vol. 59, pp. 43–55.
- Tweedie, S., Rowland, J., Walsh, S., and Hagle, P. (1986) ‘A Methodology for Estimating Emergency Evacuation Times’, *The Social Science Journal*, Vol. 23(2), pp. 189–204.
- Vickrey, W.S. (1969) ‘Congestion theory and transport investment’, *American Economic Association*, Vol. 59(2), pp. 251–260.
- Wardrop, J.G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II*, pp. 325–378.
- Wilches-Chaux, G. (1989) *Desastres, ecologismo y formación profesional*. Primera Ed. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Colombia.
- Wilmot, C. and Meduri, N. (2005) ‘Methodology to Establish Hurricane Evacuation Zones’, *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1922(1), pp. 129–137.
- Wolshon B., (2008) ‘Empirical Characterization of Mass Evacuation Traffic Flow’, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2041(1), pp. 38–48.
- Wolshon, B. and Mcardle, B. (2009) ‘Temporospatial Analysis of Hurricane Katrina Regional Evacuation Traffic Patterns’, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.15(1), pp. 12–20.
- Xie, C., Lin, D. and Waller, S. T. (2010) ‘A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies’, *Transportation Research Part E*. Vol. 46(3), pp. 295–316.
- Yang, Q., Koutsopoulos, H.N. and Ben-Akiva, M.E. (2000) ‘Simulation Laboratory for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems’, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1710(1), pp. 122–130.

- Yi, W. and Linet, O. (2007) ‘A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities’, *European Journal of Operational Research* Vol. 179(3), pp. 1177–1193.
- Yuan, F., Han, L., Chin, S., and Hwang, H. (2006) ‘Proposed Framework for Simultaneous Optimization of Evacuation Traffic Destination and Route Assignment’, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1964(1), pp. 50–58.
- Zhu, D. and Marcotte, P. (2000) ‘On the Existence of Solutions to the Dynamic User Equilibrium Problem’, *Transportation Science*, Vol. 34(4), pp. 321–442.

## Anexo A. Modelación en Cube

### Plantilla del Modelo de Cube



## Script Modelo Estático

```
3 RUN PGM=HIGHWAY PRNFILE="C:\USERS\JLOPEZC934\DOCUMENTS\MODELO_6_NOV\APPS\ACHWY06A.PRN" MSG='ASIGNACION TODO O NADA'
4 FILEO PRINTO[1] = "C:\Users\jlopec934\Documents\Modelo_6_nov\Asignacion\Rutas3.dat"
5 FILEO MATO[1] = "C:\Users\jlopec934\Documents\Modelo_6_nov\Asignacion\SALIDA_RED.MAT",
6     MO=1-2, NAME= 'TIME_1', 'DISTANCIA'
7 FILEO PATHO[1] = "C:\Users\jlopec934\Documents\Modelo_6_nov\Asignacion\PATH_1.PTH"
8 FILEI NETI = "C:\Users\jlopec934\Documents\Modelo_6_nov\Red_llnov\REDUNIDA_112.NET"
9 FILEI MATI[1] = "C:\Users\jlopec934\Documents\Modelo_6_nov\Matris\OD_matris6.MAT"
10 FILEO NETO = "C:\Users\jlopec934\Documents\Modelo_6_nov\Asignacion\REDCARGADA.NET"
11
12
13 PARAMETERS COMBINE = EQUI
14 PARAMETERS MAXITERS=10
15 PARAMETERS TRACESUMMARY = F
16
17 PROCESS PHASE=LINREAD
18     SPEED =LI.VELOCIDAD
19     DISTANCE =(LI.SHAPE_LENGTH/1000)
20     LINKCLASS=LI.CLASS
21     C =(LI.CAPACIDAD*.8)*LI.LANE
22
23     T0=(DISTANCE/SPEED)*60
24     IF(LI.CLASS=1-2)LINKCLASS=1
25     IF(LI.CLASS=3-8)LINKCLASS=2
26
27 -ENDPROCESS
28
29 PROCESS PHASE=ILOOP
30
31
32
33 PATHLOAD PATH=TIME VOL[1]=MI.1.1, VOL[2]=MI.1.2, TRACE=(I=11 & J=2), PRINTO=1, LIST= I, J A, B, _pathcost,
34 MW[1]=PATHTRACE (TIME), MW[2]=PATHTRACE (LI.SHAPE_LENGTH),
35 PATHO=1 NAME=ACN
36
37 -ENDPROCESS
38
39
40 PROCESS PHASE=ADJUST
41
42 FUNCTION {
43     TC[1] = T0*(1+0.15*(( V / C)^8))
44     TC[2] = T0*(1+0.15*(( V / C)^4))
45 }
```

## Plantilla Cube Modelo Dinámico

Key	Value
Scen. Name	Base
Red_zonificaci	C:\... \Salina_Cruz226NOV
Zonas	24
Red_Unida	C:\... \REDUNIDA_112.NET
Red_Dinamica	C:\... \REDCOMPLETA1.NET

## Script Modelo Dinámico

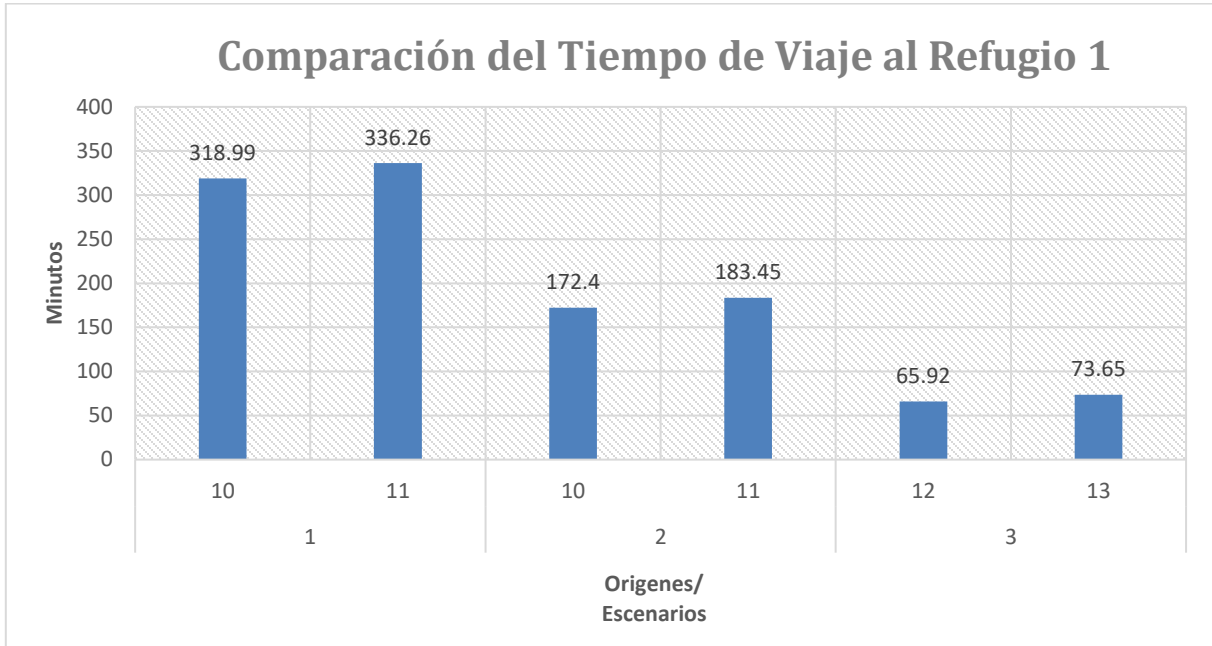
```

9  PARAMETERS MAXITERS=10, COMBINE=AVE, PACKETS=PA, GENPTRTYPER=7,
10  MODELPERIOD=360, SEGMENTS=15,15,15,15,
11  15,15,15,15,
12  15,15,15,15,
13  15,15,15,15,
14  15,15,15,15,
15  15,15,15,15,
16  15,15
17
18
19  VERPERDIST=221.844 ; (181.81*.7798)+(363.62*.2202) vehiculos y autobuses al porcentaje de la matriz OD
20
21
22  X-RANDSEED(165) ; seed random numbers
23
24  ALPHA=0.15
25  BETA=4
26
27  PROCESS PHASE-LINKREAD
28  SPEED=LI.VELOCIDAD
29  DISTANCE=(LI.SHAPE_LENGTH/1000)
30  C=(LI.CAPACIDAD*3)+LI.LANE
31  TD=(DISTANCE/SPEED)*60
32  LINKCLASS=LI.CLASS
33  STORAGE=LI.STORAGE
34  IF (LI.CLASS=1-2) LINKCLASS=1
35  IF (LI.CLASS=3-8) LINKCLASS=2
36
37
38
39
40
41
42  -ENDPROCESS
43
44  PROCESS PHASE-ILOOP
45  ; This phase performs a zonal loop (I=1,Zones).
46  ; DYNAMICLOAD is the dynamic analogue of the static PATHLOAD statement.
47  ; If DYNAMICLOAD is used for dynamic traffic assignment the PARAMETERS MODELPERIOD- and SEGMENTS- must be used.
48  ; During the ILOOP phase with DYNAMICLOAD, the path-building algorithm is invoked to calculate routes,
49  ; and any flows resulting from the movement of packets during previous iterations are removed from the volume fields.
50  ; Unlike a static load, no flows are assigned to the network at this stage in the process.
51  DYNAMICLOAD PATH=TIME, PACKETSIZE=1,
52  VOL[1]=mi.1.11, mi.1.12, mi.1.13, mi.1.22, mi.1.3, mi.1.4, mi.1.5, mi.1.6, mi.1.7, mi.1.8,
53  mi.1.9, mi.1.10, mi.1.11, mi.1.12, mi.1.13, mi.1.14, mi.1.15, mi.1.16, mi.1.17,
54  mi.1.18, mi.1.19, mi.1.20, mi.1.21, mi.1.22, mi.1.23, mi.1.24
55
56  -ENDPROCESS
57

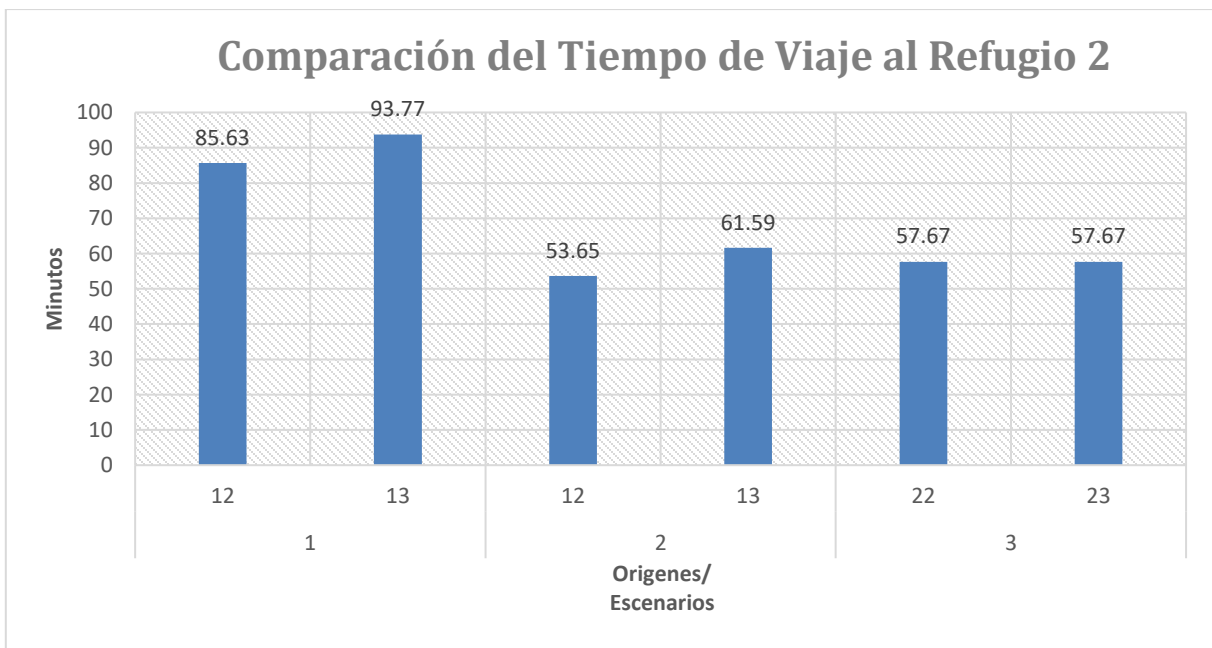
```



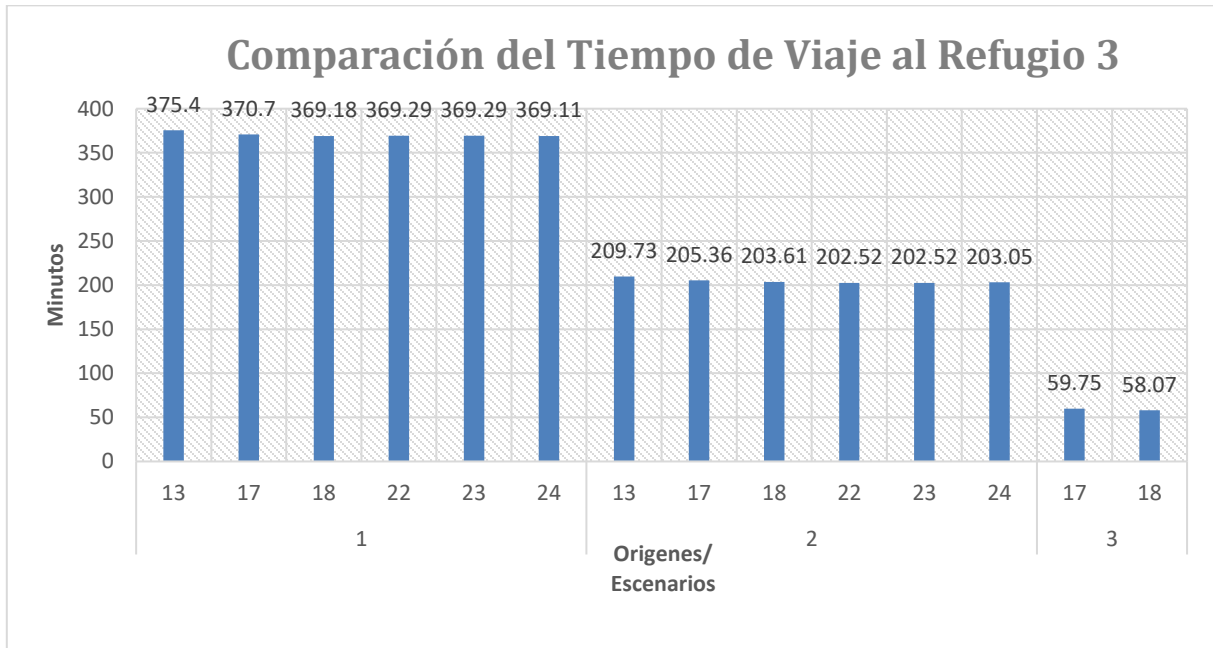
## Anexo B. Gráficas de tiempos de evacuación de los diferentes escenarios del modelo estático



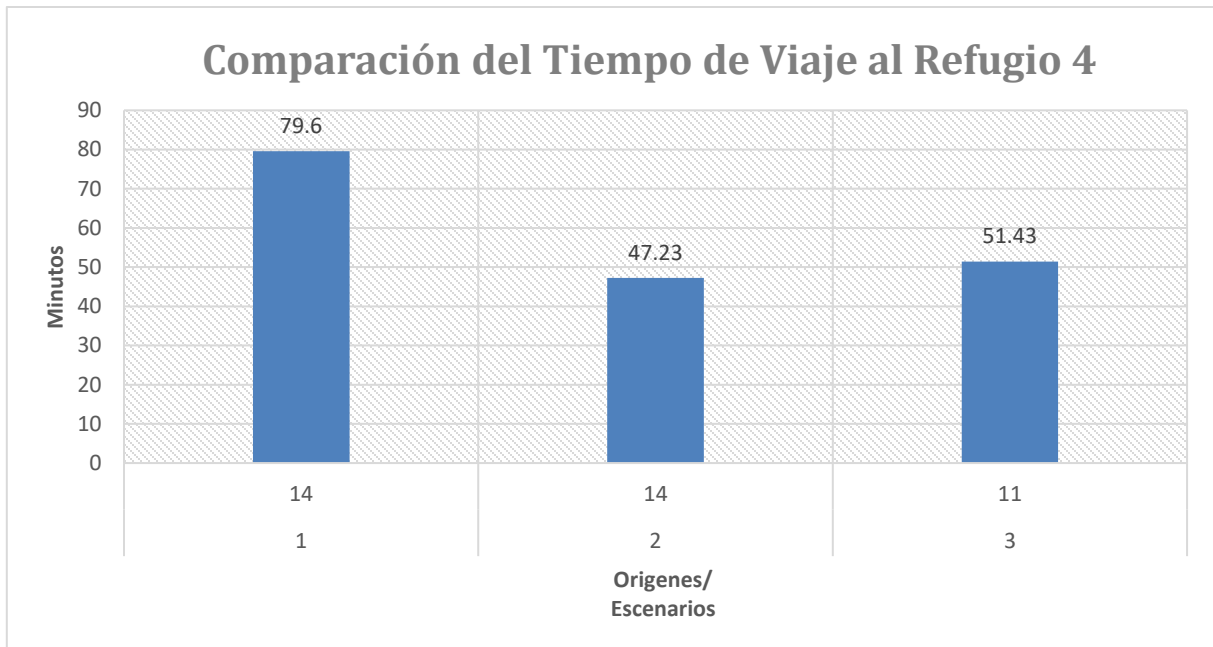
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



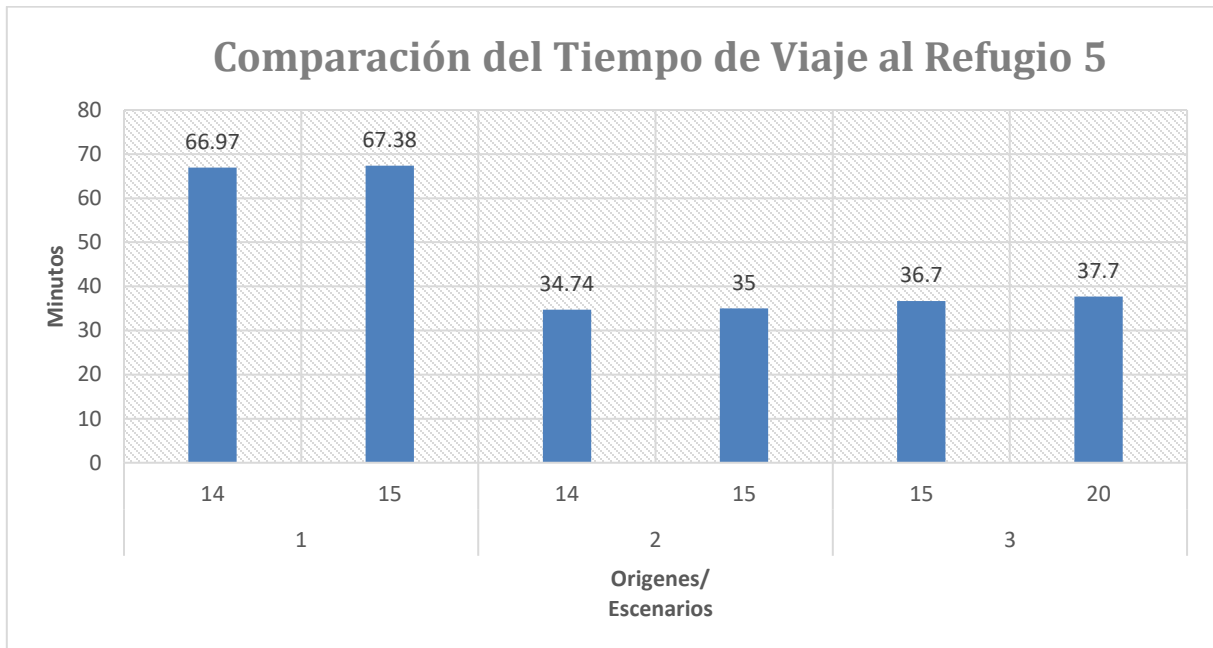
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



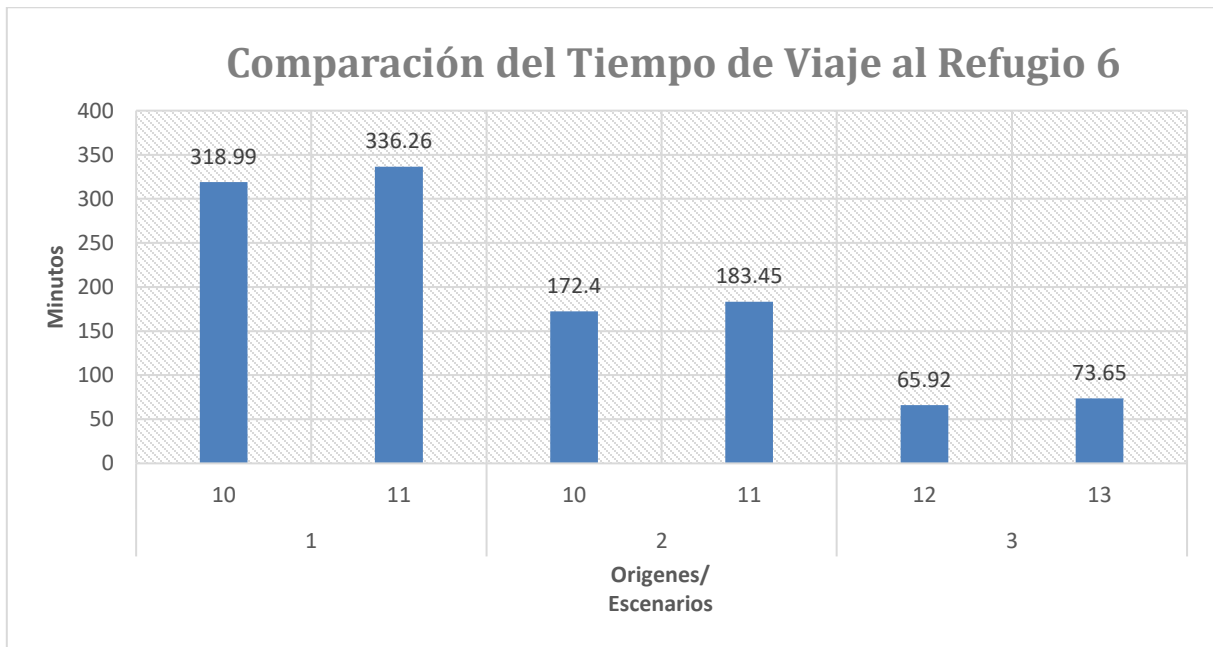
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



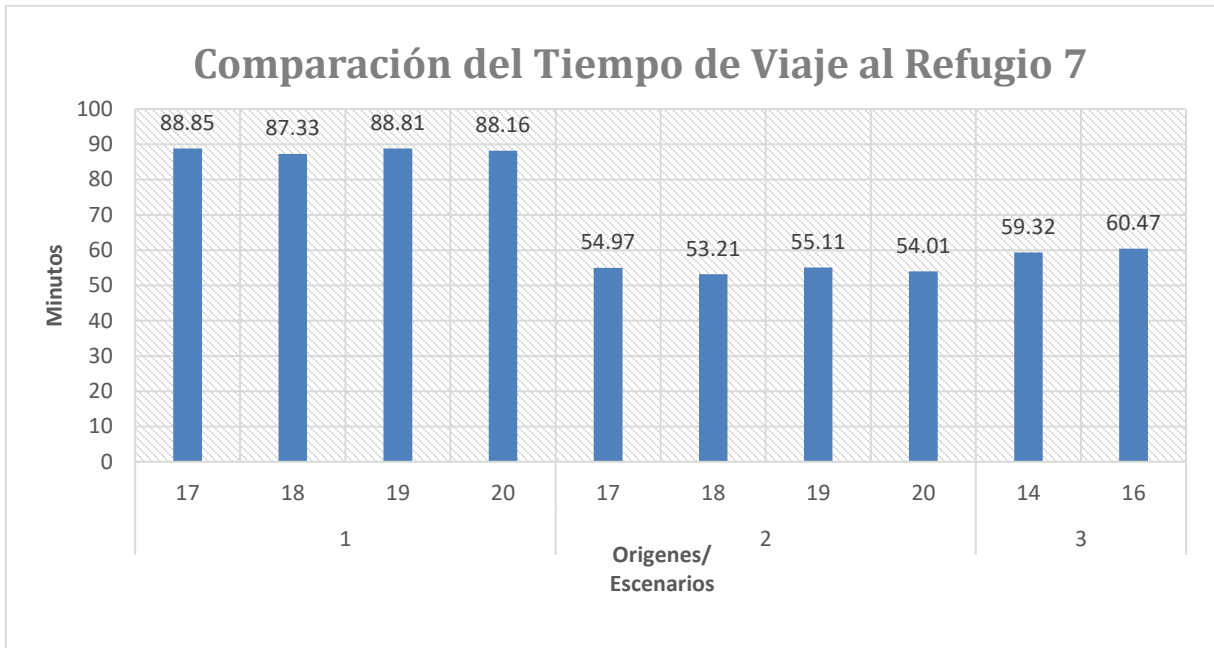
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



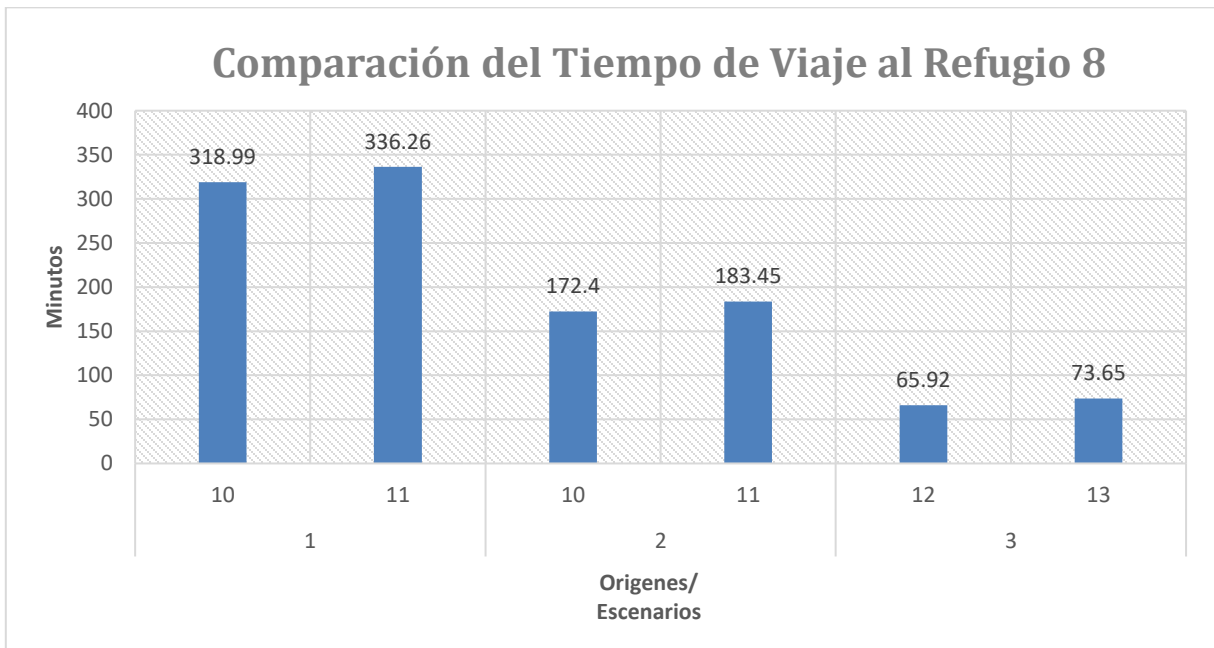
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



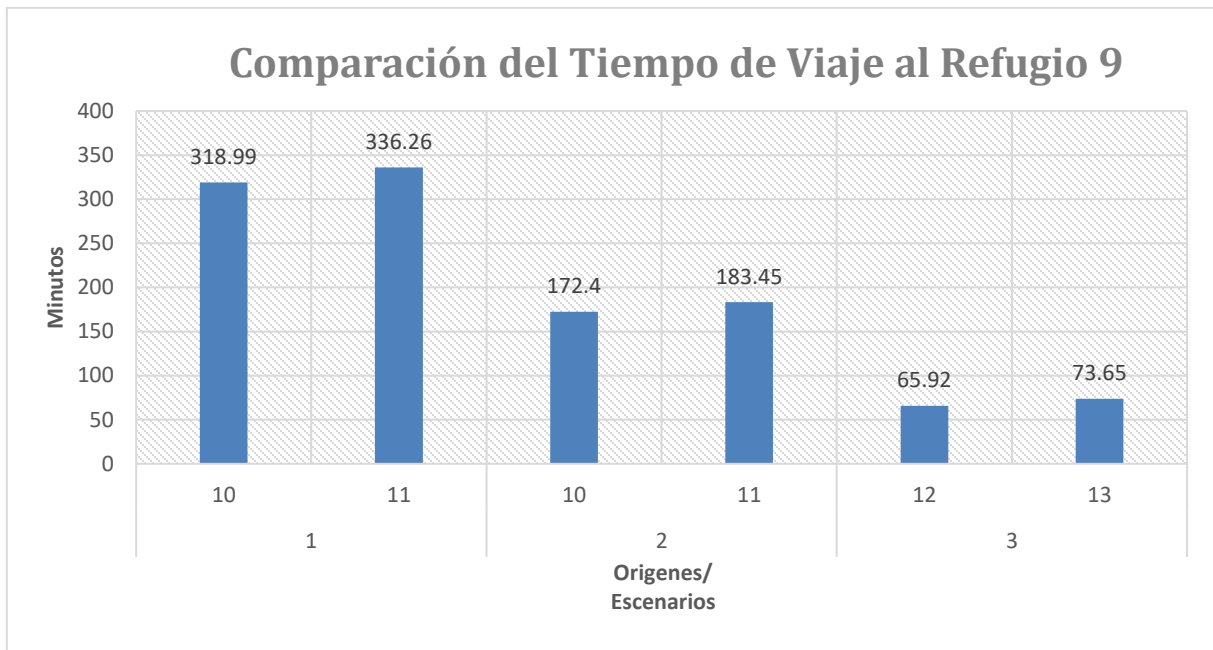
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

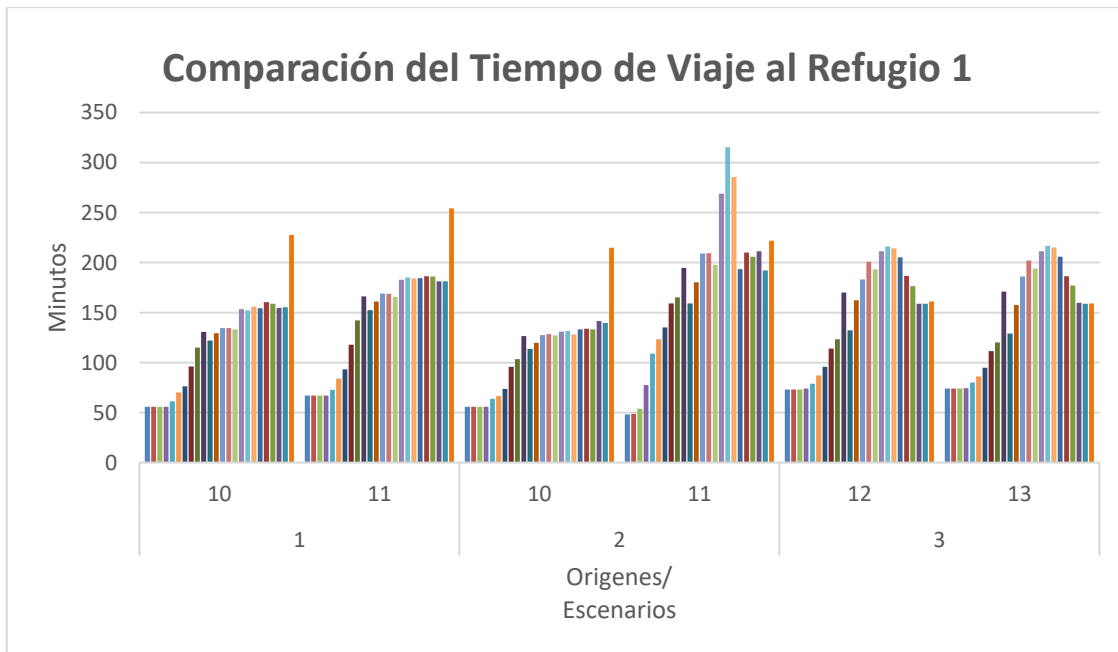


Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

## Anexo C. Resultados de tiempo de evacuación de los diferentes escenarios del modelo dinámico

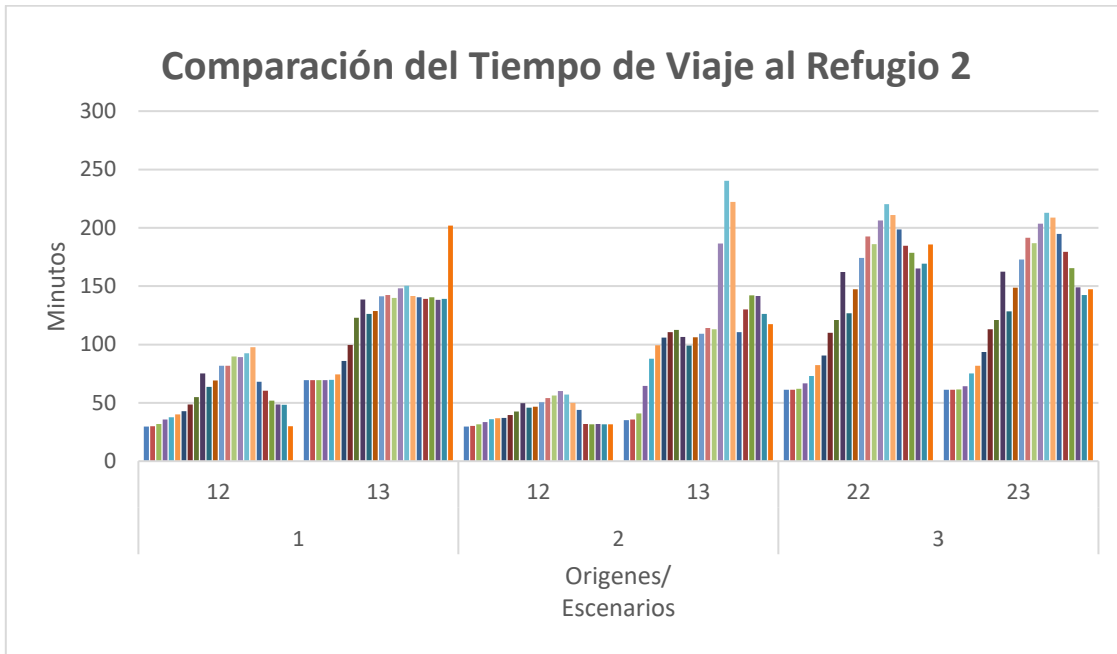


Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

**Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 1**

Periodo	Ruta 3	Ruta 4
	12 a 1	13 a 1
1	73	73.9
2	73	73.9
3	73.2	73.93
4	74.09	74.5
5	78.71	80.1
6	87.01	86.27
7	95.75	94.75
8	114.08	111.6
9	123.3	120.05
10	170.04	170.88
11	132.34	129.11
12	162.5	157.44
13	183.24	186.17
14	200.62	202.1
15	193.29	193.95
16	211.19	211.36
17	216.13	216.68
18	214.26	215.17
19	205.25	205.94
20	186.72	186.35
21	176.44	177.13
22	158.98	159.88
23	158.84	158.91
24	160.94	159.11

**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**



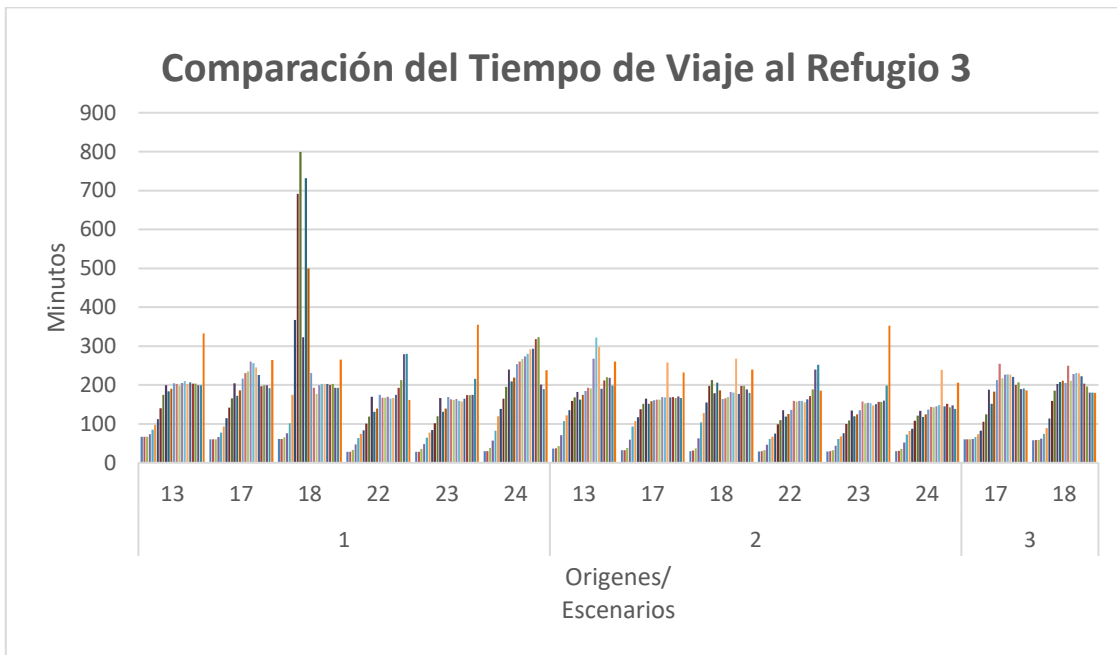
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

**Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 2**

Periodo	Ruta 13	Ruta 14
	22 a 2	23 a 2
1	61.1	61.1
2	61.3	61.12
3	61.92	61.57
4	66.79	64.3
5	73.02	75.1
6	82.37	81.9
7	90.65	93.68
8	110.12	113.02
9	121.03	120.88
10	162.03	162.41
11	126.69	128.42
12	147.32	148.72
13	174.07	172.8
14	192.52	191.55
15	186.03	186.8
16	206.25	203.51
17	220.21	212.92
18	210.99	208.78

Periodo	Ruta 13	Ruta 14
	22 a 2	23 a 2
19	198.69	194.89
20	184.72	179.53
21	178.49	165.52
22	165.26	149.1
23	169.23	142.3
24	185.83	147.4

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

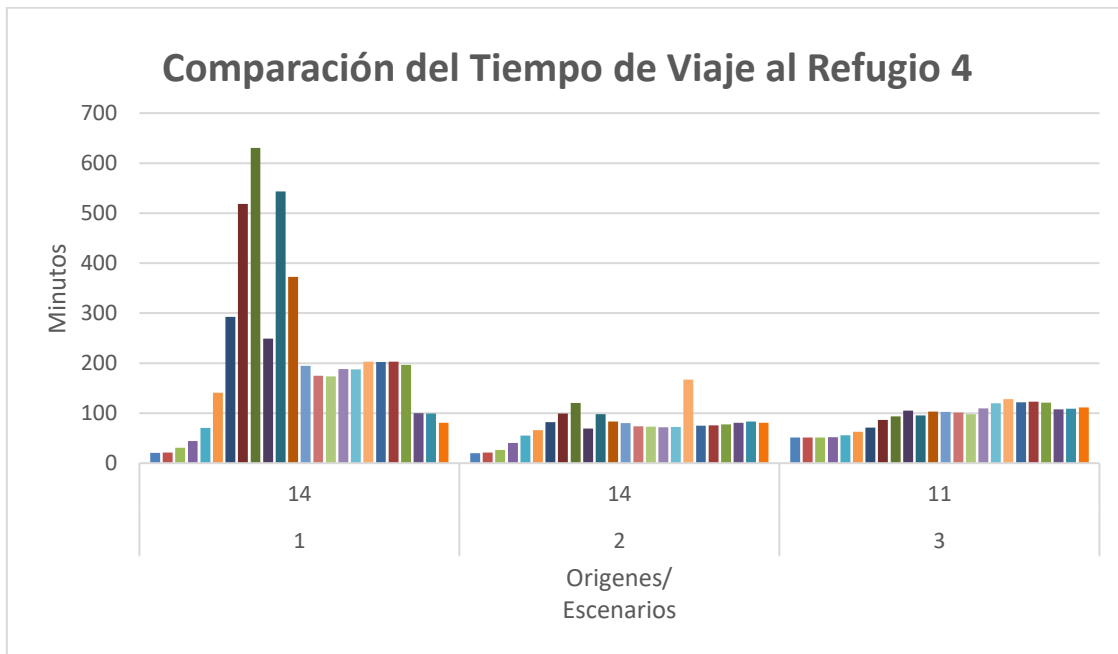
**Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 3**

Periodo	Ruta 8	Ruta 9
	17 a 3	18 a 3
1	60.57	57.99
2	60.74	58.39
3	60.62	59.03
4	61.3	62.44
5	66.33	74.67
6	73.55	89.43



Periodo	Ruta 8	Ruta 9
	17 a 3	18 a 3
7	82.47	113.71
8	105.39	159.1
9	124.59	185.37
10	188.12	202.97
11	151.84	208.04
12	183.17	211.12
13	212.33	205.17
14	254.73	249.29
15	217.59	210.56
16	226.34	228.5
17	227.44	230.6
18	226.86	229.68
19	220.43	222.1
20	200.18	203.91
21	206.68	196.54
22	189.47	180.7
23	191.31	180.13
24	186.61	179.78

**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**



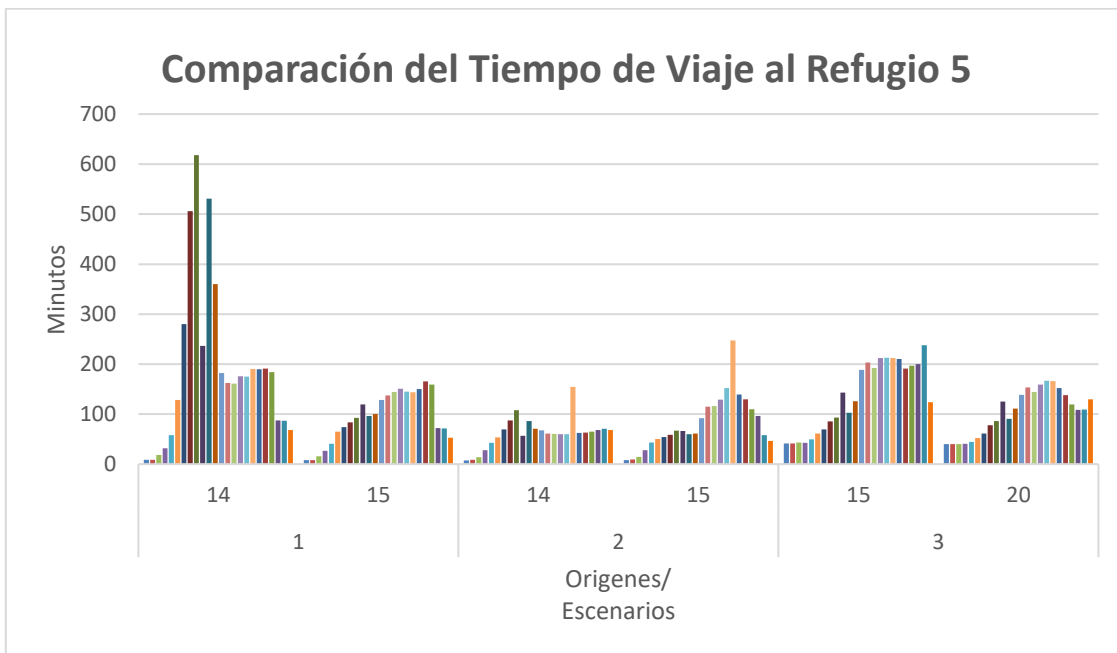
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

**Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 4**

Periodo	Ruta 2
	11 a 4
1	60.57
2	60.74
3	60.62
4	61.3
5	66.33
6	73.55
7	82.47
8	105.39
9	124.59
10	188.12
11	151.84
12	183.17
13	212.33
14	254.73
15	217.59
16	226.34
17	227.44

Periodo	Ruta 2
	11 a 4
18	226.86
19	220.43
20	200.18
21	206.68
22	189.47
23	191.31
24	186.61

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



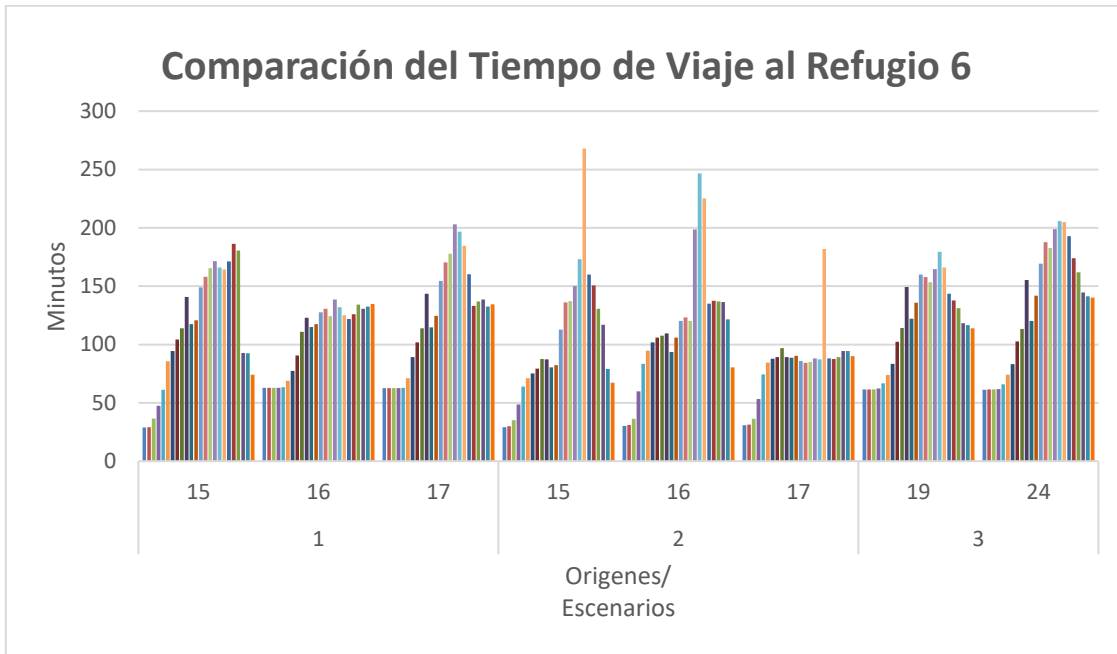
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

**Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 5**

Periodo	Ruta 6	Ruta 11
	15 a 5	20 a 5
1	41.33	40.11
2	41.33	40.11
3	43.01	40.16
4	42.6	40.64

Periodo	Ruta 6	Ruta 11
	15 a 5	20 a 5
5	49.94	44.8
6	61.27	52.15
7	69.44	60.87
8	85.32	77.62
9	93.41	85.89
10	143.17	124.99
11	102.56	90.88
12	125.63	111.38
13	188.79	138.32
14	203.1	152.99
15	192.5	144.3
16	212.29	159.27
17	212.58	166.97
18	211.95	166.19
19	210.33	151.9
20	190.84	137.9
21	197.13	119.38
22	199.82	108.36
23	237.98	108.87
24	124.15	129.45

**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**



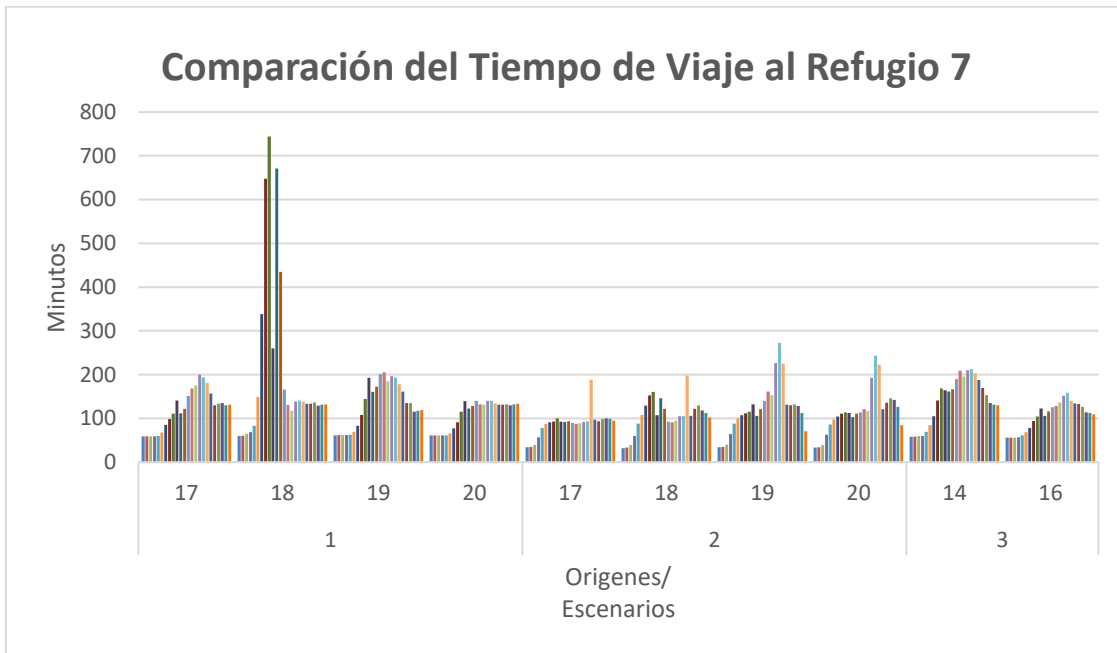
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 6

Periodo	Ruta 10	Ruta 15
	19 a 6	24 a 6
1	61.42	61.26
2	61.42	61.41
3	61.42	61.52
4	62.22	61.88
5	66.65	65.99
6	73.75	74.05
7	83.38	83.18
8	102.46	102.66
9	114.1	113.3
10	149.17	155.23
11	122.22	120.21
12	135.68	141.74
13	160.03	169.36
14	157.77	187.61
15	153.47	182.66
16	164.49	199
17	179.38	205.76

Periodo	Ruta 10	Ruta 15
	19 a 6	24 a 6
18	166.11	204.8
19	143.39	192.76
20	137.76	173.92
21	131.21	161.77
22	118.36	144.68
23	116.65	141.19
24	113.93	140.17

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



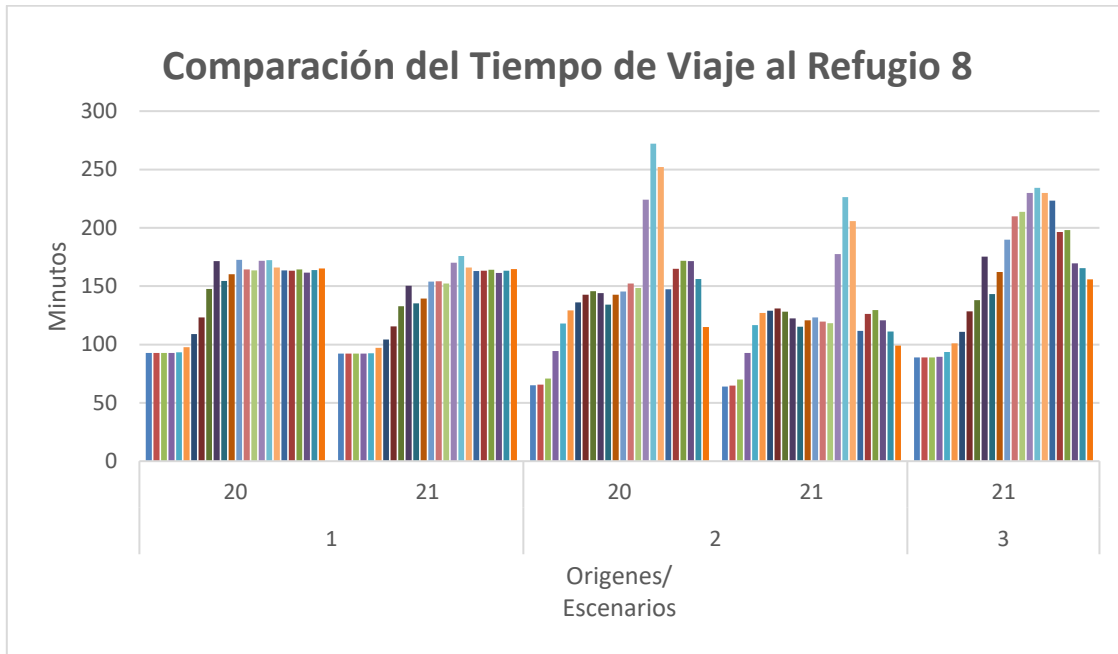
Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

**Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 7**

Periodo	Ruta 5	Ruta 7
	14 a 7	16 a 7
1	58.11	55.89
2	58.32	55.9
3	59.44	56
4	59.98	56.45
5	69.27	60.77

Periodo	Ruta 5	Ruta 7
	14 a 7	16 a 7
6	84.4	68.3
7	105.12	78.03
8	141.13	93.83
9	168.53	103.95
10	164.35	122.26
11	161.43	105.69
12	166.08	115.98
13	189.79	125.17
14	208.52	128.55
15	195.81	136.42
16	210.02	151.93
17	212.29	158.67
18	203.08	140.35
19	187.74	134.28
20	169.62	132.43
21	153.61	126.41
22	135.3	114.04
23	131.48	112.57
24	129.54	109.63

**Fuente.** Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

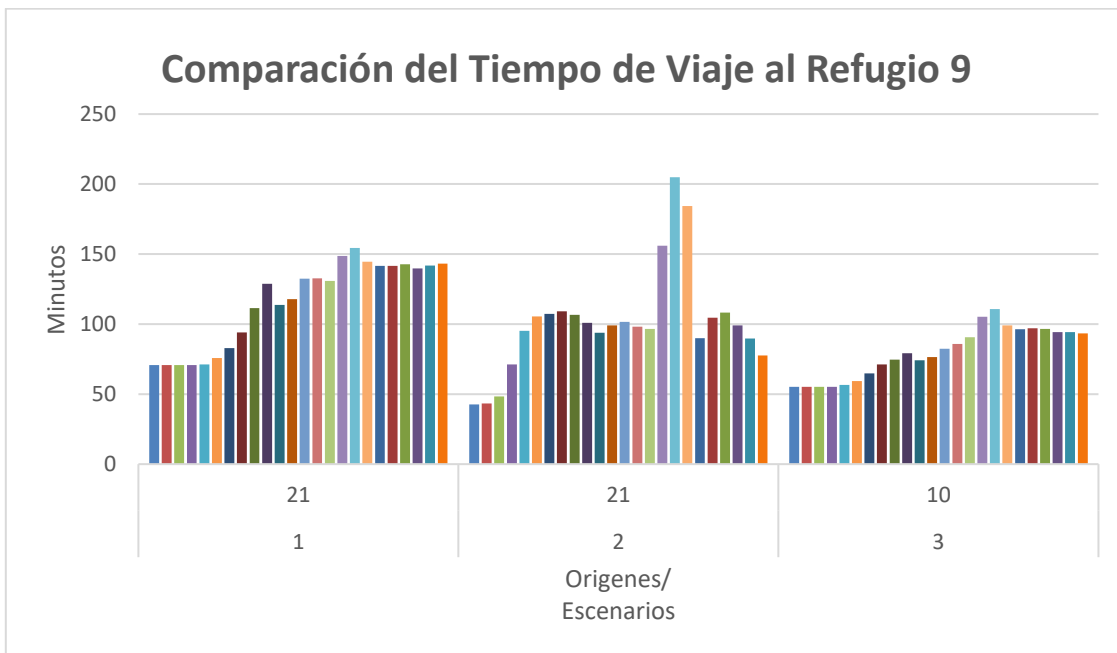
Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 8

Periodo	Ruta 12
	21 a 8
1	88.87
2	88.87
3	88.89
4	89.42
5	93.61
6	101.03
7	110.87
8	128.45
9	138.01
10	175.22
11	143.11
12	162.08
13	189.86
14	209.99
15	213.81
16	229.92
17	234.24



Periodo	Ruta 12
	21 a 8
18	229.86
19	223.41
20	196.41
21	197.94
22	169.45
23	165.31
24	155.91

Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube



Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube

**Resultados del tiempo de evacuación del escenario 3 para el destino 9**

Periodo	Ruta 1
	10 a 9
1	55.17
2	55.17
3	55.17

<b>Periodo</b>	<b>Ruta 1</b>
	<b>10 a 9</b>
4	55.21
5	56.55
6	59.32
7	64.76
8	71.11
9	74.56
10	79.23
11	74.21
12	76.52
13	82.44
14	85.81
15	90.6
16	105.24
17	110.84
18	99.09
19	96.4
20	97.01
21	96.67
22	94.25
23	94.32
24	93.42

**Fuente. Elaboración propia, realizada con datos obtenidos del reporte de resultados del software Cube**