

# MODELOS DE EVACUACIÓN DE PERSONAS EN CASO DE HURACANES

## MODELS OF EVACUATION OF PEOPLE IN CASE OF HURRICANES

José Luis López Cervantes<sup>9</sup>, Javier García Gutiérrez<sup>10</sup>, Óscar Cruz Castro<sup>11</sup>

### RESUMEN

Dentro del estudio de la Logística Humanitaria, el tema de evacuación de personas en caso de huracanes ha sido presentado bajo diferentes enfoques, la mayoría de ellos considerando una componente estática y uniforme en el comportamiento de las personas, así como capacidad constante en los arcos de una red de evacuación que sirven para aliviar dicho evento. El avance en la teoría del comportamiento de los individuos ante situaciones de desastre, así como el crecimiento en el uso de modelos que consideran explícitamente la periodicidad de ciertas condiciones prevalecientes en las redes de movilidad, tales como variabilidad en las capacidades así como reducción y rompimiento de la conectividad de la red, permiten hoy en día el diseño más realista de los planes de evacuación dentro de un marco de planeación en función de distintos escenarios de ocurrencia de los huracanes y sus distintas magnitudes probables. En este trabajo se realiza una revisión de la literatura respecto a los modelos de evacuación de personas en caso de huracanes de acuerdo con los diferentes enfoques, características principales y objetivos.

**Palabras clave:** Logística Humanitaria, Modelos de evacuación, Planes de evacuación.

### ABSTRACT

Within the study of Humanitarian Logistics, the issue of evacuation of people in the event of hurricanes has been presented under different approaches, most of them considering a static and uniform component in the behavior of people, as well as constant capacity in the arcs of an evacuation network that serves to alleviate said event. The advance in the theory of the behavior of the individuals before disaster situations, as well as the growth in the use of models that explicitly consider the periodicity of certain prevailing conditions in the mobility networks, such as variability in the capacities as well as reduction and breaking of the connectivity of the network, allow today the most realistic design of evacuation plans within a planning framework based on different scenarios of occurrence of hurricanes and their different probable magnitudes. In this paper a review of the literature regarding the models of evacuation of people in the event of hurricanes is made according to the different approaches, main characteristics and objectives.

**Keywords:** Humanitarian Logistics, Evacuation models, Evacuation plans.

Recibido: 30 de Agosto de 2018

Aceptado: 20 de Septiembre de 2018

Publicado: 31 de Mayo de 2019

---

<sup>9</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería

<sup>10</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería. José Luis López Cervantes: <https://orcid.org/0000-0003-2385-4247>

<sup>11</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha modificado la intensidad y frecuencia de fenómenos naturales, en el caso de eventos hidrometeorológicos en particular los 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, cuando no se cuenta o se aplica de forma eficiente un plan ante este tipo de emergencia.

Entre los factores que aumentan el riesgo frente a un huracán se encuentran el desarrollo desordenado, rápido crecimiento urbano y altos niveles de pobreza, aumentando la vulnerabilidad de la población, por lo que en caso de ocurrir un huracán de considerable magnitud se requiere tener una planeación estratégica para la evacuación de la población utilizando los recursos tecnológicos al alcance.

Uno de los temas de la planeación estratégica pos-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 y las condiciones cambiantes de tránsito de las vialidades que generalmente no cuentan con la capacidad para una rápida evacuación, por lo que se requiere de estrategias para distribuir el flujo de la población y reducir los tiempos de evacuación.

La evacuación de personas ante el riesgo de un huracán debe ser el resultado de un proceso de planificación respondiendo íntegramente al objetivo de evitar pérdidas humanas.

En el proceso de evacuación de personas existen factores que modifican la dinámica del comportamiento de las personas. 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 carretera.

En el caso específico del traslado de personas hacia los lugares seguros el éxito de la evacuación depende de varios factores, como la

hora del día, clima, tiempo de respuesta, rutas de evacuación, condiciones del flujo de tránsito, controles de tránsito, entre otros. Las decisiones tomadas para el manejo de la infraestructura vial disponible y el control de tránsito son cruciales para evitar graves congestionamientos que aumenten el riesgo por no ubicar a la población en los albergues y zonas seguras.

Los modelos de evacuación de personas en escenarios de huracanes tienen el fin de determinar las condiciones de flujo y capacidad de las vialidades e intersecciones para que las decisiones tomadas por las autoridades sean las mejores en la planificación estratégica en caso de huracanes de magnitudes considerables.

## LOGÍSTICA HUMANITARIA

La logística humanitaria se define como el proceso de planeación, implementación y control efectivo y eficiente de los flujos de productos, materiales e información desde los donadores —individuos y organizaciones— hasta las personas afectadas con el fin de atender sus necesidades de supervivencia. La aplicación de conocimientos y habilidades, más la movilización de personas y recursos, es esencial para atender rápida y efectivamente a la población afectada.

Desafortunadamente, las operaciones de logística humanitaria son altamente complejas, ya que se requiere responder de inmediato a situaciones no predecibles en términos de qué se demanda, cuánto, cuándo, dónde y cómo se podría distribuir la ayuda, lo que implica tener una alta flexibilidad.

Las etapas identificadas para las operaciones de ayuda ante un desastre son: preparación, respuesta inmediata luego del desastre y reconstrucción. Las actividades de estas fases se traslapan entre sí y todas requieren de soporte logístico si bien la cantidad y variedad de los suministros requeridos varían con cada etapa.

Para la primera fase, la preparación no se refiere a prever la ocurrencia del siniestro, sino a

desarrollar la capacidad de responder ante el desastre de tal manera que su efecto se abata y se faciliten las operaciones de asistencia. Si bien resulta difícil “prepararse” para un desastre, hay zonas más propensas a ellos que pueden lograr mejores resultados al implementar una estrategia de prevención que al distribuir ayuda una vez que ha ocurrido el desastre.

La estrategia de preparación incluye cinco elementos críticos:

1) Despliegue de recursos humanos. Selección y capacitación de las personas que se harán cargo de planear, coordinar e intervenir en caso de desastre.

2) Administración del conocimiento. Almacenar, codificar y utilizar la información sobre eventos anteriores para mejorar las estrategias de prevención y ayuda.

3) Administración de operaciones. Se relaciona directamente con las actividades de logística, ya que considera tópicos como la definición de los centros de acopio donde se concentrarán los bienes, la especificación de los sitios más adecuados para ubicar albergues, así como el diseño de las rutas de distribución de los recursos de apoyo y de las rutas de evacuación bajo varios escenarios.

4) Recursos financieros. Asignación de recursos monetarios para desplegar las operaciones de ayuda.

5) Colaboración. Definir acuerdos sobre cómo distintos actores (gobierno, instituciones privadas, ONGS y la comunidad) se coordinarán en caso de siniestro. También aquí hay que considerar la instrucción de la población en cuanto a qué hacer en caso de un evento (Gaytán, et al., 2010).

## **EVACUACIÓN EN CASO DE HURACANES**

El peligro que presentan los huracanes a un determinado país 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 de resistir las fuerzas de un evento peligroso, el grado en que la comunidad posee los medios para organizarse y está preparada para manejar las emergencias, el grado al que la economía del país depende de un sólo producto o servicio que fácilmente puede ser afectado por el desastre, y el 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. Tiempo o clima adverso, con sus alcances y limitaciones, permiten pronosticar 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 aun en plazos cortos, la vulnerabilidad se puede reducir si se disminuye la exposición (movilizando 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 del transporte en las áreas afectadas, 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 entrega de ayuda a los damnificados se vuelve complicado de realizar estas tareas. Por lo tanto, evacuar al máximo número de personas antes de un huracán es de extrema importancia y llega a ser uno de los objetivos primarios para las autoridades (Swamy et al., 2017).

En pasadas décadas ha habido numerosos esfuerzos en la aplicación de métodos que evalúen el tránsito en los planes de evacuación y desarrollo de eficientes estrategias para administrar el tránsito en una evacuación. Entre los criterios de entrada de estos análisis están los valores de la capacidad del camino. Este dato limita los flujos de salida durante la evacuación y afecta las operaciones de tráfico, y forma congestiones en los modelos macroscópicos de red estáticos y mesoscópicos dinámicos. Los valores de capacidad para los planes de evacuación se basan en el manual de capacidad de carreteras (HCM) 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 que prevalecen. Los 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.

Recientemente, sin embargo, una serie de estudios observacionales empíricos de las condiciones del flujo de tránsito de evacuación de personas ha sugerido que las características del flujo de tránsito durante las evacuaciones pueden ser fundamentalmente diferente de las

experimentadas durante períodos pico y eventos especiales de rutina (Wolshon et al., 2008). 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 ya que el flujo de entrada es suficiente para saturar la ruta de evacuación (Dixit et al., 2014).

## MODELOS DE EVACUACIÓN

En las evacuaciones masivas donde la población amenazada en caso de un huracán de gran intensidad y tiene que ubicarse en lugares seguros, la evacuación se realiza por combinación del uso de vehículos particulares y de transporte público. Las evacuaciones de personas involucran la gestión del flujo de tránsito más que el ruteo cuando es en vehículos particulares, en el caso de evacuaciones por transporte público involucra recoger a las personas en lugares específicos y llevarlos a los refugios, en este caso surgen problemas referentes a la capacidad del vehículo y al ruteo. 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 Sostenible para el modelado.

En el caso de los modelos que consideran vehículos capacitados 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.

Shahabi y Wilson (2018) proponen una solución para la selección de la ruta más corta basado 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.

### **ENFOQUE DE LOS MODELOS DINÁMICOS**

En 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 tiempos que indican el tiempo del vehículo en atravesar un arco.

Flujo de Red Dinámico espacio-tiempo (FRD-ET). En este modelo donde 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  $(N^2T^2)$  relacionar las variables enteras del vehículo donde  $T$  es la longitud del horizonte de planeación y  $N$  es el número de nodos en la red.

FRD red excluyendo espacio-tiempo. En los modelos FRD donde el tiempo de viaje está integrado en ecuaciones como demoras, el número de vehículos relacionados con variables enteras se reduce a  $(TN^2)$ . En todos los tipos de modelos FRD, una vez que el modelo FRD entero mixto sea resuelto, una etapa pos-proceso es activada, en esta etapa, las rutas de vehículos son construidas los vehículos y del flujo de información de las mercancías.

### **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 Transporte Público (TP), 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.

Los modelos TP optimizan las rutas de los autobuses 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 TP 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.

Modelos de gestión de flujo de tránsito; Evacuación de Automóviles (EA). Modelos de transmisión de celda (MTC). MTC divide el tránsito automotriz en una red cuadrículada y controla el avance del flujo del tránsito sobre celdas adyacentes. Estos modelos se obtienen al transformar ecuaciones diferenciales del flujo del tráfico en simples ecuaciones diferenciales resultando en un modelo de programación lineal. 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. Investigadores 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 (minimizar 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.

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

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. 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 (Bayram, 2016).

Los modelos de ubicación-asignación se han utilizado en Kongsomsaksakul et al., (2005) para el problema de la planeación en caso de evacuación, minimiza el tiempo total para evacuar en la red de acuerdo con el número y localización de los albergues, asegurando la elección de los albergues con variables binarias, las restricciones son: la capacidad de los albergues, la demanda total desde el origen  $i$  a los albergues  $j$  no supere la capacidad de los albergues y la capacidad máxima del arco. Para minimizar el tiempo de evacuación y tiempo total de viaje algunos investigadores han usado Algoritmos Genéticos (AG) para este problema.

#### *B. 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, 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. 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.

#### *C. 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. 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. 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 (Ozdamar y Ertem, 2015).

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 del transporte público 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 eta

La tabla 1 describe las características de los modelos mencionados anteriormente, así como su objetivo.

Tabla 1. Modelos de evacuación masiva

<b>Modelo</b>	<b>Característica</b>	<b>Objetivo</b>
Evacuación de vehículos	Modelos de flujo de red al Costo Mínimo (FRCM) con las limitaciones sobre los arcos del flujo vehicular por hora	Costo mínimo
Evacuación por transporte público	Modelo clásico de ruteo de vehículos	Relacionado al tiempo, costo, flujo, número de evacuados
Modelos de gestión de flujo de tránsito	Grupos múltiples donde unos tienen diferencias sobre otros	Maximizar el flujo de tránsito y minimizar el tiempo de viaje
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
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
Modelo de Programación Entera Mixta	Considera demoras debido a las intersecciones y a los cambios de carril.	Minimiza el tiempo de la red
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
Modelo de enumeración de ruta	Decidir el número de viajes realizados entre el punto de recogida y el albergue	Maximizar el número de evacuados.
Modelo de ruteo de localización	Para una demanda incierta	Minimizar el tiempo total de viaje, tamaño de flota

Fuente: elaboración propia

## CONCLUSIONES

Se identificó una considerable cantidad de modelos de naturaleza dinámica con aplicabilidad a la planificación de las evacuaciones. Dado el comportamiento dinámico de las decisiones en torno a los eventos, así como a la reacción de la gente, es de esperarse que conceptualmente estos enfoques sean los mejores para lograr estrategias de evacuación acordes a la realidad de nuestro país.

## REFERENCIAS

Bayram, V. (2016). Surveys in Operations Research and Management Science Optimization models for large scale network evacuation planning and management.

Dixit, V., Wolshon, B. (2014). Evacuation traffic dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 49, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.10.014>.

Gaytán, J., Arroyo, P., y Enríquez, R. (2010). Logística Humanitaria: planeación y control del producto. *Énfasis Logística*. 08/10/2010. México.

Goerigk, M., Grün, B., y Hebler, P. (2014). Combining bus evacuation with location decisions: A branch-and-price approach. *Transportation Research Procedia*.

ISDR. (2009). Global assessment report on disaster risk reduction: (2009). Report a. Geneva, Switzerland: UNISDR. (International Strategy for Disaster Reduction).

Kongsomsaksakul, S., Yang, C., y Chen, A. (2005). Shelter location-allocation model for flood evacuation planning. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6 (1), 4237–4252.

Li, X., Li, Q., y Claramunt, C. (2018). A time-extended network model for staged evacuation planning. *Safety Science*, 108(October 2016), 225–236.

Ozdamar, L., y Ertem, M.A. (2015). Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics, (July).

Shahabi, K., Wilson, J. (2018). Scalable evacuation routing in a dynamic environment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 29–40.

Swamy, R., Kang, J. E., Batta, R., y Chung, Y. (2017). Hurricane evacuation planning using public transportation. *Socio-Economic Planning Sciences*, 59, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.10.009>.

Wilches-Chaux, G. (1989). Desastres, Ecologismo y Formación Profesional (Popayán, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje).

Wolshon, B., McArdle, B. (2008). Temporospatial Analysis of Hurricane Katrina Regional Evacuation Traffic Patterns, *ASCE Journal of Infrastructure*.

Wolshon, B., McArdle, B., (2009). Temporospatial analysis of Hurricane Katrina regional evacuation traffic patterns. *Journal of Infrastructure Systems* 15 (1), 12–20.