



U

P

T

Propuesta de rutas de evacuación en caso de inundaciones mediante el modelo de transporte

Realizado por:

Carlos Rúa Gómez

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA CON ESPECIALIDAD EN
OPTIMIZACIÓN**

En la

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE TULANCINGO

Abril 2019

Tulancingo de Bravo, Hidalgo

Director de tesis:

Dr. Enrique González Gutierrez

Índice general

1. Introducción	9
2. Antecedentes	14
2.1. Dirección de acción	23
3. Programación Matemática	25
3.1. Programación lineal	25
3.2. El planteamiento general	27
4. Modelo de transporte	30
4.1. Problema de transporte	30
4.2. Antecedentes del problema	31
4.3. Formulación	32
4.4. Propiedades del problema	35
4.5. El modelo de transporte y las rutas de evacuación	36
4.6. Adecuación del modelo para el caso de estudio	38
4.7. Localización y cantidad de habitantes en las zonas de riesgo	40
4.8. Análisis de la solución del modelo	44
4.9. Rutas de evacuación obtenidas	49

4.10. Modelo que considera la localización de nuevos albergues	56
5. Conclusiones	75
A. Código LINGO	82
B. Localización de plantas	84

Índice de figuras

2.1. Ubicación del municipio de Tulancingo de Bravo en la Subsecuente de Metztitlán [36].	15
2.2. Viviendas dañadas por el huracán Dean [36].	17
2.3. Algunos de los fenómenos geológicos son propios de la superficie terrestre y son debidos esencialmente a la acción del intemperismo y la fuerza de gravedad [36].	21
2.4. Albergues temporales [40].	23
2.5. Drenaje en la región [25].	24
3.1. Clasificación de los modelos de programación matemática.	26
3.2. Representación gráfica del Problema de PL (P).	29
4.1. Problema del transporte.	31
4.2. Distribución desde los almacenes i hacia los centros de consumo j . . .	33
4.3. Distribución geográfica de las zonas de riesgo y los albergues.	42
4.4. Asignación de la zona $i = 1$ hacia $j = 1, 8$, y 9	51
4.5. Jardines del sur 4ta Sección, ruta hacia Miguel Hidalgo.	53
4.6. Jardines del sur 4ta Sección, ruta hacia ETAC.	54
4.7. Jardines del sur 4ta Sección, ruta hacia Jorge Berganza.	56

4.8. Asignación de la zona $i = 2$ hacia $j = 4, 8,$ y $11.$	57
4.9. Ruta de evacuación hacia el Club de Leones.	58
4.10. Ruta de evacuación hacia la Universidad ETAC.	60
4.11. Ruta de evacuación hacia la Catedral.	63
4.12. Asignación de la zona $i = 3$ hacia $j = 2, 7, 9$ y $10.$	64
4.13. Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 7.$	65
4.14. Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 2.$	66
4.15. Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 9.$	67
4.16. Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 10.$	68
4.17. Asignación de la zona $i = 4$ hacia $j = 3, 5, 6$ y $10.$	69
4.18. Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 3.$	70
4.19. Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 5.$	71
4.20. Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 6.$	72
4.21. Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 10.$	73
4.22. Capacidad de los albergues, punto de equilibrio cuando se evacua el 78.26 % de la población.	74

Resumen

El crecimiento de la sociedad en Tulancingo de Bravo Hidalgo aunado a el deterioro gradual del medio ambiente, han incrementado el riesgo de ocurrencia de desastres naturales; el objetivo de la investigación que este artículo documenta, fue diseñar un plan de evacuación de la población en caso de inundaciones que incluye: I. La apertura de albergues temporales II. La asignación de la población de las zonas de riesgo a dichos albergues utilizando rutas más cortas, empleando sistemas de información geográfica y software especializado en la simulación de escenarios para la ciudad de Tulancingo de Bravo Hidalgo.

El proceso general de distribución se organiza en niveles que se suceden entre las zonas de riesgo y los refugios temporales. Este modelo sólo es de un escalón y podemos ver claramente unidades de origen–destino, entre un origen y varios destinos, con transporte directo. La programación de la distribución de los damnificados se realiza en cada unidad, utilizando programación lineal, considerando la formulación limitada e ilimitada de transporte y capacidad de los refugios temporales. Para validar el modelo se han utilizado los datos proporcionados por INEGI, protección civil e investigación de campo.

Las soluciones generadas de esta investigación representan opciones para mejoras al plan de evacuación implementado por las autoridades durante la inundación en el

año 2007 por causa del huracán “Dean”.

Palabras claves: Modelos de optimización transporte, Distribución de damnificados, Programación lineal.

Abstract

The growth of population of the Tulancingo of Bravo Hidalgo and the gradual deterioration of the environment, have increased the risk of occurrence of natural disasters. The objective of this research is the design of an evacuation plan of the population in case of floods, including: I. Opening of temporary shelters II. Allocation of the population of the risk areas to these shelters by the shortest routes. The simulation of scenarios for the city of Tulancingo de Bravo Hidalgo was done by using geographic information systems and specialized software. The general distribution process is organized at levels that occur between risk areas and temporary shelters in the City of Tulancingo de Bravo Hidalgo. This model is only of a scale and we can clearly see units of origin-destination, between a source and several destinations, with direct transport. The programming of the distribution of the victims is carried out in each unit, using linear programming, considering in the limited and unlimited formulation of transport and capacity of temporary shelters. To validate the model, the data provided by INEGI, civil protection and field research carried out by the author have been used.

The solutions generated from this research represent options for improvements to the evacuation plan implemented by the authorities during the 2007 flooding caused by Hurricane Dean.

Keywords: Transport Optimization Models, Victims Distribution, Linear Programming.

Capítulo 1

Introducción

Los titulares internacionales en los últimos años relacionados con accidentes tales como desastres naturales, eventos de salud pública y eventos sociales abruptos, ocurren en un periodo de tiempo corto y siempre causan serios daños a la sociedad. Todos ellos se caracterizan por ser imprevistos, con incertidumbre y han sido un gran reto para el desarrollo sostenible de la sociedad humana.

En años recientes, con frecuencia ocurren desastres naturales, por lo que los países de todo el mundo han recurrido a la investigación de operaciones para estar preparados en casos de emergencias.

Estos desastres representan altos costos e interrupciones funcionales para las sociedades y las economías [27]. En los últimos años se han presentado diversos desastres naturales con consecuencias catastróficas para la población afectada. Entre ellos podemos mencionar los terremotos en Haití y en Chile en 2010, donde dichos países se vieron sumamente afectados y requirieron de la ayuda oportuna de todo el mundo. Otro ejemplo es el tsunami ocurrido en la costa de Japón en 2011, donde gran parte de la región afectada fue devastada [2].

Una de las principales amenazas para los sistemas costeros y las zonas bajas de todo el mundo es el incremento de los eventos de inundación debido a los efectos del cambio climático, fundamentalmente por el aumento de inundaciones costeras. En [38] se presenta una metodología de análisis del impacto de inundación costera; se estudia un modelo digital de la superficie, a través de escenarios que combinan proyecciones locales de aumento del nivel medio del mar, combinadas con eventos extremos, la metodología propuesta se ha aplicado en la costa de Asturias (España).

Podemos mencionar que debido a que los ríos se inundan anualmente, la mayoría de las investigaciones sobre inundaciones se han centrado en la gestión de los ríos. Los investigadores han ignorado en gran medida el potencial de recursos de las inundaciones repentinas, ya que son menos predecibles.

En 1963, Cooper [27] presentó un método para decidir dónde localizar instalaciones para responder a emergencias, asignar óptimamente la demanda de ayuda desde dichas instalaciones y utilizar de manera efectiva los recursos. Recientemente se han planteado modelos de mayor complejidad como el propuesto por Balcik y Beamon (2008), el cual es una variación del modelo de máxima cobertura que integra las decisiones de dónde ubicar los almacenes y la cantidad de inventario a mantener en ellos. Además, el modelo considera múltiples productos, restricciones de capacidad y presupuesto. Los autores plantean el modelo considerando que algunas organizaciones optan por una estrategia de ubicar sus almacenes en algunos países para atender las emergencias que se presentan en diversas partes del mundo.

En [41], el posicionamiento previo de suministros para desastres se modela como el problema de ubicación de instalaciones que considera la ruta de los vehículos y posibles interrupciones en la red de transporte. El método utiliza una combinación de la vía más confiable y un modelo de programación entera para encontrar la localización óptima de los suministros en centros de distribución. La programación de

la distribución se encarga de optimizar la asignación de las tareas a realizar (en este caso la transportación de damnificados) a los recursos disponibles (vehículos).

Concretamente, el análisis de la distribución física de los damnificados tiene como objetivo optimizar el flujo de los mismos desde la zona de riesgo hasta los refugios temporales sin sobrepasar la capacidad de dichos refugios temporales. En [24] se presentan los algoritmos comúnmente utilizados (exactos y heurísticos) desarrollados a problemas de ruteo de vehículos; también se presenta una clasificación de problemas de ruteo en donde se consideran los costos de almacenaje, además, se presenta el estado del arte del software disponible para el estudio global de cadenas de suministros lógicas así como sus limitaciones.

De acuerdo con el glosario internacional de hidrología [34], la definición oficial de *inundación* es: “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”. En este caso, “nivel normal” se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, inundación es una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas. Por otra parte, *avenida* se define como: “Una elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un río o arroyo hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad” [34]. Estos incrementos y disminuciones, representan el comportamiento del escurrimiento en un río.

En este trabajo se propone una solución a un problema de modelo de transporte mediante la Programación Matemática no abarcando con ello, a la extensión de las otras etapas del problema de localización de instalaciones, ni la integración a un sistema más completo. El modelo que se presenta en este estudio minimizará el número de viajes que se realizan y las rutas a seguir en caso de una inundación en la región de Tulancingo de Bravo Hidalgo. Comúnmente se han considerado como un caso particular de los problemas lineales los problemas de transporte y de asignación.

A lo largo del trabajo se observará que el modelo pertenece a problemas de programación entera, dado que las variables que aparecen en estos problemas son variables que han de tomar valores enteros.

Con los resultados obtenidos de la investigación se espera obtener un instrumento que coadyuve a la toma de decisiones en el diseño de una red de distribución con, la característica de uno o dos escalones, ubicación, apertura o cierre de albergues temporales (destinos), aunado con las legislaciones de protección civil y la satisfacción de la demanda a costo mínimo.

Esto tendrá un impacto social que incrementará la posibilidad de tomar importantes decisiones, en términos de los objetivos planteados, ordenará y coordinará los componentes y sus relaciones dentro de los parámetros de protección civil, mejorará e incrementará el control del sistema, logrará que los sistemas operen con costos más bajos, interacciones más fluidas, menos cuellos de botella y mayor coordinación entre elementos del sistema.

En el Capítulo 2 incluimos los antecedentes de las inundaciones que han ocurrido en la Región de Tulancingo así como en sus alrededores, además de las fechas y los nombres de estos fenómenos atmosféricos desde hace 19 años. Una breve explicación de sus mantos acuíferos de las regiones antes mencionadas así como el cauce de sus ríos más importantes, al igual que los albergues temporales que gracias a la evolución de los programas de protección civil de la República Mexicana y la dirección de acción de estos mismos incluso.

El Capítulo 3 se dedica a la explicación de la programación matemática; cómo se debe aplicar según sea el caso de estudio, su planteamiento general y los tres tipos de programación entera que son pura, mixta y binaria.

En el Capítulo 4 se proporciona un panorama general del problema del transporte, se incluyen los aspectos que consideran al modelo de transporte como un

modelo que se utilizará en el trabajo, en donde las unidades a transportar, serán los damnificados potenciales. Finalmente, en el Capítulo 5, incluye las conclusiones así como la interpretación de los resultados con gráficos representativos para la mejor comprensión.

Capítulo 2

Antecedentes

Las inundaciones de las regiones cercanas a ríos originan uno de los desastres naturales con mayores pérdidas humanas y materiales. El desbordamiento de las aguas que conduce el cauce del río se debe a la imposibilidad de que fluyan grandes escurrimientos a través de éste.

Considerando los antecedentes de México como nación vulnerable ante los desastres, y en gran cantidad a los de tipo hidrometeorológicos, es evidente la necesidad de realizar una mejora en la plantación logística previa a la respuesta que se dará en el momento del desastre, buscando reducir el impacto que ésta genera en la población.

Estos fenómenos naturales que suelen abarcar amplias extensiones de terreno provocan graves trastornos a las comunidades, como podemos observar en la Figura 2.1, los litorales en color azul, las montañas y los estados colindantes entre ellos, y se citan las afectaciones delimitadas con líneas rojas.

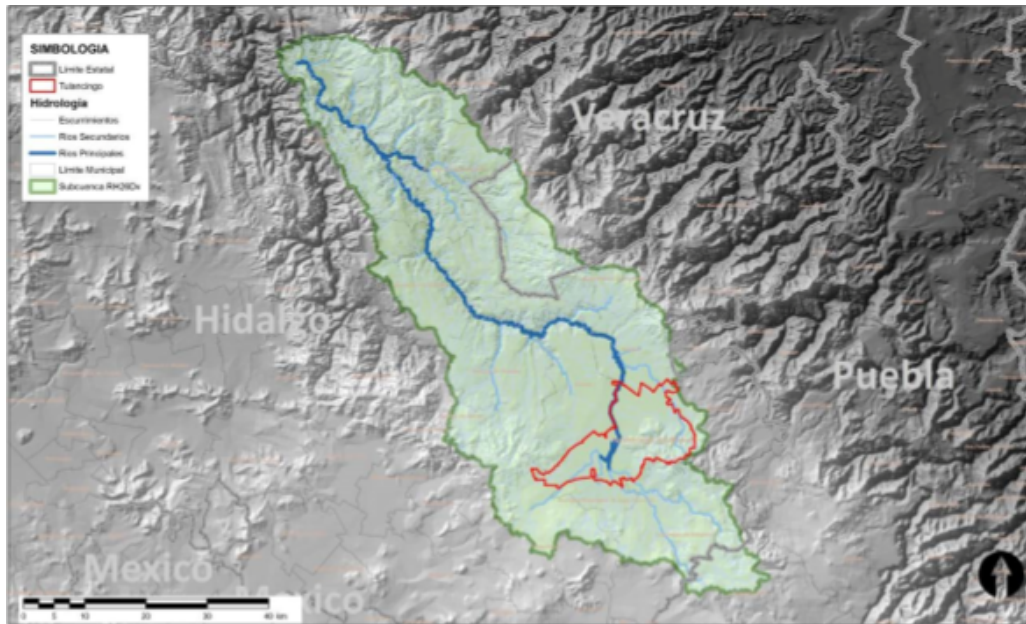


Figura 2.1: Ubicación del municipio de Tulancingo de Bravo en la Subcuenca de Metztitlán [36].

A continuación, presentamos un resumen de los principales eventos climatológicos que se han suscitado en la región [37]:

- 1999: Dentro de los eventos de tipo hidrometeorológico que han afectado al Estado de Hidalgo, en el mes de octubre se registra el desarrollo e impacto de una depresión tropical al sur del Golfo de México, pronosticándose un potencial de lluvias para el Estado de Hidalgo entre 70 y 220 mm; bajo esta situación se vieron afectados 37 municipios del Estado, los cuales sufrieron daños en vías de comunicación, servicios básicos y estructuras de diversos inmuebles.
- 2001: Se registran en 43 municipios de la entidad diferentes eventos, tales como, temperaturas extremas, tormentas de granizo, vientos excesivos, inundaciones, lluvias torrenciales y tormentas eléctricas, dejando a su paso 3 defunciones, 13

personas lesionadas, 9164 damnificados, afectación a infraestructura escolar y de comunicaciones; canalizando a 95 personas a diferentes refugios temporales.

- 2002: En 43 municipios del Estado, se registraron diferentes tipos de fenómenos hidrometeorológicos, los cuales dejaron 4 defunciones, 3 lesionados, 2850 damnificados, la afectación de 5 viviendas totalmente destruidas, 670 viviendas siniestradas parcialmente, 222 personas canalizadas a refugios temporales, además de la destrucción de caminos y la afectación a diferentes inmuebles.
- 2003: En este año se registran en 33 fenómenos de precipitación fluvial que ocasionó la defunción de 5 personas, 2 lesionados, 5629 damnificados, 1430 viviendas afectadas parcialmente, 4 viviendas afectadas totalmente y interrupción de los servicios.
- 2004: En este año se vieron afectados 30 municipios del Estado, debido a tormentas eléctricas, lluvias e inundaciones las cuales afectaron a 5846 personas, 3 defunciones, 3 lesionados, 255 personas evacuadas, 1024 viviendas afectadas parcialmente y las consecuentes afectaciones a vías de comunicación e infraestructura urbana.
- 2005: En este año se vieron afectados 44 municipios por el Huracán Stan dejando a su paso 3 defunciones, 16 lesionados, 4327 damnificados, 1150 viviendas afectadas parcialmente y 7 viviendas afectadas totalmente, también hubo afectaciones generales a infraestructura urbana, de comunicaciones y escolar.
- 2006: En este año se registran afectaciones considerables a 10 municipios de la entidad registrándose 144 viviendas afectadas parcialmente, 50 familias canalizadas a refugios temporales, daños leves y severos en vías de comunicación, inmuebles escolares y servicios básicos.

- 2007: En este año se registran las depresiones tropicales Dean y Lorenzo, en los meses de Agosto y Septiembre, respectivamente, los cuales afectaron a 35 municipios de forma inmediata, y otros 25 con daños en vías de comunicación, pérdidas materiales de gran consideración, viviendas, infraestructura escolar y urbana; 65 mil personas fueron afectadas, de ellas, se evacuaron 10 mil y 2500 fueron canalizadas a 45 refugios temporales habilitados a lo largo de la Huasteca, Sierra Alta y Región Otomí-Tepehua.



Figura 2.2: Viviendas dañadas por el huracán Dean [36].

- 2008: Este año se caracterizó por una intensa temporada de lluvias asociadas a ondas tropicales, específicamente, las 9, 10, 11 y 12, registradas entre el 8 y el 13 de julio, ocasionando desbordamientos de ríos, jagüeyes, canales y otros embalses. En general, se registraron 19 decesos por causa directa de las lluvias y sus efectos asociados como derrumbes y rayos, se registraron daños en, aproximadamente, 300 viviendas, 40 locales comerciales de un mercado, así

como daños menores en seis escuelas y otros de leves a mayores en distintas carreteras y caminos estatales, afectando en total 25 municipios de la entidad.

- 2009: Se registraron lluvias estacionales por interacción múltiple de sistemas, así como ondas tropicales, además de granizadas, dichos fenómenos causaron afectaciones en caminos y carreteras de las zonas serranas de la entidad y daños en, alrededor de, 200 viviendas por inundación (entrada de agua y daño en menaje de casa) y techos colapsados por granizadas en 127 inmuebles de condiciones modestas y construcción ligera.
- 2010: Temporal invernal registrado en el mes de febrero con 6 días de lluvia ininterrumpida generando derrumbes y afectaciones en caminos y carreteras de las zonas serranas de la entidad, motivando la emisión de declaratoria de emergencia. De igual forma, en el mes de Julio se registran entre los días 22 y 25 lluvias de rango fuertes a intensas, en los 84 municipios llovió casi ininterrumpidamente, por alrededor de 96 horas, debido a una interacción múltiple de sistemas impactando a la Huasteca Hidalguense, Potosina, Veracruzana y Tamaulipeca, registrando el récord de precipitación de 186.02 mm en el municipio de San Felipe Orizatlán, se registran derrumbes carreteros y 23 comunidades con dificultades de acceso. En el mes de septiembre se forma en el mar Caribe la Tormenta Tropical Karl impactando la Península de Yucatán.
- 2011: El día 8 de Julio de 2011, mediante el boletín No. 227/11 la Secretaría de Gobernación, emite la Declaratoria de Desastre Natural para 54 municipios del Estado de Hidalgo, para la atención de los daños sufridos por la lluvia severa ocurrida el 29 de junio al 1 de julio de 2011, en donde se afectaron principalmente los sectores de infraestructura urbana, salud, educación, hidráulica,

carretera y vivienda, el representante del sector carretero estatal presentó la solicitud de recursos por 17.8 millones de pesos de apoyo parcial inmediato, para limpieza, remoción de escombros y caminos provisionales entre otros.

- 2012: El 21 de Julio, se registra una serie de eventos geológicos a consecuencia de sobre-saturación hídrica y cambio de usos de suelo generándose un deslizamiento de tierra y flujos de lodo en la Comunidad de Santa Teresa, Municipio de Yahualica, Estado de Hidalgo, el evento ocasionó el desalojo de 360 personas de la comunidad, afectando a 148 pobladores de 42 casas, durante el alud de material hacia una vivienda se colapsa y sepulta a una persona de la tercera edad, misma que fue recatada sin vida. En el mes de Agosto sobre la cuenca del Atlántico se forma la Tormenta Tropical “Ernesto”, misma que deja precipitaciones de más de 150 mm sobre la Sierra Alta del estado, afectando los tramos carreteros, principalmente de la Sierra Huasteca.
- 2013: Tormentas puntuales, granizadas, Depresión Tropical No.8, Tormenta Tropical “Barry”, Tormenta Tropical “Fernand”, Huracán Ingrid y Frente Frio No. 4 afectaron cerca de 500 viviendas y 6 puentes, daños en caminos y carreteras, así como infraestructura hidráulica, educativa, urbana y hospitalaria por un monto aproximado de mil ochocientos millones de pesos en 40 municipios del Estado de Hidalgo. Solicitando el Gobierno del Estado la Declaratoria de Desastre Natural para acceder a los recursos del Fondo Nacional de Desastres Naturales.

El deterioro en los ecosistemas genera alteraciones de diferentes tipos, uno de ellos es la capacidad de filtración de los macizos montañosos que alimentan tanto a las aguas subterráneas como al escurrimiento interno para recarga del acuífero, cualquier

pérdida sensible de vegetación o suelo, alterará las condiciones naturales del sistema hídrico, de producción de oxígeno, de calidad del suelo, de contención ante procesos erosivos exógenos, entre otras cosas. Son situaciones que de manera indirecta afectan no solo a la población de Tulancingo, sino a todas las comunidades de la región, concretamente a la población asentada dentro de la subcuenca.

Los procesos endógenos se detectan en grandes estructuras, recordemos que esta subcuenca se encuentra entre dos zonas fisiográficas (Sierra Madre Oriental y Eje Neovolcánico Transversal) y las macroformas que existen (elevaciones y vertientes) corresponden a la combinación de los procesos endógenos y a los procesos exógenos modeladores del relieve, y que los suelos, la vegetación la fauna de la región se encuentran íntimamente ligados a las estructuras geológicas y fisiográficas.

La ruptura de este equilibrio desencadenará procesos principalmente erosivos, en la Figura 2.3 se pueden observar líneas blancas transversales a los escurrimientos, estos lineamientos se originan por fallas detectadas en la zona, que son los principales detonadores de procesos erosivos que pueden afectar directamente a la población de la subcuenca [36].

Ante la presencia de un fenómeno convulsivo, como podemos observar en la Figura 2.3, los Sistemas Nacional, Estatal y Municipal, desarrollarán una cadena de actividades en ciclo a la protección y conservación de la sociedad, sus bienes y el medio físico.



Figura 2.3: Algunos de los fenómenos geológicos son propios de la superficie terrestre y son debidos esencialmente a la acción del intemperismo y la fuerza de gravedad [36].

Dentro de esas actividades, la apertura y operación de *Refugios Temporales* tiene una alta prioridad, ya que brindar alojamiento, abrigo, alimentación, asistencia médica y otros servicios indispensables, es un aspecto mediante el cual la protección civil patentiza su alto sentido humanitario, solidario y sistemático.

Independientemente de la zona, región, e incluso del fenómeno perturbador, la selección y preparación logística de los refugios temporales, es una actividad que ha de realizarse indefectiblemente.

Es importante destacar que los desastres no siempre son producto del azar, como frecuentemente se les considera, los desastres son naturales en el sentido de que son posibles y factibles tanto por las condiciones físico-naturales como de origen humano, y es solo la incertidumbre en el tiempo la que hace eventuales.

De manera más específica, la existencia de los albergues o refugios temporales

está prevista dentro del subprograma de auxilio, y se le ubica en las acciones de protección, salvamento y asistencia: “La asistencia implica desde el restablecimiento de los servicios esenciales, como la energía eléctrica y almacenamiento de medicamentos, víveres, ropa, instalación de puestos de socorro y servicios médicos, hasta la improvisación y establecimientos de albergues o refugios de emergencia”. Las tareas señaladas para ello son: proteger, salvar y asistir a la población afectada rescatándola, ubicándola en campamentos provisionales y controlando damnificados de acuerdo con los planes de organización y la coordinación correspondiente.

Con el progreso de avance de la protección civil en la República Mexicana, algunos conceptos se han transformado, de manera que resulta necesario replantearlos para homogenizar su manejo. En el caso del concepto albergue, la confrontación con la realidad ha dado como resultado su situación por refugio temporal, atendiendo a las expectativas que el mismo nombre ofrecía a la población en un momento dado, es decir, el primer término dejaba a la interpretación de cada persona el tiempo durante el que podían permanecer en él, y en consecuencia al plantear el nuevo nombre se define de inmediato que se trata de una situación temporal, mientras que los sistemas de protección civil avanzan con el restablecimiento y regreso a la normalidad.

1. El mejor refugio que puede encontrarse es el domicilio de familiares y amigos cercanos, alejados de la zona de peligro.
2. Deben mantenerse unidas a las familias
3. Debe cuidarse al máximo posible la intimidad de la familia ubicada en un refugio temporal.
4. Los refugios temporales masivos solo serán utilizados cuando no se disponga de otras alternativas [36].



Figura 2.4: Albergues temporales [40].

2.1. Dirección de acción

Se entiende por inundación aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura (CENAPRED, 2013) [21].

El sistema de drenaje en la región es del tipo dendrítico y las corrientes más importantes que lo forman son los ríos San Lorenzo, Río Chico y el Río Grande de Tulancingo, junto al arroyo Camarones 45, todos estos cuerpos de agua forman parte de la Cuenca Hidrográfica Alta del Río Metztitlán. (CONAGUA, 2002) [25].



Figura 2.5: Drenaje en la región [25].

Dicho lo anterior, contar con un plan de acción de evacuación en donde se contemple el traslado de la población en riesgo hacia los albergues es una tarea primordial que complementa el plan de acción de protección civil, más aún si se cuenta con la distribución óptima que hará que la población sea atendida con los recursos suficientes de espacio, alimento, médicos, entre otros.

En este trabajo se consideraron los albergues ya establecidos en la contingencia ocurrida en el año del 2009 en la región de Tulancingo de Bravo Hidalgo, la capacidad de los mismos, y si estos satisfacen las necesidades de las zonas de riesgo correspondientes [40].

Capítulo 3

Programación Matemática

La programación matemática es un conjunto de teoremas, algoritmos, métodos y técnicas para resolver problemas de optimización. Todo problema de programación matemática consta de una función objetivo a maximizar o minimizar y de un conjunto de restricciones o ecuaciones de condición.

Cuando la función objetivo y todas las restricciones son de tipo lineal estamos en presencia de un problema de programación lineal, que es la forma de programación matemática más desarrollada. Cuando alguna de las restricciones o variables que interviene en un problema de programación lineal (al menos una) es de tipo cuadrático y por más que todas las restantes sigan siendo lineales, el problema sería ya de programación cuadrática y no de programación lineal (véase Figura 3.1).

3.1. Programación lineal

1. Según la naturaleza de los datos, podemos hablar de modelos deterministas o de modelos estocásticos. Consideraremos problemas deterministas a todos aquellos

problemas en donde conocemos con exactitud los datos que intervienen en el modelo, mientras que en otro caso podremos hablar de modelos estocásticos.

2. Según la variable tiempo, si interviene de forma explícita en el modelo, entonces lo consideraremos como un problema dinámico frente a los problemas estáticos, en donde no lo está.
3. Atendiendo a los objetivos del problema, podemos hablar de modelos con objetivo único frente los problemas con objetivos múltiples o multi-objetivos.
4. Según tengan o no restricciones, podemos hablar de problemas restringidos o problemas sin restricciones.
5. Atendiendo a la linealidad de las funciones que intervienen, también podemos clasificar a los modelos en lineales (todas las funciones son lineales) o modelos no lineales.
6. Considerando la continuidad de las variables, también los podemos clasificar como problemas continuos o problemas discretos.

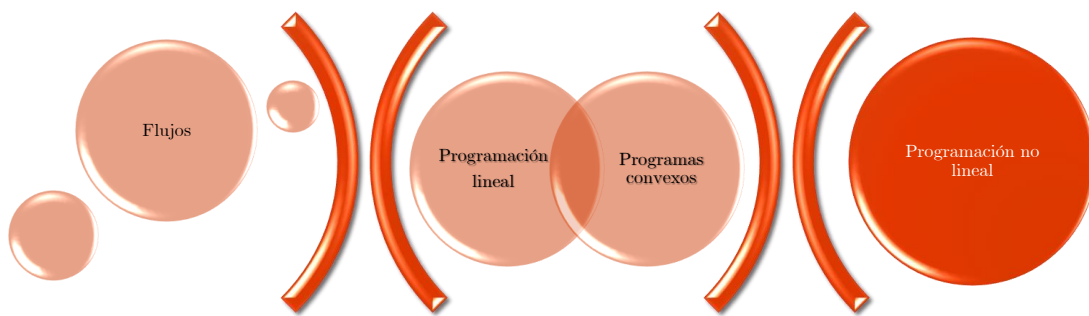


Figura 3.1: Clasificación de los modelos de programación matemática.

3.2. El planteamiento general

La forma general de un problema de programación matemática es la que se muestra a continuación.

$$\begin{array}{ll} \text{Optimizar} & f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{sujeto a:} & g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \\ & g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2 \\ & \vdots \\ & g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m \end{array}$$

En forma abreviada:

$$\begin{array}{ll} \text{Opt} & f(x) \\ \text{s.a} & g(x) \leq b \end{array}$$

donde:

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, \quad b \in \mathbb{R}^m.$$

La función f denominada función objetivo, es una función definida de un dominio de \mathbb{R}^n sobre \mathbb{R} , y representa una descripción matemática del objetivo que se pretende alcanzar con el problema planteado.

El vector $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de variables instrumentales o variables de decisión, que verifican todas y cada una de las restricciones y al mismo tiempo pertenecen al dominio de definición de la función.

Si consideramos funciones lineales, como se ha dicho, entonces $f(x) = c'x$, y para cada $i \in I = \{1, \dots, m\}$, $g_i(x) = a'_i x$, donde (\prime) indica la operación vector transpuesto.

Bajo estas consideraciones tenemos:

$$\begin{array}{ll} \text{Opt} & c'x \\ \text{s.a} & a'_i x \leq b_i \end{array}$$

donde, para toda $i \in I$, tenemos,

$$x \in \mathbb{R}, a_i \in \mathbb{R}^m, c \in \mathbb{R}^n \text{ y } b_i \in \mathbb{R}.$$

Existen tres tipos de modelos de programación lineal en donde el vector x contiene únicamente valores enteros positivos, denominados modelos enteros:

- *Modelo entero puro* (PLE). – Como su nombre lo indica, un problema en el que se exige que todas las variables de decisión tengan valores enteros, $x \in Z^n$.
- *Modelo entero mixto* (PLEM). – Algunas de las variables de decisión tienen valores enteros. Las demás cumplen con la suposición de divisibilidad. (PLEM), $x \in Z^n$, para algunos índices $i \in I$.
- *Modelo binario* (PLB). – Utiliza variables binarias, $x \in \{0, 1\}^n$.

La característica más importante de la PL es que los extremos (máximo o mínimo) siempre están en algún vértice de la región limitada por el conjunto de condiciones para cualquier número de variables.

Para un Problema de Programación Lineal (PPL), gráficamente, la Figura 3.2, ilustra el conjunto factible F , $F = \{x \in \mathbb{R} | a'_i x \geq b_i, i \in I\}$, el vector de costos c y la solución óptima $x^* \in F$ en el sentido de maximización.

$$\begin{array}{ll} (P) & \text{máx} \quad c'x \\ & \text{s. a} \quad a'_i x \geq b_i, \quad i = 1, \dots, m. \end{array}$$

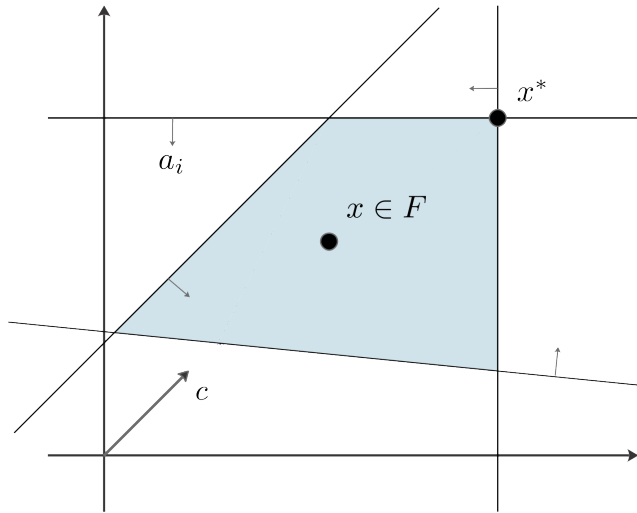


Figura 3.2: Representación gráfica del Problema de PL (P).

Capítulo 4

Modelo de transporte

4.1. Problema de transporte

El modelo de transporte es una de las primeras aplicaciones importantes de la programación lineal. Este modelo tienen por objetivo determinar los costos o distancias mínimos o maximizar los ingresos al enviar suministros desde diversos orígenes hacia los destinos en donde se requieren suministros.

Un modelo de transporte se compone de m orígenes, n destinos, así como unidades que se trasladan desde los orígenes hacia los destinos y los costos de distribución por unidad, véase la Figura 4.1.

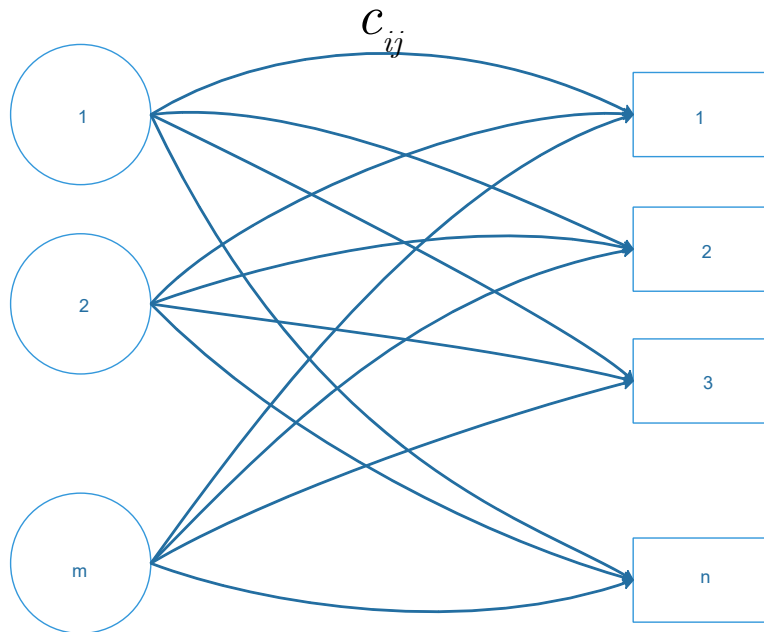


Figura 4.1: Problema del transporte.

Adicionalmente se tienen varios supuestos:

1. Supuesto de requerimientos: Cada origen tiene un suministro fijo de unidades que se deben distribuir por completo entre los destinos.
2. Supuestos de costo: El costo de distribuir unidades de un origen a un destino cualquiera es directamente proporcional al número de unidades distribuidas.
3. Propiedad de soluciones factibles si y sólo si la suma de recursos en los m orígenes es igual a la suma de demandas en los n destinos.

4.2. Antecedentes del problema

En 1781 el matemático francés General del ejército Napoleónico Gaspard Monge describe el problema de la construcción y abastecimiento de fortificaciones militares

de los ejércitos de Napoleón. Para resolver este problema se utilizó el método de “cortar y llenar”, es decir, ir abasteciendo las diferentes trincheras desde los depósitos de material existente.

Hasta 1941 Frank Lauren Hitchcock publica una solución analítica para este problema en su artículo «*The distribution of a product from several sources to numerous localities*», aunque su desarrollo se produce a finales de los años 40, cuando Koopmans realiza su tesis doctoral sobre los problemas de embarque de la marina holandesa.

A partir de ese momento el campo de aplicación del problema de transporte empieza a crecer de una forma muy rápida, no solo en aplicaciones militares, sino también en el campo de la producción, la distribución, las finanzas, entre otros.

4.3. Formulación

Supongamos que se deben transportar cierta cantidad de productos de m orígenes a n destinos. La capacidad de ofertar de cada origen i , con $i = 1, \dots, m$, es a_i ($a_i > 0$), mientras que la demanda de cada destino j , con $j = 1, \dots, n$, es b_j , ($b_j > 0$), el costo de enviar una unidad de producto de origen i al destino j es c_{ij} .

El problema consiste en determinar cuántas unidades de producto deben enviarse desde el origen i al destino j , de forma que se minimice el costo de envío, garantizando la demanda de los destinos y no excediendo la capacidad de los orígenes.

Si denotamos por x_{ij} a las unidades de producto que se envían desde el origen i , al destino j , para $i = 1, \dots, m$ j , para $j = 1, \dots, n$, estas variables de decisión han de ser no negativas y enteras.

La Figura 4.2 ilustra el problema de transporte, donde se ilustran las posibles distribuciones desde los almacenes i , hacia los centros de consumo, en donde se han representado los orígenes y los destinos.

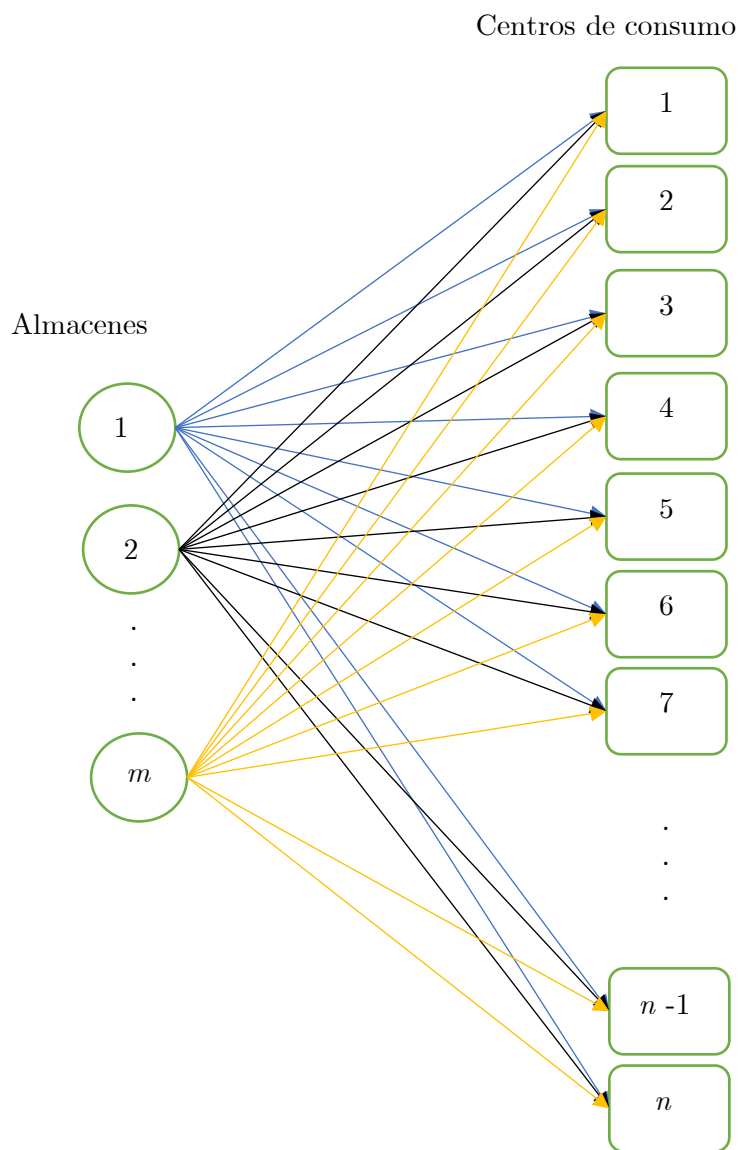


Figura 4.2: Distribución desde los almacenes i hacia los centros de consumo j .

Por lo tanto, el problema se puede plantear analíticamente como:

$$\begin{array}{ll}
 \text{mín} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\
 \text{s.a} & x_{11} + \dots + x_{1n} \leq a_1 \\
 & \phantom{x_{11} + \dots +} x_{21} + \dots + x_{2n} \leq a_2 \\
 & \phantom{x_{11} + \dots +} \phantom{x_{21} + \dots +} \ddots \\
 & \phantom{x_{11} + \dots +} \phantom{x_{21} + \dots +} x_{m1} + \dots + x_{mn} \leq a_m \\
 & x_{11} + \phantom{x_{21} + \dots +} \phantom{x_{m1} + \dots +} x_{21} + \phantom{x_{m1} + \dots +} \phantom{x_{mn}} \geq b_1 \\
 & \phantom{x_{11} + \dots +} x_{1n} + \phantom{x_{21} + \dots +} \phantom{x_{m1} + \dots +} x_{2n} + \phantom{x_{m1} + \dots +} \phantom{x_{mn}} \geq b_n \\
 & x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n
 \end{array}$$

o, en forma abreviada:

$$\begin{array}{ll}
 \min & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\
 \text{s.a} & \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\
 & \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 & x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.
 \end{array}$$

En este problema, el primer conjunto de restricciones ($\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i$) indica que los envíos totales de cada uno de los i orígenes no puede exceder de la cantidad disponible en cada uno de los i almacenes. Por ejemplo, consideremos el origen 3.

$$x_{31} + x_{32} + \dots + x_{3n} \leq a_3,$$

en donde x_{31} representa la cantidad enviada desde el origen 3 hasta el almacén 1, x_{32} es la cantidad enviada desde el origen 3 hasta el almacén 2, y así sucesivamente. El término independiente a_3 representa la cantidad total disponible en el origen 3, la cual, por supuesto, no puede sobrepasarse.

El segundo conjunto de restricciones del problema ($\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j$) está indicando que la cantidad recibida por cada uno de los j destinos no puede ser inferior a la demanda del mismo.

La simple observación de la estructura del problema nos indica que la suma de disponibilidades en los orígenes debe ser mayor (o igual) que la suma de demandas de los destinos, en caso contrario, es decir $\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n b_j$, no se podrán satisfacer todas las demandas.

4.4. Propiedades del problema

De este problema, podemos enunciar una serie de condiciones que garantizan diversas propiedades.

Condición 1: Una condición necesaria y suficiente para que un problema de transporte tenga solución es que la oferta total sea igual a la demanda total, es decir, para cierto $M > 0$:

$$\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^m b_j = M.$$

En el caso que en un problema determinado no se cumpla esta condición, es

decir, la cantidad disponible sea superior a la cantidad demandada entonces podemos incluir un destino ficticio que recoja este exceso. O bien, en caso contrario, cuando la demanda sea superior a la oferta, incluiremos un origen ficticio.

Con esto una solución factible es $x_{ij} = \frac{a_i b_j}{M}$, para todo i, j , ya que $x_{ij} \geq 0$, y se cumplen todas las restricciones.

Condición 2: El problema de transporte tiene una solución factible acotada, si los a_i y b_j lo están.

Condición 3: La matriz A de coeficientes, de orden $m+n$ (filas) y nm (columnas), tiene un rango igual a $n+m-1$.

Condición 4: La matriz A es una matriz *unimodular*, lo que significa, que cualquier sub-matriz cuadrada de A de orden $n+m-1$ tiene un determinante con un valor igual a 0 o a ± 1 .

Esta cuarta condición nos permite garantizar que si los a_i y los b_j son enteros no negativos, los valores de las variables en toda solución factible es básica y entonces, existe por lo menos una solución factible básica óptima que es entera.

Por tanto, a partir de esta condición ya no es necesario introducir la condición de integridad de las variables para obtener una solución óptima entera.

4.5. El modelo de transporte y las rutas de evacuación

Es claro que el modelo de transporte se puede adaptar a diferentes condiciones. El modelo considera orígenes y destinos; en este trabajo, se consideran como orígenes

a las zonas potenciales a estar en riesgo, mientras que los destinos se consideran a los sitios que históricamente han funcionado como albergues o refugios temporales.

Como se ha mencionado, dentro del modelo del problema de transporte se consideran costos de transporte, es por eso que para adaptar el modelo, suponemos que conocemos los costos unitarios de transporte desde cada una de las zonas de riesgo a cada uno de los refugios temporales, además de la oferta y la demanda en cada uno de los éstos y, como consecuencia, se requiere minimizar los costos asociados con el transporte.

Las variables de decisión las denotaremos por x_{ij} , la cual nos indica el número de bienes, en nuestro caso, el número de personas que serán transportadas de la zona de riesgo i al refugio temporal j . Si, además, c_{ij} son los costos por unidad trasladada del origen i al destino j , entonces la función que representa los costos de transporte de todas las unidades se calcula sumando el producto del costo unitario por el número de unidades transportadas desde cada uno de los orígenes a cada uno de los destinos, es decir:

$$\text{mín} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Donde las restricciones asociadas con el modelo son:

- a_i : La cantidad de damnificados en las zonas de riesgo $i = 1, \dots, m$.
- b_j : La cantidad de damnificados que puede albergar el refugios temporal $j = 1, \dots, n$.

Para el modelo matemático suponemos que existe equilibrio entre la oferta y la

demanda, condición que escribimos matemáticamente como:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j.$$

Si éste no es el caso, debemos agregar un origen artificial, el cual va a producir la cantidad de bienes que haga falta para cubrir la demanda faltante, o bien, si es mayor la oferta, se crea un destino artificial que absorba el excedente de la oferta. En ambos casos los costos de transporte asociados con estos orígenes o destinos ficticios es cero.

- Condiciones de no negatividad:

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Finalmente, el modelo de transporte en su forma general se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{s.a} \quad & \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j, \\ & x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.6. Adecuación del modelo para el caso de estudio

Para claridad en la interpretación del modelo (4.1) introduzcamos la siguiente notación, para $i = 1, \dots, m$ y para $j = 1, \dots, n$:

$c_{ij} = \text{CUT}(i, j)$: Costo unitario de transporte para el traslado desde la zona i hasta el albergue j .

$a_i = \text{ND}(i)$: Número de damnificados potenciales en la zona i .

$b_j = \text{CA}(j)$: Capacidad del albergue j .

Para comenzar con el análisis del modelo, es necesario realizar algunas modificaciones en el modelo original (4.1) que a continuación describimos:

1. En nuestro caso debemos considerar

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq \text{ND}(i), i = 1, \dots, m,$$

ya que, en caso contrario, corremos el riesgo de no evacuar adecuadamente a toda la población en riesgo para cada zona i .

2. Por otro lado, debemos considerar

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \text{CA}(j), j = 1, \dots, n$$

puesto que no podemos saturar cada albergue j , para ofrecer una atención digna.

3. Finalmente, en nuestro caso tenemos

$$\sum_{i=1}^m \text{ND}(i) > \sum_{j=1}^n \text{CA}(j),$$

que, de acuerdo a la Condición 1, no tenemos soluciones factibles y tendremos déficit en los albergues, por lo que debemos hacer uso de alguna de las estrategias que se mencionan en la Sección 4.4.

De esta manera el modelo a estudiar está dado por:

$$\begin{aligned}
 \text{mín} \quad & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \text{CUT}(i, j)x_{ij} \\
 \text{s.a} \quad & \sum_{j=1}^n x_{ij} \geq \text{ND}(i), i = 1, 2, \dots, m \\
 & \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \text{CA}(j), j = 1, 2, \dots, n \\
 & x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned}$$

4.7. Localización y cantidad de habitantes en las zonas de riesgo

Los lugares de los refugios temporales y la capacidad de cada uno de ellos se obtuvieron a través de instancias gubernamentales de la región. Para obtener la cantidad de habitantes en cada una de las zonas de riesgo se ocupó la base de datos del INEGI donde se tiene el total de habitantes. Se realizó una estimación del número de habitantes por metro cuadrado en la Ciudad de Tulancingo, puesto que esta información no está disponible en los registros d INEGI por zona; esto se llevó a cabo a través de la siguiente estrategia:

$$\text{Número de habitantes} = \frac{\text{Densidad de la población}}{\text{superficie del área}}.$$

Los datos históricos hacen referencia a cuatro zonas de riesgo, dentro del modelo de PLE están denotados por el índice i , en este caso $i = 1, \dots, 4$.

i	Zonas de riesgo	Población vulnerable
$i = 1$	Jardines del Sur	805
$i = 2$	Rojo Gómez	957
$i = 3$	La Cañada	1105
$i = 4$	Huapalcalco	1273

Tabla 4.1: Ubicación de las zonas de riesgo.

Por otro lado, de acuerdo a la información que se proporcionó, las locaciones que han funcionado como albergues temporales, junto con su capacidad se designan por el índice j , con $j = 1, \dots, 11$, tal como se muestra en las Tablas 4.1 y 4.2. Por otro lado, la Figura 4.3 muestra, geográficamente, las zonas de riesgo y los albergues disponibles.

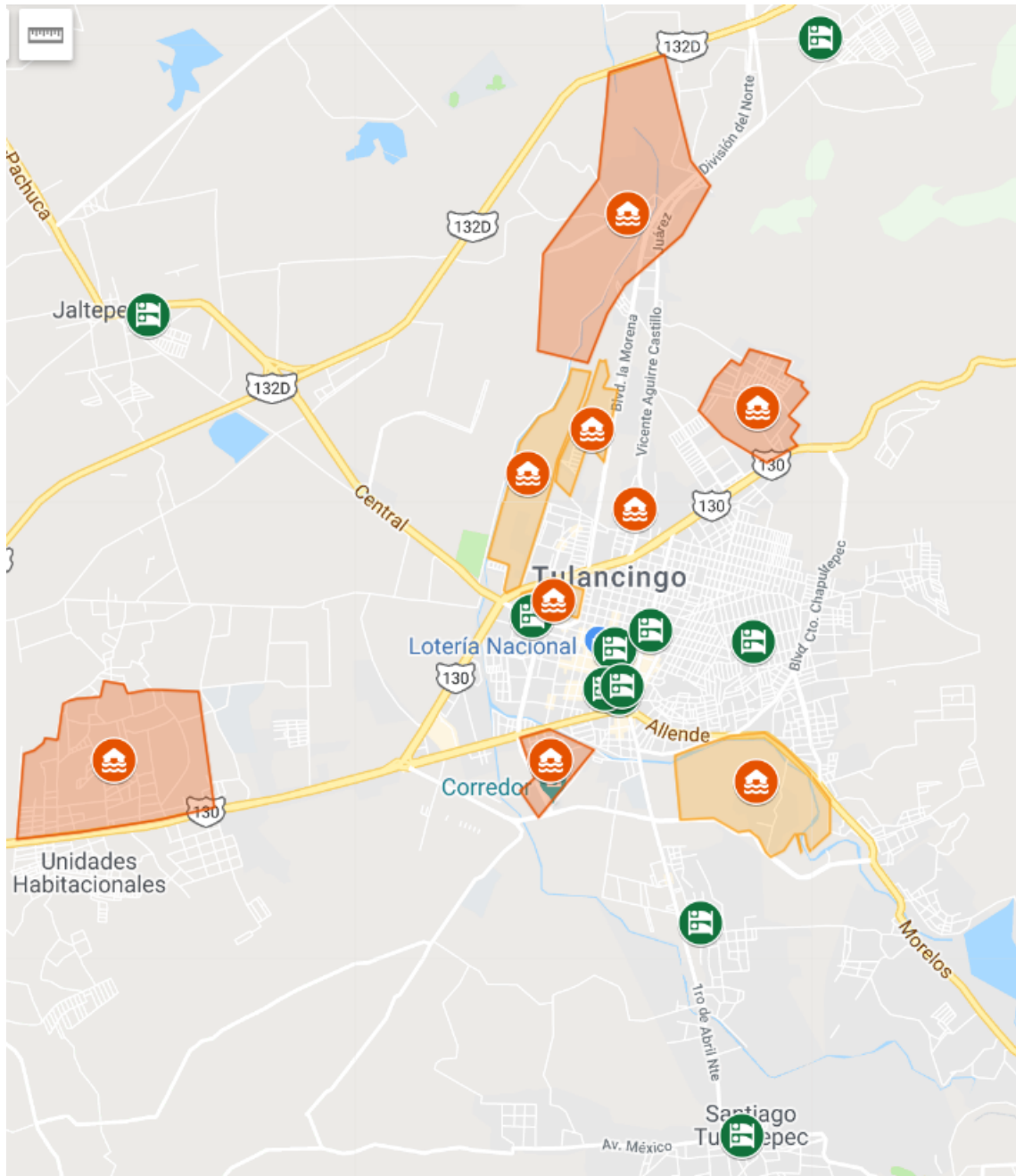


Figura 4.3: Distribución geográfica de las zonas de riesgo y los albergues.

j	Albergues	Capacidad
$j = 1$	Escuela primaria Miguel Hidalgo	400
$j = 2$	Escuela primaria Martín Urrutia	400
$j = 3$	Escuela Secundaria José María Lezama	400
$j = 4$	Club de Leones Tulancingo	250
$j = 5$	Conalep Tulancingo	250
$j = 6$	Escuela primaria Vicente Guerrero	270
$j = 7$	Escuela primaria Lázaro Cárdenas	250
$j = 8$	Universidad ETAC	350
$j = 9$	Escuela Jorge Berganza Campo Alegre	350
$j = 10$	Escuela primaria Guadalupe Victoria	200
$j = 11$	Iglesia Catedral	100

Tabla 4.2: Capacidad de los albergues temporales de la ciudad de Tulancingo de Bravo Hidalgo

El siguiente paso corresponde a la formulación de las restricciones de oferta y demanda (capacidad de los albergues temporales y la cantidad de habitantes por zona de desastres).

Las restricciones de oferta o capacidad de los albergues temporales, así como la cantidad de cantidad de damnificados son del tipo \leq y \geq , respectivamente. Así, cada damnificado de cualquier zona de riesgo puede ser hospedado en cualquier albergue temporal sin sobrepasar la capacidad de dichos albergues.

$$\sum_{j=1}^{11} x_{ij} \geq ND(i), i = 1, 2, 3, 4,$$

donde $ND' = (805, 957, 1105, 1273)$.

Del mismo modo, cada albergue temporal debe de satisfacer la demanda de cada zona de riesgo.

$$\sum_{i=1}^4 x_{ij} \leq CA(j), j = 1, \dots, 11,$$

donde $CA' = (400, 400, 400, 250, 250, 270, 250, 350, 350, 200, 120)$.

La función objetivo, en la cual se relaciona la saturación correspondiente a cada albergue temporal, se define como

$$\sum_{j=1}^{11} \sum_{i=1}^4 c_{ij} x_{ij},$$

donde los costos c_{ij} están dados como se muestra en la Tabla 4.3.

Costo unitario de transporte c_{ij}											
Zona riesgo i	Albergues Temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 15.00	\$ 16.00	\$ 16.00	\$ 21.00	\$ 21.00	\$ 10.00	\$ 9.00	\$ 15.00	\$ 14.00
2	\$ 14.00	\$ 10.00	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 16.00	\$ 20.00	\$ 21.00	\$ 9.00	\$ 12.00	\$ 20.00	\$ 7.00
3	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 16.00	\$ 15.00	\$ 21.00	\$ 21.00	\$ 8.00	\$ 12.00	\$ 10.00	\$ 15.00	\$ 9.00
4	\$ 18.00	\$ 10.00	\$ 12.00	\$ 16.00	\$ 12.00	\$ 10.00	\$ 23.00	\$ 17.00	\$ 21.00	\$ 13.00	\$ 11.00

Tabla 4.3: Costo unitario de transporte de zona de riesgo a un albergue temporal.

El siguiente modelo se utilizó para el análisis del caso de estudio.

$$\begin{aligned}
 (P_1) \quad & \text{mín} && \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{11} \text{CUT}(i, j) x_{ij} \\
 \text{s. a} &&& \sum_{j=1}^{11} x_{ij} \geq \text{ND}(i), i = 1, 2, 3, 4, \\
 &&& \sum_{i=1}^4 x_{ij} \leq \text{CA}(j), j = 1, 2, \dots, 11 \\
 &&& x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, \dots, 11.
 \end{aligned}$$

4.8. Análisis de la solución del modelo

El modelo se resolvió en LINGO 17 y en Excel. El análisis inicia considerando las zonas que, históricamente, han estado en riesgo, como lo muestra el modelo (P_1) . Es evidente que, dada la capacidad de todos los albergues así como el número de habi-

tantes que se encuentran en riesgo, como ya se había mencionado serán insuficientes para poder alojar a toda la población vulnerable. Por otro lado, esto también se ve reflejado una vez que se ha ejecutado la rutina del modelo.

Se procedió por etapas, a continuación se presentan seis escenarios (Tablas 4.3–4.7); primeramente, de las zonas de riesgo, el 100 % es población que se debe desplazar hacia los albergues, de manera consecutiva se fue disminuyendo este porcentaje en 5 % hasta considerar que el 75 % de la población estaba en condiciones de desplazamiento.

- Si el 100 % de la población se considera como damnificada, se observa que los refugios temporales no alcanzan a cubrir dicha demanda, la Tabla 4.4 contiene la información del déficit que se tiene en los refugios temporales. Podemos observar que la capacidad de los albergues temporales sobrepasa su capacidad. Como se había mencionado, bajo la consideración de que el número de damnificados enviado a los refugios temporales disminuye, el déficit deberá de disminuir y eventualmente la demanda será satisfecha.
- Si se evacua al 95 % de la población, Tabla 4.4, observamos que solo se reduce un 5 % la demanda y aún encontramos excedente en un refugio temporal.
- Análogamente, para la evacuación de los porcentajes del 90 % al 80 % de la población, las Tablas 4.5–4.7 muestran aún excedente en los refugios temporales

Sin embargo, al reducir aún más la población de damnificados podemos llegar hasta el punto en donde los albergues temporales puedan satisfacer la demanda.

En el caso de los albergues temporales de la ciudad de Tulancingo de Bravo Hidalgo, se descubrió que la población que se puede atender en los refugios temporales es sólo el 75 % de la población en riesgo. De esta manera, no se tendrán refugios temporales saturados y no se incrementaran los costos en los mismos. Como podemos

observar en la Tabla 4.8 ningún albergue temporal supera su capacidad.

En [42] se hace mención que del 100 % de la población afectada, entre el 20 % y 30 % de los afectados se refugian en casa de familiares o amigos y no recurren a los centros de auxilio (albergues).

Zonas de riesgo i	Albergues temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	400	55	0	0	0	0	0	0	350	0	0
2	0	237	0	250	0	0	0	350	0	0	120
3	0	855	0	0	0	0	250	0	0	0	0
4	0	153	400	0	250	270	0	0	0	200	0
	400	400	400	250	250	270	250	350	350	200	120

Tabla 4.4: Déficit en los refugios temporales cuando se considera que el 100 % de la población está damnificada.

La atención en cuanto a calidad de servicio, se tendrá a partir de un 65 % del total de la población de las zonas de riesgo que es un total de 2691 habitantes y el máximo de capacidad de los albergues temporales es de 3240 damnificados.

La decisión para cerrar estos albergues temporales no solo es por qué disminuyó la cantidad de población damnificada sino también porque el mantenerlos abiertos incrementaría los costos y la distribución del suministro además de incrementar su costo también incrementaría el tiempo para abastecer todos los albergues.

Se cierran más albergues temporales al solo satisfacer la demanda de la mitad de la población como indica la Tabla 4.9.

Zonas de riesgo i	Albergues temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	400	15	0	0	0	0	0	0	350	0	0
2	0	189	0	250	0	0	0	350	0	0	120
3	0	800	0	0	0	0	250	0	0	0	0
4	0	89	400	0	250	270	0	0	0	200	0

Tabla 4.5: Déficit en los refugios temporales el 95% de la población en riesgo se considera damnificada.

Además la Tabla 4.9 muestra que se cierra un albergue temporal más al tener una población total de damnificados de 2070 personas.

La siguiente tabla indica del 100% al 0% de población damnificada por zona de riesgo el total de habitantes y el costo.

Zonas de riesgo i	Albergues temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	400	0	0	0	0	0	0	0	284	0	0
2	0	0	38	250	0	0	0	350	56	0	120
3	0	679	0	0	0	0	250	0	10	0	0
4	0	0	362	0	250	270	0	0	0	200	0

Tabla 4.6: Déficit en los refugios temporales el 90% de la población en riesgo se considera damnificada.

Zonas de riesgo i	Albergues temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	400	0	0	0	0	0	0	2	202	0	0
2	0	0	0	250	0	0	0	348	0	0	120
3	0	265	0	0	0	0	250	0	149	165	0
4	0	0	400	0	250	270	0	0	0	35	0
	400	400	400	250	250	270	250	350	350	200	120

Tabla 4.7: Déficit en los refugios temporales el 85% de la población en riesgo se considera damnificada.

Zonas de riesgo i	Albergues temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	400	0	0	0	0	0	80	44	0	0	0
2	0	0	0	0	182	270	170	0	0	0	0
3	0	0	400	250	68	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	277	350	200	0

Tabla 4.8: Déficit en los refugios temporales el 80% de la población en riesgo se considera damnificada.

Zonas de riesgo i	Albergues temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	362	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	153	250	28	0	0	0	0	0
3	0	0	400	97	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	23	350	200	0

Tabla 4.9: Déficit en los refugios temporales el 75% de la población en riesgo se considera damnificada.

Zona Alto Riesgo i							
Lugar	100 %	95 %	90 %	85 %	80 %	75 %	70 %
Jardines del Sur ($i = 1$)	805	765	725	684	644	604	564
Rojo Gómez ($i = 2$)	957	909	861	813	766	718	670
La Cañada ($i = 3$)	1105	1050	995	939	884	829	774
Hupalcalco ($i = 4$)	1273	1209	1146	1082	1018	955	891
Total de Habitantes	4140	3933	3726	3519	3312	3105	2898
Capacidad total de los Albergues	3240	3240	3240	3240	3240	3240	3240
Sobre población	-900	-693	-486	-279	-72	135	342
Costos	\$41,420.00	\$39,541.00	\$37,687.00	\$35,962.00	\$34,370.00	\$32,841.00	\$31,506.00
Lugar	65 %	60 %	55 %	50 %	45 %	40 %	35 %
Jardines del Sur ($i = 1$)	523	483	443	403	362	322	282
Rojo Gómez ($i = 2$)	622	574	526	479	431	383	335
La Cañada ($i = 3$)	718	663	608	553	497	442	387
Hupalcalco ($i = 4$)	827	764	700	637	573	509	446
Total de Habitantes	2691	2484	2277	2070	1863	1656	1449
Capacidad total de los Albergues	3240	3240	3240	3240	3240	3240	3240
Sobre población	549	756	963	1170	1377	1584	1791
Costos	\$46,243.00	\$42,353.00	\$37,936.00	\$33,560.00	\$29,410.00	\$25,414.00	\$21,516.00
Lugar	30 %	25 %	20 %	15 %	10 %	5 %	
Jardines del Sur ($i = 1$)	242	201	161	121	81	40	
Rojo Gómez ($i = 2$)	287	239	191	144	96	48	
La Cañada ($i = 3$)	332	276	221	166	111	55	
Hupalcalco ($i = 4$)	382	318	255	191	127	64	
Total de Habitantes	1242	1035	828	621	414	207	
Capacidad total de los Albergues	3240	3240	3240	3240	3240	3240	
Sobre población	1998	2205	2412	2619	2826	3033	
Costos	\$18,122.00	\$15,302.00	\$12,481.00	\$9,098.00	\$6,065.00	\$3,032.00	

Tabla 4.10: Costos generados por albergue temporal dependiendo el porcentaje de damnificados atendidos.

4.9. Rutas de evacuación obtenidas

El primera ruta que se obtuvo en este trabajo indica las 4 zonas de riesgo que son la colonia denominada como “Jardines del Sur” con una superficie de 2.262 km cuadrados con una población promedio de 805 habitantes, si tomamos en cuentas que solo el número de damnificados de esta zona sólo es del 75 % se podrán albergar en el primer refugio temporal denominado escuela primaria Miguel Hidalgo por el motivo de que es el albergue temporal más cercano a esta zona de riesgo.

Las Figuras 4.5-4.21 complementan la información de lo que muestra en las Tablas 4.13-4.18, donde:

d_c : es la distancia entre las zonas de riesgo y los albergues cuando se recorre la trayectoria caminando,

d_v : es la distancia cuando se recorre en vehículo,

t_c y t_v son los tiempos que se destina en los recorridos caminando y en vehículo, respectivamente.

Lugar	Habitantes
Jardines del Sur ($i = 1$)	604
Rojo Gómez ($i = 2$)	718
La Cañada ($i = 3$)	829
Hupalcalco ($i = 4$)	955
Total de Habitantes	3105

Tabla 4.11: Evacuación que permite una atención digna en los albergues.

Zonas de Riesgo i	Albergues Temporales j											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	400	0	0	0	0	0	0	2	202	0	0	604
2	0	0	0	250	0	0	0	348	0	0	120	718
3	0	265	0	0	0	0	250	0	149	165	0	829
4	0	0	400	0	250	270	0	0	0	35	0	955
	400	400	400	250	250	270	250	350	350	200	120	

Tabla 4.12: Respuesta óptima, distribución cuando se atiende al 65% de la población.

Con la información de la Tabla 4.12 podemos tomar una decisión para enviar a los damnificados a un albergue temporal determinado por el menor costo, dicha tabla indica que el costo más bajo para la zona de riesgo ($i = 1$) Jardines del Sur,

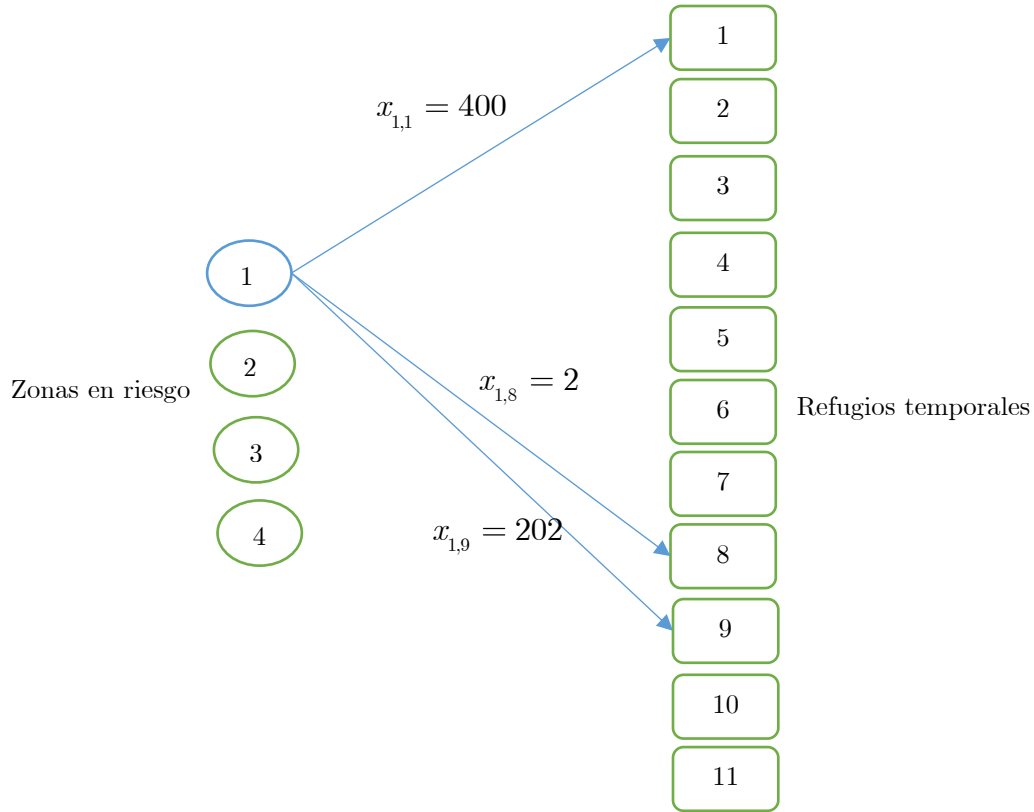


Figura 4.4: Asignación de la zona $i = 1$ hacia $j = 1, 8, \text{ y } 9$.

es el albergue denominado ($j = 2$) Escuela Primaria Martín Urrutia, el segundo albergue conveniente para esta zona de riesgo es ($j = 9$) Escuela Jorge Berganza Campo Alegre.

Podemos observar cuáles son los óptimos para esta zona de riesgo y a los dos albergues temporales, como se menciona anteriormente en este estudio, una de las restricciones es la capacidad de dichos refugios, esta restricción determina a donde se envía a los damnificados.

En la Tabla 4.13 podemos observar que el costo de transporte de la zona de riesgo “Jardines del Sur” $i = 1$ al albergue temporal Escuela Primaria Miguel Hidalgo $j = 1$

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Jardines del Sur ($i = 1$) 805	Por 21 de Marzo	2.1		2.1	7	Primaria Miguel Hidalgo ($j = 1$)
	Calzada los Romeros	2.1	20	2.1	6	400
	Av. Federico Chopin	2.1	19	2.1	7	
	Molino del Rey	2.1	20	2.1		

Tabla 4.13: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona de riesgo Jardines del Sur ($i = 1$) al albergue temporal más cercano Primaria Miguel Hidalgo ($j = 1$).

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal		
Jardines del Sur ($i = 1$)	Universidad ETAC ($i = 8$)	Calle Benito Juárez	2.4	30	2.5	10	Universidad ETAC ($j = 8$)	
	Blvrd. Bicentenario						3.1	10
	Ignacio López Rayón						2.6	11
	Av. Federico Chopin						2.3	28
	Manuel Fernando Soto y Chopin						2.4	30

Tabla 4.14: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona de riesgo Jardines del Sur ($i = 1$) al albergue temporal Universidad ETAC ($j = 8$).

es de, aproximadamente, \$8.00 por persona con un tiempo mínimo de transportación de 7 minutos, por 3 rutas distintas, esto indica que no es la ruta en cuestión económica más conveniente, más sin embargo el albergue temporal “Escuela primaria Martín Urrutia” ($i = 2$), es la opción óptima a seguir teniendo también 3 rutas alternativas con un tiempo mínimo de 9 minutos.

Podemos indicar que hay albergues temporales más céntricos, pero algunos albergues no son abiertos hasta que los albergues primarios son saturados.

En la Figura 4.13 se observa que la zona de riesgo $i = 1$ puede o no recurrir a cualquiera de los albergues temporales y se indica en un color distinto cual es el más óptimo para esta zona.

De la misma forma, podemos concluir que la capacidad de albergar a la población, que presuntamente podría ser damnificada, es menor que el número de habitantes de las zonas de riesgo antes mencionadas. No obstante, a través de investigaciones de estudios realizados en otros países se determinó que el 100 % de los habitantes de

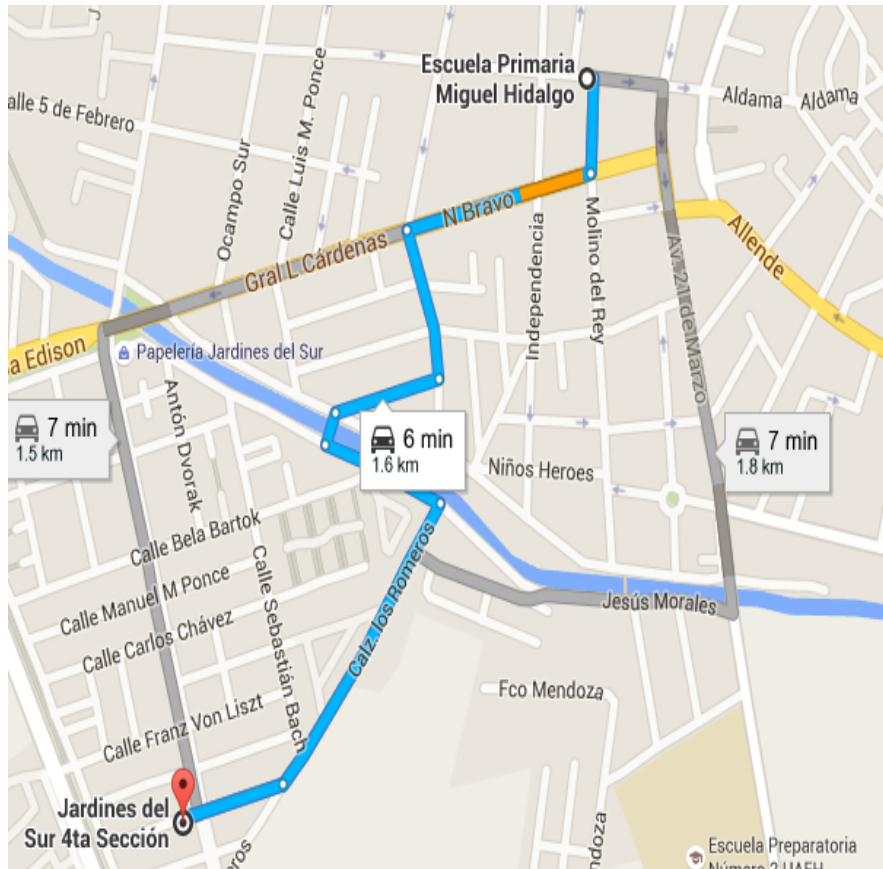


Figura 4.5: Jardines del sur 4ta Sección, ruta hacia Miguel Hidalgo.

las zonas de riesgo no ocupan los albergues temporales, por ejemplo, en el estudio realizado en la ciudad de Villa Hermosa Tabasco mostró que solo el 70% de los damnificados ocuparon los albergues temporales.

La Figura 4.22 muestra que la ciudad de Tulancingo tiene la capacidad de satisfacer las necesidades del 78.26% de la capacidad total de los habitantes de las zonas de riesgo.

Dicha representación gráfica, Figura 4.22, también muestra que a partir del 65% de los habitantes de las zonas de riesgo inicia con el cierre de albergues temporales,

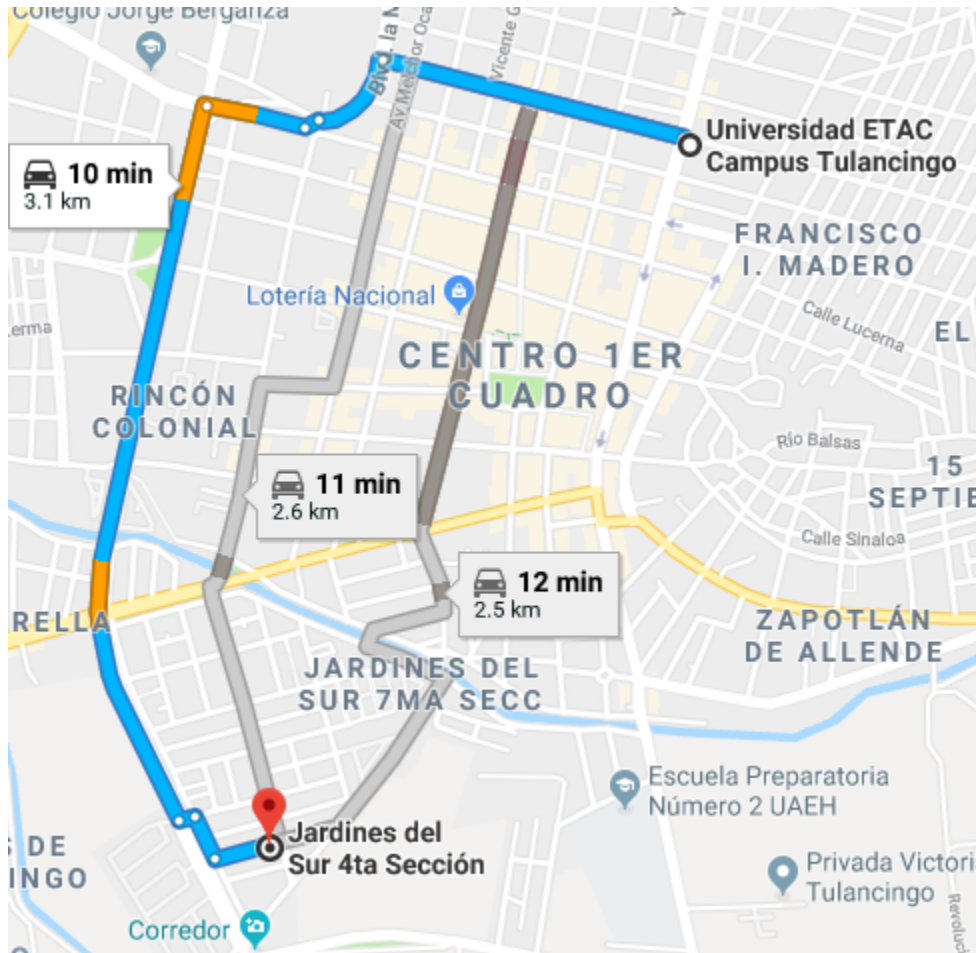


Figura 4.6: Jardines del sur 4ta Sección, ruta hacia ETAC.

el modelo matemático aplicado a esta problemática nos indica que los albergues más óptimos para cerrar son el albergue Escuela primaria Martín Urrutia $i = 2$ y el albergue temporal Iglesia ($j = 11$).

Como lo indica la Tabla 4.14 y que además corrobora los resultados del gráfico antes mencionado, a partir del 65% del total de los habitantes de las zonas de riesgo se comienza a cerrar albergues temporales reduciendo costos en la manutención de los mismos.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Jardines del Sur ($i = 1$)	Blvrd. Bicentenario			2.4	6	Colegio Jorge Berganza ($j = 9$)
805	Calle Mariano M. y Blvrd Bicentenario			2.4	7	350
	México 130			3.3	9	
	Av. Ferrocarril	2	25			
	Calz. 5 de Mayo y Chopin	2.1	26			
	Av. Ferrocarril y blvrd Bicentenario	2	25			

Tabla 4.15: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona de riesgo Jardines del Sur ($i = 1$) al albergue temporal Colegio Jorge Berganza ($j = 9$).

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Rojo Gómez ($i = 2$)	Calle Av. Minas	5.7	1.09.00	6.2	12	Club de Leones Tulancingo ($j = 4$)
	Blvrd Pleasenton	6	1.11.00	6.4	18	250
	Del Ferrocarril			7.5	19	
	Juan Marroquin	5.5	1.06.00			

Tabla 4.16: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona de riesgo Rojo Gómez ($i = 2$) al albergue temporal Secundaria Club de Leones Tulancingo ($j = 4$).

Conforme se reduzca el número de los habitantes de las zonas de riesgo que ocupen los servicios de los albergues temporales, se cerraran dichos alojamientos para poder concentrar los recursos solo a los individuos que requieran este servicio haciendo más eficiente la entrega de los recursos como el control de los mismos.

Según disminuya la cantidad de la población damnificada, los albergues temporales se cerrarán, esto comenzará a suceder a partir de que la demanda a satisfacer sea del 50 % de habitantes damnificados.

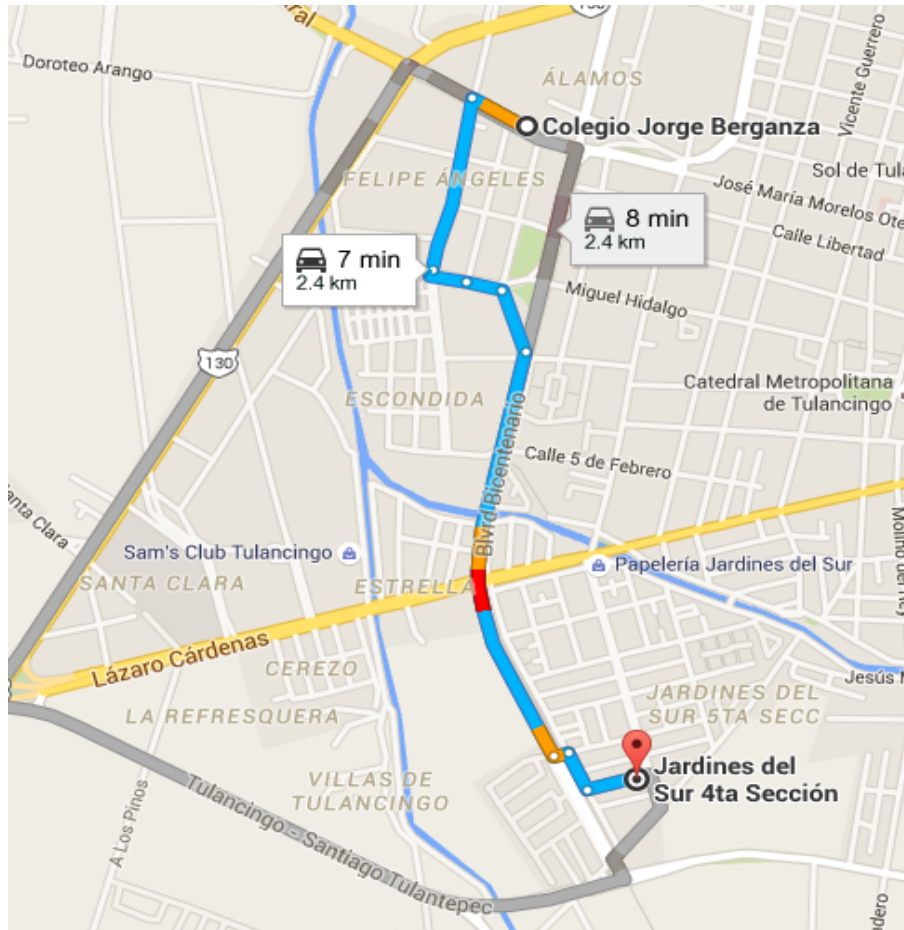


Figura 4.7: Jardines del sur 4ta Sección, ruta hacia Jorge Berganza.

4.10. Modelo que considera la localización de nuevos albergues

Como ya se había hecho mencionado, la capacidad de los albergues es insuficiente, es por eso que es necesaria la apertura de nuevos albergues para una adecuada atención a la población. Para incluir esta consideración en el modelo, debemos de tener en cuenta los costos de apertura del albergue, que dependen de la zona en

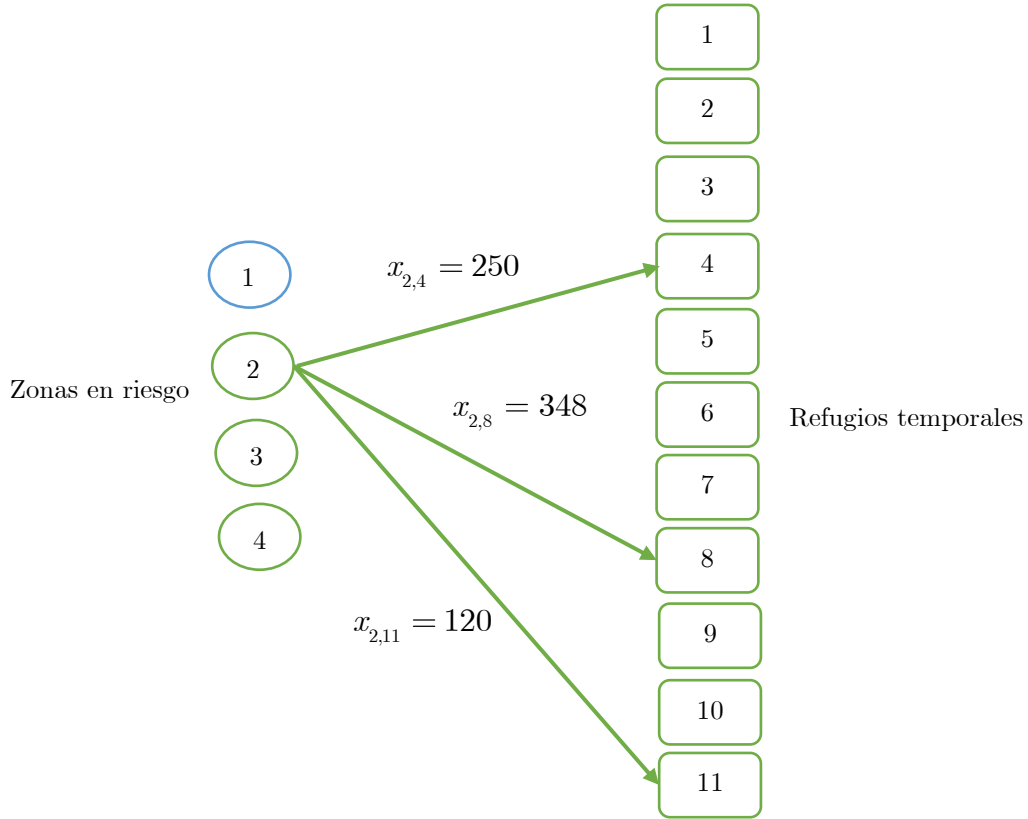


Figura 4.8: Asignación de la zona $i = 2$ hacia $j = 4, 8,$ y 11 .

donde se planifique aperturar, así como los costos de transporte y almacenamiento de víveres.

Consideremos para $i = 1, \dots, 4$ y $j = 12, 13$ y 14 :

F_j : costo de apertura y mantenimiento del nuevo albergue,

y_j : variable binaria, si $y_j = 1$, se apertura el nuevo centro, $y_j = 0$ en caso contrario.

z_{ij} : número de damnificados que se envían desde la zona de desastre i , $i = 1, \dots, 4$, hacia el nuevo albergue j .

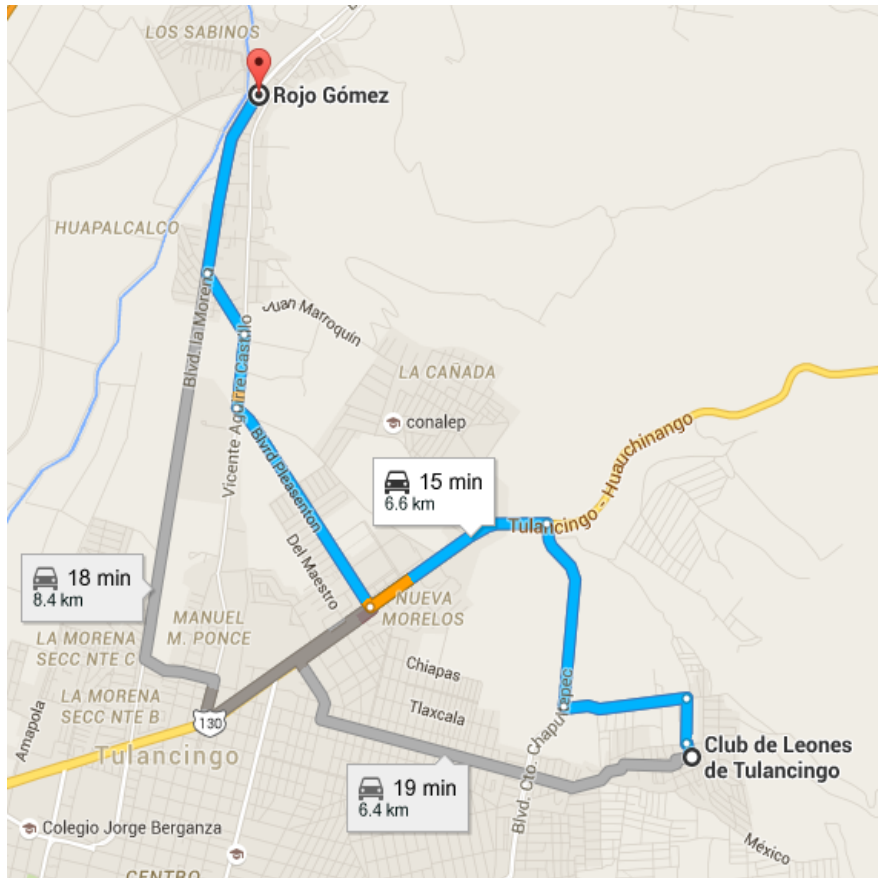


Figura 4.9: Ruta de evacuación hacia el Club de Leones.

$CUTN(i, j)$: costo unitario de transporte desde i , hacia el nuevo centro j .

$CAN(j)$: capacidad del refugio j .

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Rojo Gómez ($i = 2$)	Del Ferrocarril	4.9	59	5.1	12	Universidad ETAC ($i = 8$)
	Ignacio López y del Ferrocarril			4.9	12	350
	Blvrd. Pleasenton	4.8	58	4.9	14	
	Vicente Aguirre Castillo	4.6	56			

Tabla 4.17: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona de riesgo Rojo Gómez ($i = 2$) al albergue temporal Universidad ETAC ($j = 8$)

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Rojo Gómez ($i = 2$)	Del Ferrocarril	5.3	1.04.00	5.5	14	Iglesia Catedral ($j = 11$)
	Vicente Aguirre Castillo	5	1.01.00	5.1	15	120
	Churubusco y del ferrocarril			5.4	15	
	Fernando Soto y Blvrd Plasenton	5.5	1.07.00			

Tabla 4.18: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona de riesgo Rojo Gómez ($i = 2$) al albergue temporal Iglesia Catedral ($j = 11$).

Con base a lo anterior, el nuevo modelo propuesto está dado por:

$$\begin{aligned}
(P_2) \quad & \text{mín} \quad \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{14} \text{CUT}(i, j)x_{ij} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=12}^{14} \text{CUTN}(i, j)z_{ij} + \sum_{j=12}^{14} F_j y_j \\
\text{s. a} \quad & \sum_{j=1}^{11} x_{ij} + \sum_{j=12}^{14} z_{ij} y_j \geq \text{ND}(i), i = 1, 2, 3, 4, \\
& \sum_{i=1}^4 x_{ij} \leq \text{CA}(j), j = 1, 2, \dots, 11 \\
& \sum_{i=1}^4 z_{ij} y_j \leq \text{CAN}(j), j = 12, 13, 14 \\
& x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, \dots, 11 \\
& y_j \in \{0, 1\}, j = 12, 13, 14.
\end{aligned}$$

Por supuesto, que para que esto tenga sentido, necesitamos que los nuevos lugares sean lugares preestablecidos. Desde el punto de vista de la Programación Matemática, se puede resolver el problema de localización de nuevos refugios temporales como se menciona en el Apéndice B.

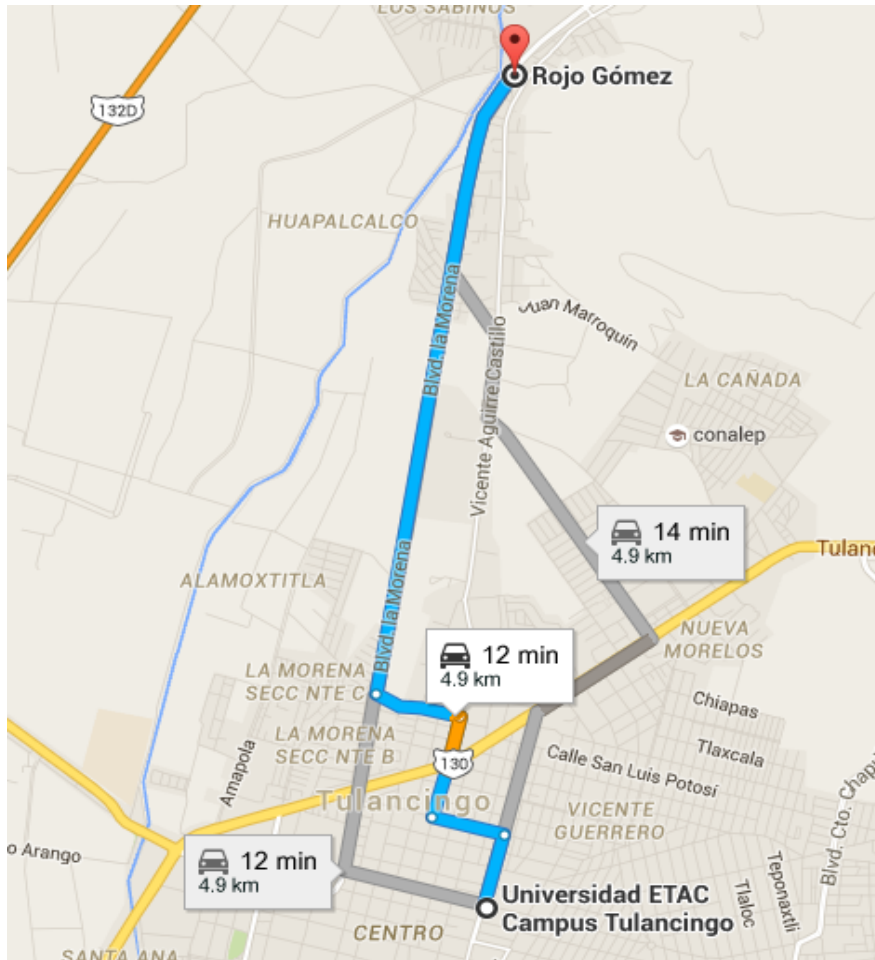


Figura 4.10: Ruta de evacuación hacia la Universidad ETAC.

Antes de finalizar este capítulo, debemos mencionar que dentro del modelo se pueden realizar adecuaciones de tal manera que evitemos algunas soluciones que pueden ser inviables para su implementación. Tal es el caso de rutas en donde no se pueda trasladar a la sociedad en riesgo bien por motivos de inundación de ruta de evacuación o bien por congestión vial.

Para esto, hacemos referencia a la Tabla 4.3, misma que reproducimos en la Tabla 4.30.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
La Cañada ($i = 3$)	Francisco I. Madero	11.3		11.3	27	Primaría Lázaro Cárdenas ($j = 7$)

Tabla 4.19: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 1$ al albergue temporal más cercano $j = 2$.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
La Cañada ($i = 3$)	Primero de abril	10.2		10.2	25	Primaría Martín Urrutia ($j = 2$)

Tabla 4.20: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 1$ al albergue temporal más cercano $j = 2$.

Costo unitario de transporte c_{ij}											
Zona riesgo i	Albergues Temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 15.00	\$ 16.00	\$ 16.00	\$ 21.00	\$ 21.00	\$ 10.00	\$ 9.00	\$ 15.00	\$ 14.00
2	\$ 14.00	\$ 10.00	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 16.00	\$ 20.00	\$ 21.00	\$ 9.00	\$ 12.00	\$ 20.00	\$ 7.00
3	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 16.00	\$ 15.00	\$ 21.00	\$ 21.00	\$ 8.00	\$ 12.00	\$ 10.00	\$ 15.00	\$ 9.00
4	\$ 18.00	\$ 10.00	\$ 12.00	\$ 16.00	\$ 12.00	\$ 10.00	\$ 23.00	\$ 17.00	\$ 21.00	\$ 13.00	\$ 11.00

Tabla 4.30: Costo unitario de transporte de zona de riesgo a un albergue temporal.

Si requerimos evitar ciertas rutas, es una estrategia común que consideremos que la ruta que no sea viable, se considere con un alto costo, esto es, el c_{ij} asociado, se considere como ∞ , posterior a esto, se resuelva nuevamente el problema con la ayuda del optimizador. Tal es el caso de lo que se presenta en la Figura 4.5, en donde se aprecia que la ruta debe pasar a través del río, desde Jardines del Sur, hacia la Escuela Miguel Hidalgo. En este caso, consideramos $c_{11} = \infty$, dentro de la Tabla 4.30, y consideramos ahora la Tabla 4.31, y de esta manera el optimizador buscará otra alternativa menos costosa que la actual.

Costo unitario de transporte c_{ij}											
Zona riesgo i	Albergues Temporales j										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	∞	\$ 8.00	\$ 15.00	\$ 16.00	\$ 16.00	\$ 21.00	\$ 21.00	\$ 10.00	\$ 9.00	\$ 15.00	\$ 14.00
2	\$ 14.00	\$ 10.00	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 16.00	\$ 20.00	\$ 21.00	\$ 9.00	\$ 12.00	\$ 20.00	\$ 7.00
3	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 16.00	\$ 15.00	\$ 21.00	\$ 21.00	\$ 8.00	\$ 12.00	\$ 10.00	\$ 15.00	\$ 9.00
4	\$ 18.00	\$ 10.00	\$ 12.00	\$ 16.00	\$ 12.00	\$ 10.00	\$ 23.00	\$ 17.00	\$ 21.00	\$ 13.00	\$ 11.00

Tabla 4.31: Costo unitario de transporte de zona de riesgo a un albergue temporal.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
La Cañada ($i = 3$)	México-Tuxpan	4.6		4.6	12	Colegio Jorge Berganza ($j = 9$)

Tabla 4.21: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 1$ al albergue temporal más cercano $j = 2$.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
La Cañada ($i = 3$)	México-Tuxpan	4.4		4.4	15	Catedral ($j = 10$)

Tabla 4.22: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 3$ al albergue temporal más cercano $j = 10$.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Huapalcalco ($i = 4$)	Blvdr. La Morena	6.8		6.8	16	Secundaria José Ma. Lezama ($j = 3$)

Tabla 4.23: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 4$ al albergue temporal más cercano $j = 3$.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Huapalcalco ($i = 4$)	Blvdr. La Morena	7.1		7.1	20	Conalep Tulancingo ($j = 5$)

Tabla 4.24: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 4$ al albergue temporal más cercano $j = 5$.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Huapalcalco ($i = 4$)	Blvdr. La Morena	6.8		6.8	16	Secundaria José Ma. Lezama ($j = 3$)

Tabla 4.25: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 4$ al albergue temporal más cercano $j = 3$.

Zona de Riesgo (i)	Ruta de evacuación	d_c	t_c	d_v	t_v	Albergue Temporal
Huapalcalco ($i = 4$)	Blvdr. La Morena	6.8		6.8	16	Secundaria José Ma. Lezama ($j = 3$)

Tabla 4.26: Distancia, tiempo y rutas de evacuación de la zona $i = 4$ al albergue temporal más cercano $j = 3$.

i	Nuevos albergues	Capacidad
$j = 12$	UTECE	400
$j = 13$	Presidencia M.	400
$i = 14$	Aurrera	100

Tabla 4.27: Ubicación de las zonas de riesgo.

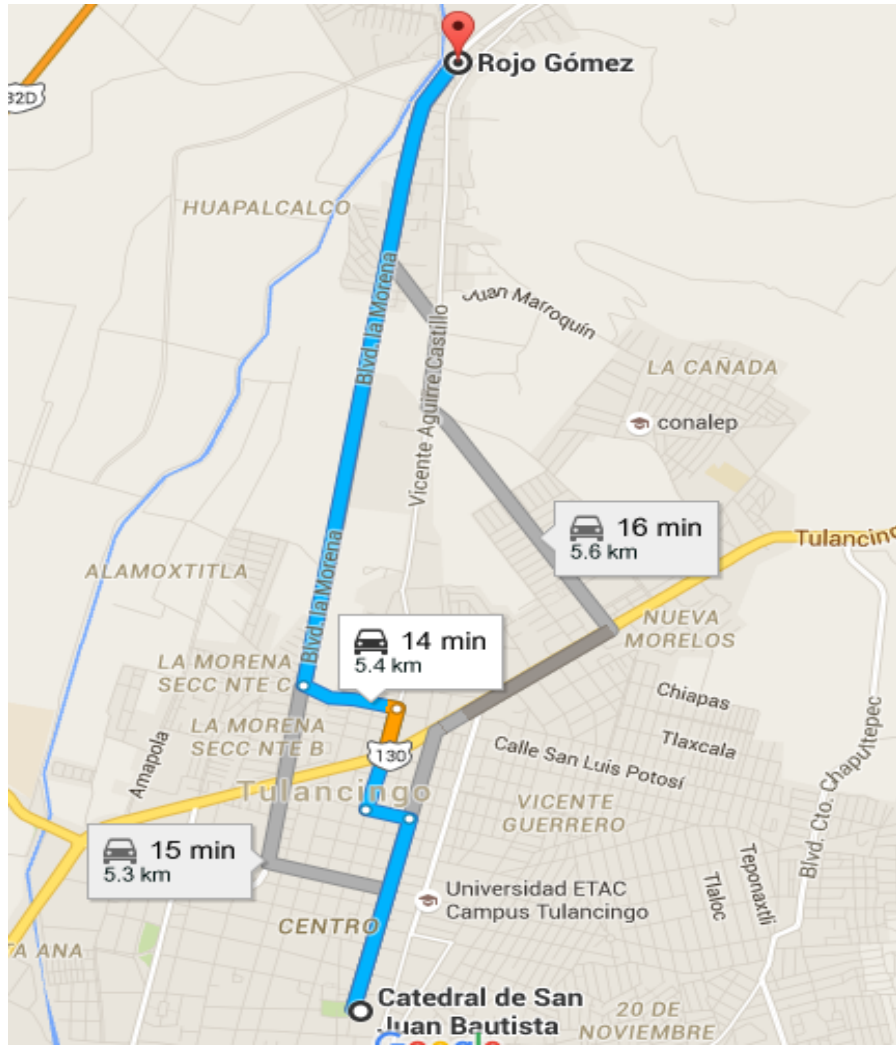


Figura 4.11: Ruta de evacuación hacia la Catedral.

i	12	13	14
$i = 1$	\$8.00	\$16.00	\$21.00
$i = 2$	\$14.00	\$14.00	\$14.00
$i = 3$	\$14.00	\$8.00	\$14.00
$i = 4$	\$21.00	\$14.00	\$8.00

Tabla 4.28: Costos hacia los nuevos albergues.

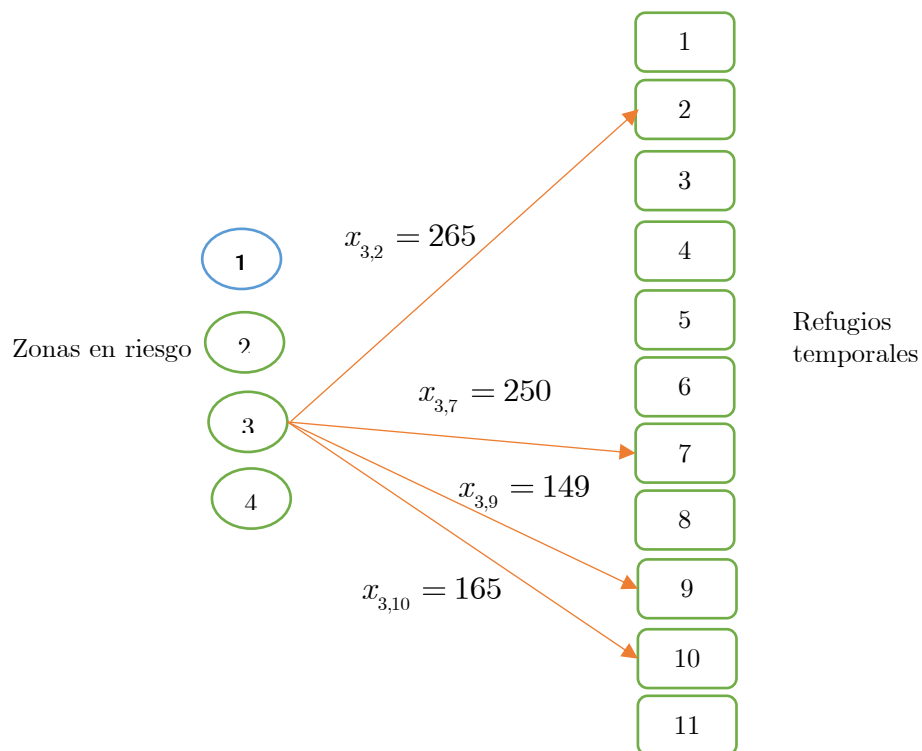


Figura 4.12: Asignación de la zona $i = 3$ hacia $j = 2, 7, 9$ y 10 .

Zonas de riesgo i	Albergues temporales j													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	55	0	0	0	0	0	0	350	0	0	400	0	0
2	237	0	0	250	0	0	0	350	0	0	120	0	0	0
3	163	292	0	0	0	0	250	0	0	0	0	0	400	0
4	0	53	400	0	250	270	0	0	0	200	0	0	0	100

Tabla 4.29: Distribución final considerando la apertura de nuevos albergues.

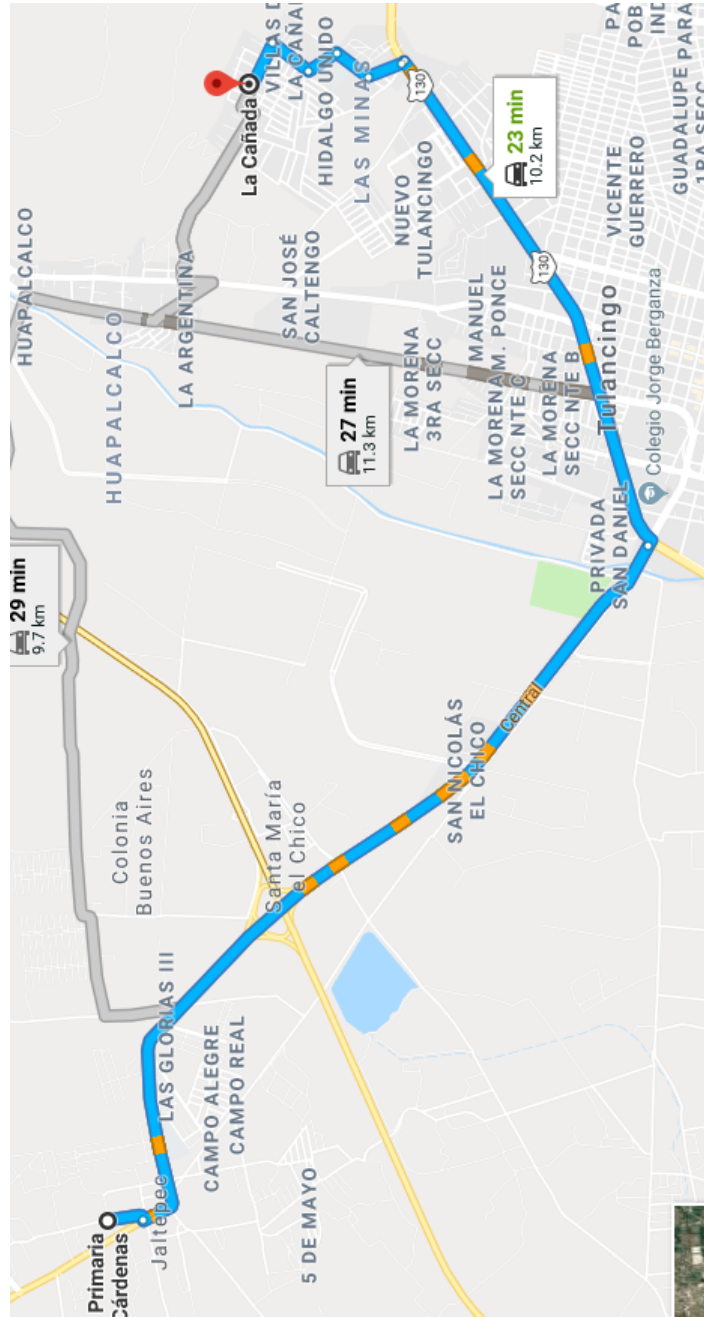


Figura 4.13: Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 7$.

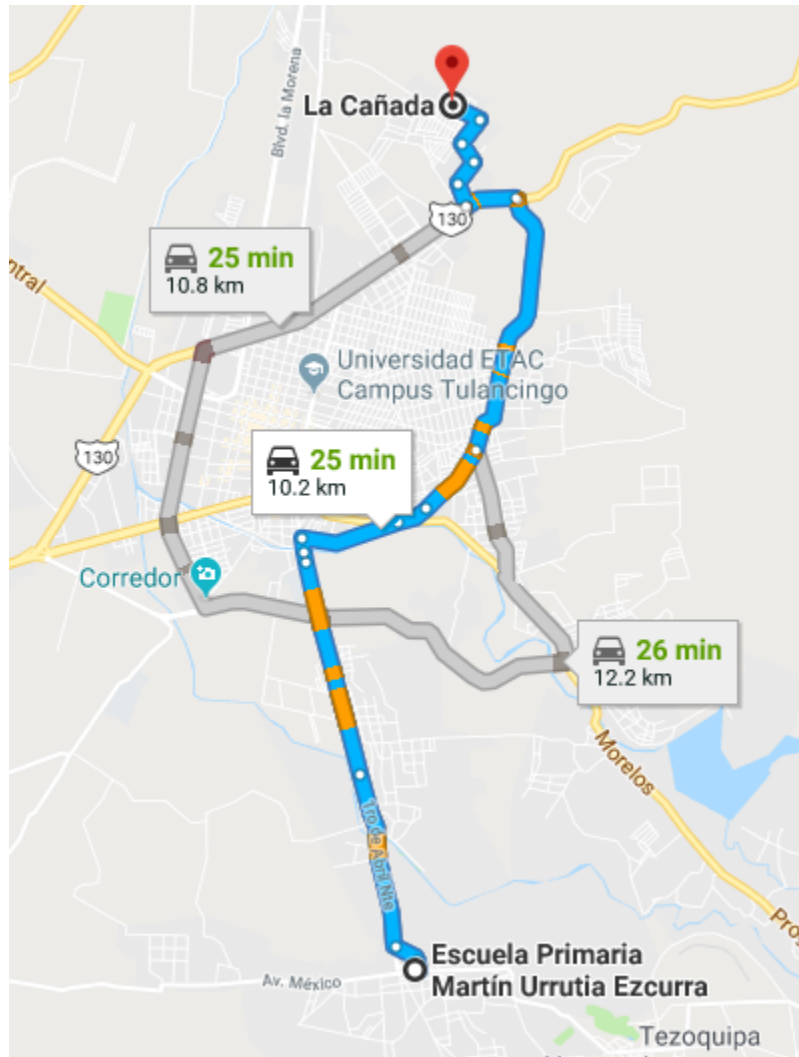


Figura 4.14: Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 2$.

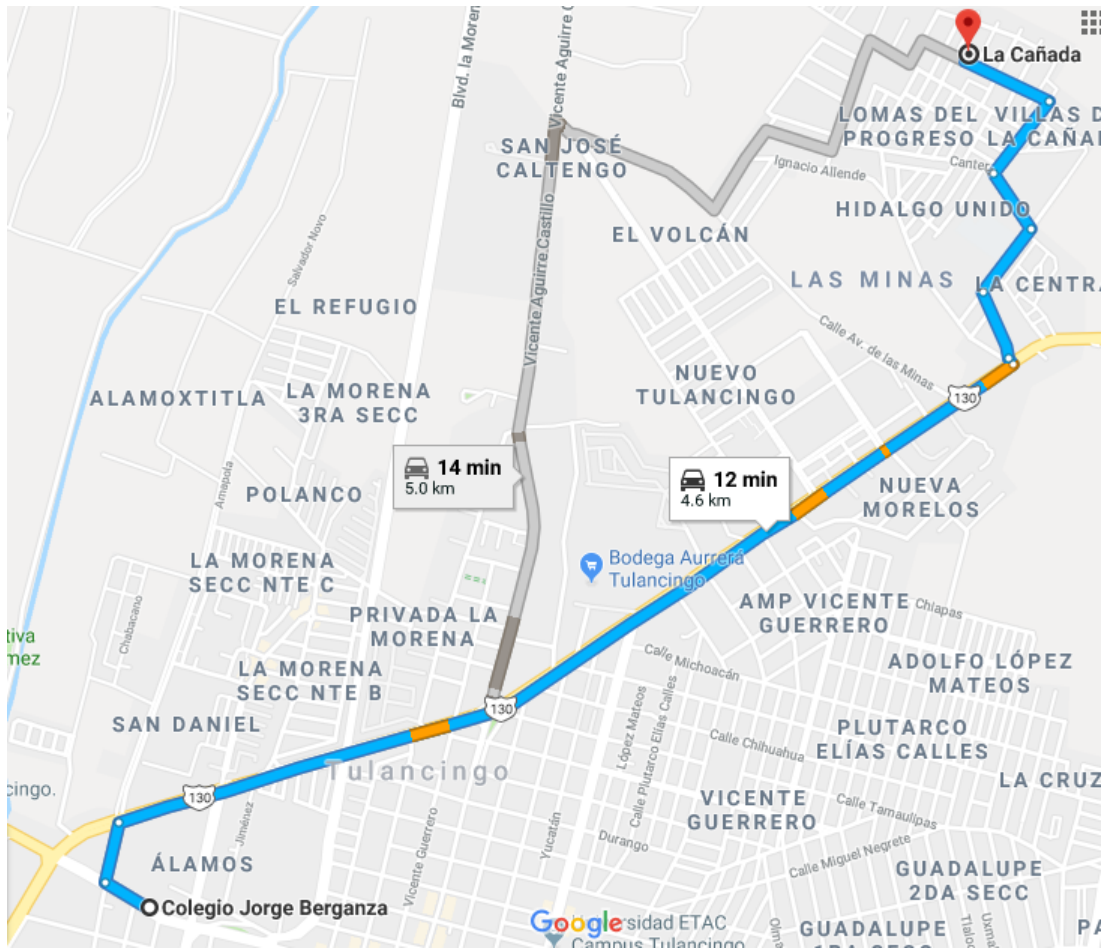


Figura 4.15: Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 9$.

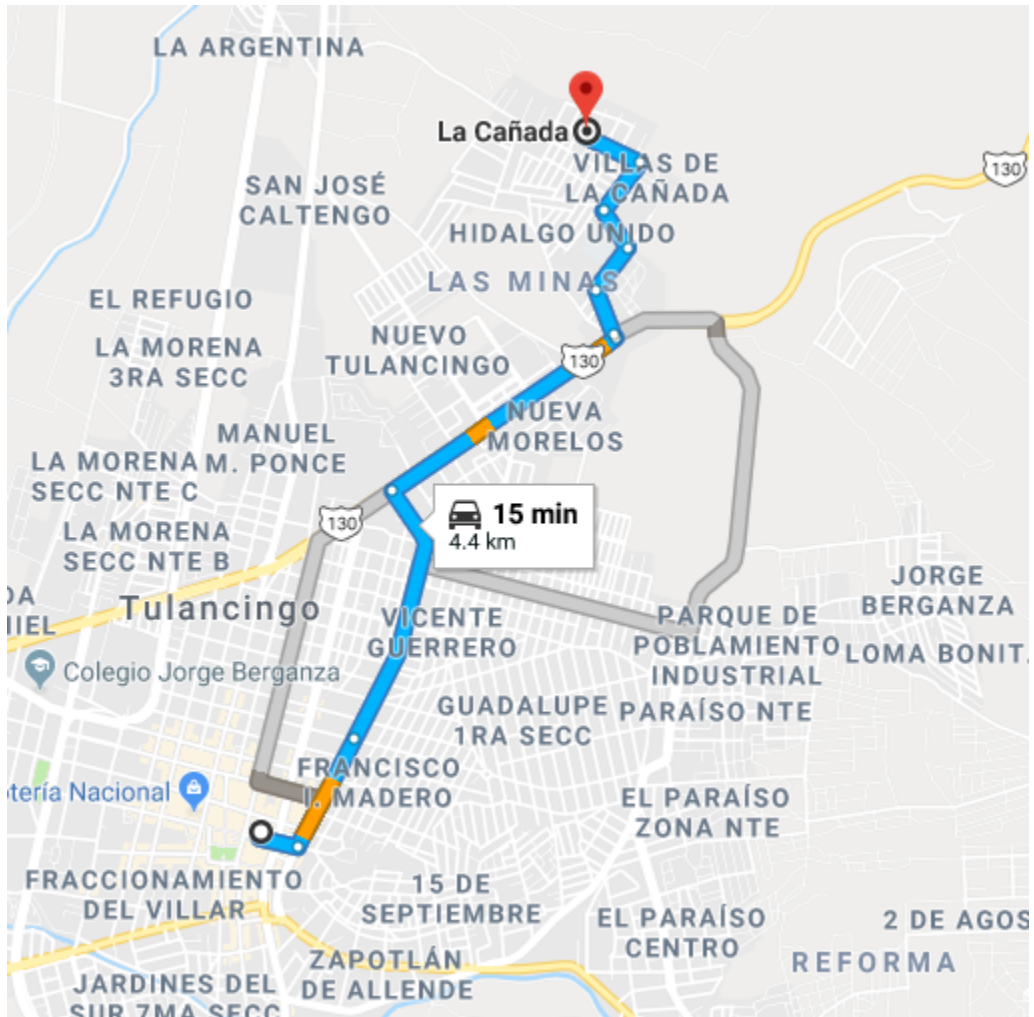


Figura 4.16: Ruta de evacuación desde $i = 3$ hacia $j = 10$.

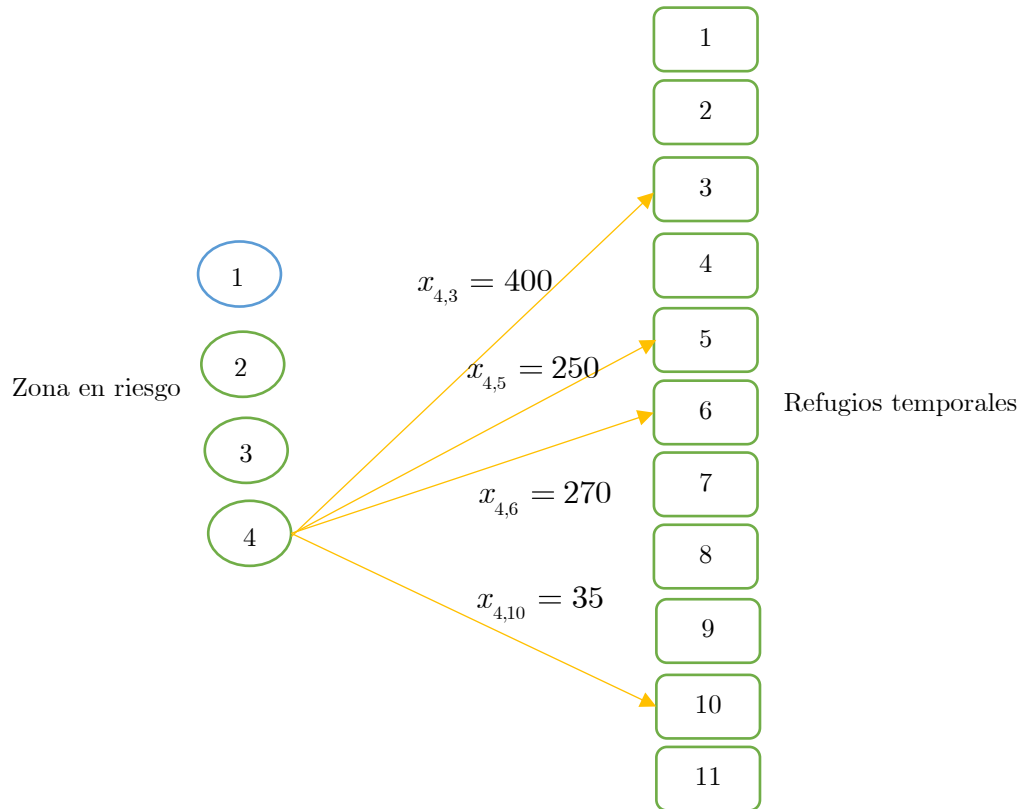


Figura 4.17: Asignación de la zona $i = 4$ hacia $j = 3, 5, 6$ y 10 .



Figura 4.18: Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 3$.

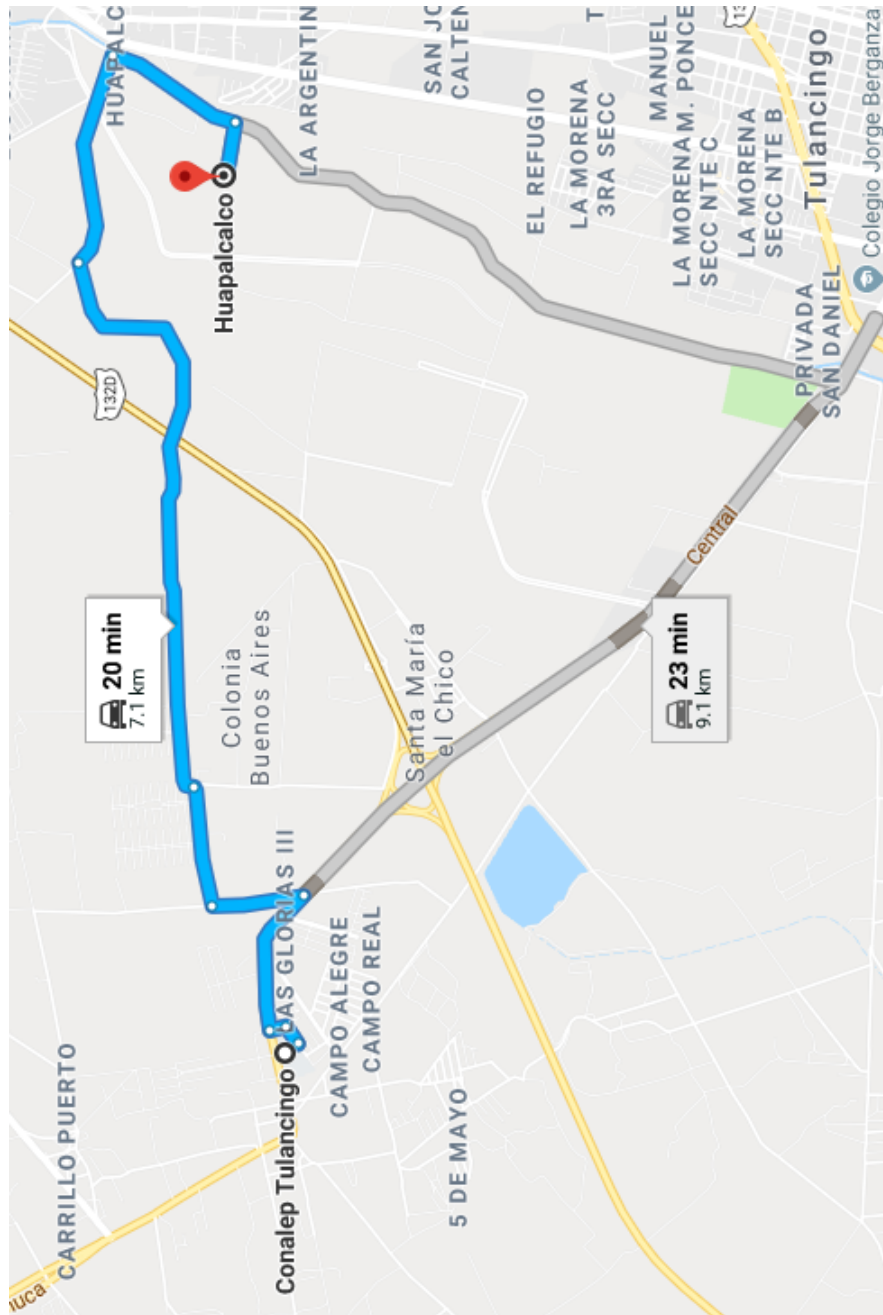


Figura 4.19: Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 5$.

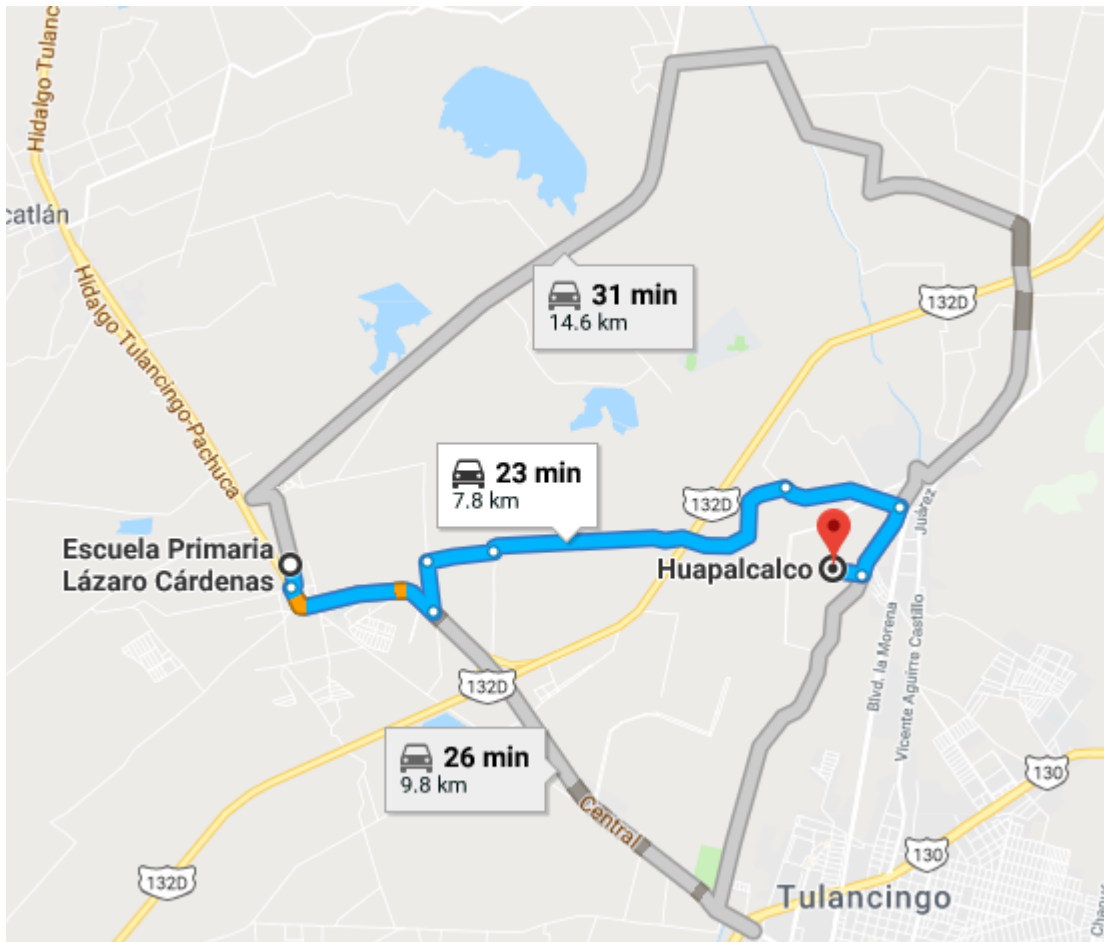


Figura 4.20: Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 6$.



Figura 4.21: Ruta de evacuación desde $i = 4$ hacia $j = 10$.

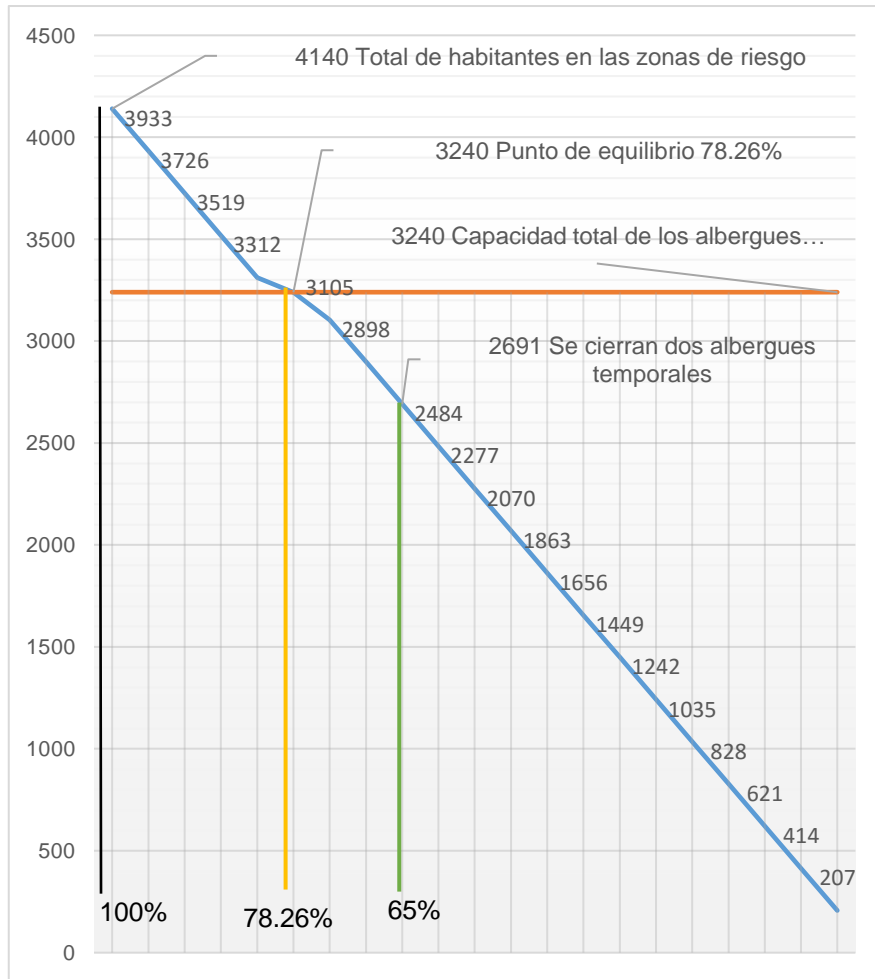


Figura 4.22: Capacidad de los albergues, punto de equilibrio cuando se evacua el 78.26% de la población.

Capítulo 5

Conclusiones

Se presentó una propuesta de las diferentes rutas de evacuación desde las zonas de riesgo hacia los albergues. Para esto se utilizaron: El modelo del transporte, las herramientas de computo, Excel y LINGO, además de las herramientas de visualización geográfica que ofrece Google.

El modelo de transporte se adecuó a la situación real y se encontró el porcentaje de la población que se puede atender en cada uno de los albergues sin que éstos se saturen, así como la manera que se pueden trasladar desde las zonas de riesgo hacia los albergues de manera óptima en el sentido de minimizar los costos de traslado.

Se consideraron las zonas que históricamente han sufrido los embates del clima, en cuanto a inundaciones, también se tomaron en cuenta los albergues que están de manera permanente acondicionados para la adecuada atención de la ciudadanía.

Se estimó la distancia mínima desde cada zona de riesgo hacia los albergues, a través de las herramientas que Google ofrece. La propuesta tiene como fin, dar a conocer a la población si habitan una zona de riesgo y cuales son los posibles refugios temporales que puede acudir para su resguardo.

El trabajo refuerza el problema al que se enfrenta la población, esto es, no existen suficientes albergues en la región para proporcionar la atención adecuada y oportuna de la población.

Este trabajo es el preámbulo de un amplio campo de estudio, el trabajo futuro se puede dirigir hacia la localización óptima de nuevos refugios, así como la manera óptima de atender tanto a la población en riesgo como el abastecimiento de víveres a los refugios.

La reducción de tiempos y costos no solo genera beneficios para el gobierno sino también para el confort de los damnificados teniendo una atención en tiempo y forma. Este tipo de investigaciones no solo son necesarias para tener planes de contingencia fundamentados en metodología científica y poder auxiliar a la mayor población posible, también nos ayuda a entender la conducta del ser humano en situaciones de catástrofe y poder tener un proceso más rápido para poder ayudar a los damnificados.

Durante las inundaciones pasadas que ha sufrido la ciudad de Tulancingo de Bravo Hidalgo lo sobresaliente fue el altruismo de la población para auxiliar a los habitantes en desgracia, con este tipo de investigaciones se tendrán bases científicas para poder auxiliar a la población en un menor tiempo y con una mejor calidad.

Bibliografía

- [1] Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo de Bravo, Hgo., Centro Eure, 2016.
- [2] Alegre, J. Casado, S., Delgado, C., & Pacheco, J. (2003). *Resolución de 2 modelos de localización mediante Búsqueda Dispersa*.
- [3] Antunes, A., & Peeters, D. (2000). *A dynamic optimization model for school network planning*. Socio-economic Planning Sciences 34, 101-120.
- [4] Antunes, A., & Peeters, D. (2001.). *On solving complex multi-period location models using simulated annealing*. European Journal of Operational Research, 130, 190-201.
- [5] Araya, M. G. (2014). Academia.educación, de Análisis de modelos de localización para apoyar la distribución de bins en huertos de manzanas.
- [6] Badeau, P., Guertin, F., Gendreau, M., Potvin, J.-Y., & Taillard, E. (1997). *A Parallel Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Transpn. Res. -C, Vol. 5 (2), 109-122.

- [7] Bai, X., & Shahidehpour, S. M. (1996). *Hydro-Thermal Scheduling by Tabu search and Decomposition Method. IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11 (2), 968-974.
- [8] Barbara Ryan, Establishing information seeking pathways in slow and flash floods, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Available online 7 April 2018, ISSN 2212-4209,
- [9] Barbarosoglu, G., & Özgür, D. (1999). *Hierarchical design of an integrated production and 2-echelon distribution system. European Journal of Operational Research*, 464-484.
- [10] Barr, R. S., Golden, B. L., Kelly, J. P., Resende, M. G., & Stewart, W. R. (1995). *Designing and Reporting on Computational Experiments with Heuristics Methods*. Kluwer Academic Publishers, 9-32.
- [11] Beamon, B. M. (1998). Supply Chain Design and Analysis: *Models and Methods. International Journal of Production Economics*, Vol. 55, No. 3, 281-294.
- [12] Benders, J. F. (1962). *Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. Numerische Mathematik* 4, 238-252.
- [13] Blazewicz, J., Ecker, K., Pesch, E., Schmidt, G., & Weglarz, J. (2007). *Handbook on scheduling: From theory to applications*. Berlin: Springer.
- [14] Brito, I. d., Yoshizak, H. T., & Belfiore, P. (2011). *A multi-commodity twostage production-distribution system design problem: the impact of different customs systems*. POMS 22nd Annual Conference, (págs. 1-20). Reno, Nevada, U.S.A.
- [15] Brucker, P. (2007). *Scheduling Algorithms. Fifth Edition*. New York: Springer.

- [16] Buzai, G. D. (1995). *Los modelos de localización-asignación*. Serie Geográfica n° 5, 1-19.
- [17] Caballero, J. A., & Grossmann, I. E. (2007). *Una revisión del estado del arte en Optimización*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática e Industrial, Vol. 4 (1), 5-23.
- [18] Carrizosa, E. (2005). *Algunas aportaciones de la investigación operativa a los problemas de localización*. International Review of Geographical Information Science and Technology, 268-277.
- [19] Castillo, J. M. (2014). Universidad Peruana los Andes virtual.
- [20] Castro, A. (13 de 07 de 2011). Lab. Algoritmos computacionales.
- [21] CENAPRED, 2013.
- [22] Chappell, M., Halpenny, B. B., Campbell, B. D., & Derrick. (2013). *Teoría de la complejidad computacional, Problemas computacionales, Los modelos de má-quinas y las medidas de complejidad, Clases de complejidad, Problemas abiertos importantes, Dificultad, Teoría de la complejidad continua, Historia*.
- [23] Chau, K. W. (2004). *A two-stage dynamic model on allocation of construction facilities with genetic algorithm*. *Automation in Construction* 13, 481490.
- [24] Chopra, S. M. (2001). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 2ªEdition. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- [25] CONAGUA, 2002.
- [26] Daskin, M. S. (2003). *Facility Location in Supply Chain Design*. Working paper, 3-010, 1-38.

- [27] David Mendoza-Tinoco, Dabo Guan, Zhao Zeng, Yang Xia, Ana Serrano, Flood footprint of the 2007 floods in the UK: The case of the Yorkshire and The Humber region, *Journal of Cleaner Production*, Volume 168, 2017, Pages 655-667, ISSN 0959-6526.
- [28] Hal, Z., R. Batta y R. Szczerba, Supply-Chain optimization – Players, tools and issues. *OR Insight*. 14, (2), 20 – 30 (2001).
- [29] Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*, Novena edición. México: McGraw-Hill.
- [30] Javier Enrique Thomas Bohórquez, Evaluación de la vulnerabilidad social ante amenazas naturales en Manzanillo (Colima). Un aporte de método, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, Volume 2013, Issue 81, 2013, Pages 79-93, ISSN 0188-4611.
- [31] Junze Zhang, Zhongqi Yu, Tengfei Yu, Jianhua Si, Qi Feng, Shixiong Cao, Transforming flash floods into resources in arid China, *Land Use Policy*, 2018.
- [32] Martínez, R. H., & Suazo, R. J. (2004). *The facility location decisions in the supply chain*. *Revista Ingeniería Industrial - Año 3, N° 1- Segundo Semestre*, 57-68.
- [33] M.T. Melo, S. N. (2001). Large-scale models for dynamic multi-commodity capacitated facility location. *Fraunhofer*, 1-51.
- [34] OMM/UNESCO, 2012.
- [35] (6) Prasoon Singh, Vinay Shankar Prasad Sinha, Ayushi Vijhni, Neha Pahuja, Vulnerability assessment of urban road network from urban flood, *International*

Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 28, 2018, Pages 237-250, ISSN 2212-4209.

[36] Segob, 2016 actualización del Atlas de Riesgo del Municipio de Tulancingo de Bravo Hidalgo. Centro Eure. Estudios Territoriales y políticas públicas.

[37] Ley General de Protección Civil de Hidalgo 2016.

[38] Toimil, I.J. Losada, P. Camus, Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias, RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua, Volume 3, Issue 2, 2016, Pages 56-65, ISSN 2386-3781.

[39] Gobierno del estado de Hidalgo, Plan estatal de respuesta, Temporada de lluvias y ciclones tropicales 2014. Protección civil Hidalgo (Cronología de huracanes hidalgo).

[40] Atlas de Riesgo por desastre en salud, Tulancingo de Bravo. (Albergues). (

[41] SV Ukkusuri, WF Yushimito, Location routing approach for the humanitarian prepositioning problem, Transportation research record, 2008.

[42] Vergara Tenorio, Ma. del Carmen et al. La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. Polít. cult. [online]. 2011, n.36, pp.45-69. ISSN 0188-7742.

Apéndice A

Código LINGO

```
model:
sets: I /1..4/:numdam;
      J /1..11/:capalb;
      J1 /12,13,14/:capalbn;
      IJ(I,J):costo,x;
      IJ1(I,J1):coston,z;
      K /1..3/:F,y;
endsets
data: costo = 15 8 15 16 16 21 21 10 9 15 14 14 10 15 8 16 20 21 9 12
20 7 15 8 16 15 21 21 8 12 10 15 9 18 10 12 16 12 10 23 17 21 13 11; coston
= 8 16 21 14 14 14 14 8 14 21 14 8;
      numdam = 805 957 1105 1273;
      capalb = 400 400 400 250 250 270 250 350 350 200 120; capalbn = 400
400 100;
      F = 100000 200000 30000;
```

```

enddata min = @sum(IJ:costo*x)+@sum(IJ1:coston*z)+@sum(k:F*y);
@for(I(ii):(@sum(J(jj):x(ii,jj))+@sum(J1(jj):z(ii,jj)*y(jj))))>=numdam(ii));
@for(J(jj):@sum(I(ii):x(ii,jj))<=capalb(jj));
@for(J1(jj):(@sum(I(ii):z(ii,jj)*y(jj))<=capalbn(jj));
@for(K:@bin(y));
@for(IJ:@gin(x));
end

```

Apéndice B

Localización de plantas

Este tipo de modelo se utiliza con mucha frecuencia en la localización de plantas de trabajo. La descripción es la que aparece a continuación. Consideremos I como el conjunto de plantas a establecer o localizar, mientras que J representa el conjunto de clientes.

Sean, para $i \in I$, y para $j \in J$,

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{si se instala una planta en la localidad } i, \\ 0, & \text{si no se instala la planta en la localidad } i, \end{cases}$$

además de la variable

y_{ij} = Cantidad de productos enviados desde la planta i al cliente j .

El conjunto de restricciones es la siguiente:

1. Se debe satisfacer la demanda de cada cliente:

$$\sum_{i \in I} y_{ij} \geq d_j \text{ para toda } j \in J.$$

2. La capacidad de producción de la planta.

$$\sum_{i \in J} y_{ij} \leq U_i$$

y además,

$$y_{ij} \leq Mx_i,$$

con M suficientemente grande.

3. El número de plantas instaladas,

$$\sum_{i \in I} x_i \leq P.$$

4. La naturaleza de las variables,

$$x_i \in \{0, 1\}, y_{ij} \geq 0.$$

5. Finalmente, la función objetivo es:

$$\text{mín} \sum_{i \in I} c_i x_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_{ij} y_{ij},$$

donde c_i y h_{ij} , representan costos.