

DISEÑO DE TERRITORIOS DE ENTREGA EN ZONAS URBANAS ALTAMENTE POBLADAS

SERGIO A. CABALLERO

EDGAR E. BLANCO

Massachusetts Institute of Technology

KARLA B. VALENZUELA

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

mercados emergentes (Khanna *et al.*, 2007). Los mercados emergentes están cambiando dónde y cómo el mundo hace negocios. Durante las últimas tres décadas han sido fuente de mano de obra de bajo costo, cada vez más calificada. Sus ciudades de rápido crecimiento cuentan con millones de nuevos y prósperos consumidores que proporcionan un creciente mercado

para las empresas globales al mismo tiempo que gran parte del mundo desarrollado se enfrenta a un crecimiento más lento como consecuencia del envejecimiento (MGI, 2013).

Como resultado, las tasas de crecimiento del PIB (1) de estos países han superado notablemente las de economías más desarrolladas (Khanna y Palepu, 2010). Una de las regiones emergentes cuyo PIB ha superado a las de América del Norte y Europa en las últimas décadas es América Latina. América Latina es la región más urbanizada del mundo en vías de desarrollo con el 80 por ciento de su población viviendo en ciudades. 260 millones de personas viven en 198 ciudades grandes (2) de América Latina. En 2007 estas ciudades generaron un PIB de 3,6 billones de dólares. Las diez ciudades más grandes contribuyen con la mitad del PIB. Dentro de este grupo se encuentran cuatro megaciudades: Ciudad de México, Sao Paulo, Buenos Aires y Río de Janeiro. En 2025, 315 millones de personas vivirán en las 198 ciudades grandes de América Latina. El 65% de crecimiento de América Latina vendrá de estas ciudades. Estas ciudades generarán un PIB de 3,8 billones de dólares y tendrán un PIB per cápita de 23.000 USD (MGI, 2011).

El cambio del campo a la ciudad ha contribuido mucho al crecimiento de América Latina, conforme economías de escala han aumentado la productividad de las ciudades y reducido el costo de servicios básicos

a sus habitantes. Las ciudades son fundamentales para la economía de América Latina (MGI, 2011).

Sin embargo, conforme las ciudades han ido creciendo empezaron a experimentar nuevas problemáticas. Ciudades de diferentes partes del mundo enfrentan continuamente crecientes desafíos para hacer más eficiente la movilidad de personas y el transporte de bienes, mientras mantienen bajo control e idealmente reducen los impactos negativos en la calidad de vida de sus ciudadanos. La distribución de bienes es crucial para el desarrollo económico de una ciudad y el bienestar de su gente; sin embargo, afecta directamente a la congestión vehicular, contaminación, consumo de energía, seguridad vial y ocupación del espacio urbano. En zonas urbanas altamente pobladas esta situación es aún peor. La gran concentración de personas incrementa la demanda de productos y el requerimiento de más vehículos de pasajeros y de carga, que contribuyen a mayores niveles de congestión y contaminación.

Otra característica indeleble de los países en vías de desarrollo y en particular de Latinoamérica es la importante presencia del canal tradicional de ventas al detalle. A pesar del crecimiento y consolidación de las grandes cadenas de detallistas, las tiendas de abarrotes, también conocidas como nano-tiendas (Blanco & Fransoo, 2013), representan una parte significativa de

FIGURA 1
ÁREA METROPOLITANA DE VALLE DE MÉXICO



FUENTE: SEDESOL, CONAPO e INEGI (2010).

las ventas al por menor en América Latina y muchos otros mercados emergentes desde hace bastante tiempo (Díaz *et al.*, 2007). El canal tradicional en América Latina es responsable de la cuarta parte a la mitad de las ventas de abarrotes y tiene posiciones dominantes en algunos productos y mercados. Por ejemplo, alrededor del 95% de la cerveza consumida en Colombia y más del 80% de las ventas de bebidas carbonatadas en México se comercializa a través del canal tradicional.

El gran número de pequeñas tiendas en mercados emergentes, aproximadamente un millón de nano-tiendas en Brasil, más de 800.000 en México y 400.000 en Colombia, ha ocasionado que las empresas fragmenten sus operaciones logísticas y recurran a volúmenes de entrega más pequeños. Otro factor que contribuye a la fragmentación de la operaciones es el hecho que vehículos de gran tamaño no pueden llegar a los puntos de venta debido a la infraestructura vial limitada. De este modo, los productos en estos mercados por lo general se entregan en vehículos más pequeños o incluso en bicicleta (Lenartowicz & Balasubramanian, 2009).

En resumen, el gran número de puntos de venta, las características físicas únicas y la variedad de vehículos empleados hacen que el diseño de sistemas logísticos en zonas altamente pobladas en mercados emergentes, como Ciudad de México, sea más complejo y desafiante.

ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MEXICO

El área metropolitana de la Ciudad de México constituye la urbe más poblada del país. También conocida

como Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), esta área se extiende sobre el Valle de México, el cual abarca una superficie de 9.560 Km² y se encuentra a 2.240 m.s.n.m.

La Zona Metropolitana del Valle de México comprende tres entidades federales, a decir, 2 estados (Estado de México e Hidalgo) y el Distrito Federal. La ZMVM (ver figura 1) está conformada por 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios del Estado de México y 1 municipio de Hidalgo (SEDESOL *et al.*, 2010). Cada municipio tiene autonomía para administrar sus asuntos locales pero son regulados por los gobiernos de los estados a los que pertenecen. No existe una autoridad a cargo de la administración de toda el área metropolitana. En consecuencia, los proyectos de la zona metropolitana deben ser consensuados por los oficiales de gobierno de las entidades federales.

De acuerdo al Censo del año 2010 (INEGI, 2010), la zona metropolitana tiene una población de 20.116.842 habitantes distribuidos de la siguiente manera

Estado	Población
Distrito Federal	8.851.080
Hidalgo	97.461
Estado de México	11.168.301
Total ZMVM	20.116.842

FUENTE: INEGI (2010).

La densidad poblacional en el área metropolitana de la Ciudad de México asciende a 8.596 personas por Kilómetro cuadrado. Sin embargo, existen algunas de-

legaciones y municipios que experimentan densidades poblacionales por encima de las 15 mil personas/Km² (e.g. Nezahualcóyotl: 21.596, Iztacalco: 16.737, Cuauhtémoc: 16.477, Iztapalapa: 16.135).

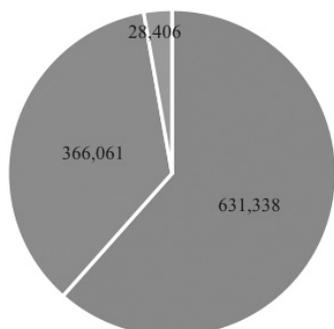
CANAL TRADICIONAL MEXICANO

En México el sector comercial comprende el 49,9% del total de unidades económicas de acuerdo al último Censo Económico (INEGI, 2009). De este porcentaje, el 46,7% de los establecimientos se dedica al comercio al detalle y el 3,2% restante al comercio al por mayor. Así mismo, 97% de las empresas que se dedican a la actividad comercial son microempresas (2-10 empleados).

De las 153 categorías en las que el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) clasifica al comercio, las tiendas de abarrotes o ultramarinos han reportado el mayor porcentaje de unidades económicas (31,2%) así como el 19,2% del total de personas empleadas (INEGI, 2009).

En el año, 2012 de acuerdo al Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2012) el comercio al por menor de abarrotes y alimentos en México estaba constituido por 1.025.805 establecimientos económicos divididos de la siguiente manera:

GRÁFICO 1
NÚMERO DE ESTABLECIMIENTOS INVOLUCRADOS EN EL COMERCIO DETALLISTA DE ABARROTES Y ALIMENTOS



■ Grocery stores ■ Other food retail ■ Convenience and department stores

FUENTE: INEGI (2012).

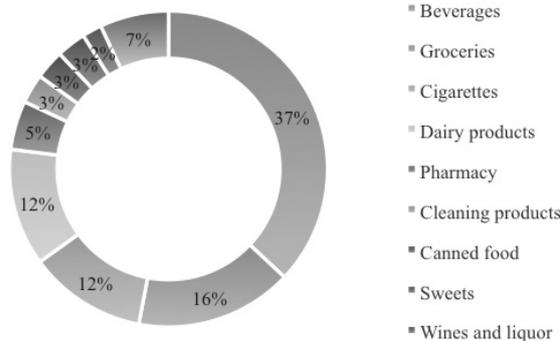
Las tiendas de abarrotes, también conocidas como nano-tiendas, desempeñan un papel importante en la economía de México. De igual forma, juegan un rol clave en el desarrollo económico y social de un sector de la población en desventaja. Además de este importante rol económico y social, el canal tradicional es muy atractivo para varias empresas productoras y distribuidoras, cuyas ventas asociadas con este canal representan entre el 48% y 70% del total de sus ventas. (GS1, 2012).

La gran mayoría de estos establecimientos son operados por el dueño del negocio o algún familiar y gene-

ralmente exhiben sus productos en un ambiente del hogar, que a su vez suele cumplir la función de almacén. Esta característica hace que el espacio disponible para almacenamiento no sea suficiente para almacenar grandes cantidades de producto. Adicionalmente a esta restricción, existe otra de liquidez. Las nano-tiendas operan sobre una base del día a día, es decir, que la inversión para adquirir nuevos productos se obtiene de las ventas del día anterior. Esto implica que la cantidad de productos a pedir se vea fuertemente limitada por la disponibilidad de efectivo al momento de la compra. Estas particularidades propias de las nano-tiendas obligan a las empresas fabricantes y distribuidoras a entregar volúmenes pequeños a una mayor frecuencia (2 o 3 veces por semana). El ingreso promedio mensual de una tienda con estas características oscila alrededor de 2.000 USD con un número promedio de 1.550 SKUs (Pulso Estratégico, 2012).

No existe una estructura de consolidación, la tienda recibe múltiples entregas de diferentes empresas proveedoras en el transcurso del día. Los productos de mayor venta son: bebidas, cigarrillos, leche, cerveza y pan (Pulso Estratégico, 2012) como se muestra en el gráfico 2.

GRÁFICO 2
PRODUCTOS DE MAYOR CONSUMO EN LAS TIENDAS DE ABARROTES



FUENTE: Pulso Estratégico (2012).

En la Zona Metropolitana del Valle de México existen 105.156 tiendas de abarrotes o nano-tiendas. Por otro lado, 2.578 establecimientos son parte del canal moderno, es decir, por cada tienda de conveniencia existen 41 nano-tiendas en el área metropolitana. Existen 185 personas por cada nano-tienda en esta región. Sin embargo, algunas delegaciones y municipios experimentan una densidad superior a las 300 personas/tienda. De la misma manera, en la ZMVM hay 46 nano-tiendas por kilómetro cuadrado con algunas delegaciones y municipios con más de 100 tiendas por Km².

Desde el punto de vista de las compañías, la distribución de última milla para atender al canal tradicional es realizada desde centros de distribución ubicados estratégicamente a lo largo y ancho de la zona metro-

politana de la Ciudad de México. El número de centros de distribución varía de compañía a compañía al igual que el número de vehículos de entrega. En general, las empresas fabricantes de bienes de consumo poseen entre 5 y 8 centros de distribución en el área metropolitana y una flotilla de 50 camiones, en promedio, por cada centro de distribución. Cada día los camiones de reparto tienen asignado un territorio geográfico o ruta y visitan entre 30 y 50 tiendas en promedio. La operación de última milla consiste en dos procesos: preventa y entrega

✓ La preventa se ejecuta un día antes de la entrega del producto a la tienda. Los agentes de ventas dejan el centro de distribución con una lista de tiendas a visitar. Durante la visita el dueño de la tienda acuerda con el agente de venta el pedido a ser entregado al día siguiente. Esta información se registra inmediatamente en sistema para luego ser descargado por el personal de operaciones. Con esta información y el apoyo de software de ruteo el líder de operación asigna los productos solicitados a los camiones tomando en cuenta diferentes restricciones como cantidad de cajas, volumen y peso.

✓ El día de la entrega por la mañana al conductor del camión y al ayudante se les provee una lista con los clientes a visitar y los productos a entregar. El conductor elige la secuencia de visitas en base principalmente a su experiencia. Al terminar de distribuir los productos el vehículo retorna al centro de distribución y el chofer debe rendir cuentas por el dinero recibido y el producto entregado.

PROBLEMA DE DISEÑO DE TERRITORIOS Y ALGORITMOS DE SOLUCIÓN

Uno de los problemas más relevantes que las empresas de la industria de bienes de consumo enfrentan periódicamente es cómo segmentar o dividir geográficamente sus clientes, nano-tiendas en este caso, en territorios o rutas con el objetivo de distribuir eficientemente sus productos. Este problema se conoce como el problema de diseño de territorios (TDP, *Territory Design Problem*). Un TDP puede ser visto como el problema de agrupar unidades básicas (e.g. clientes, manzanas o códigos postales) en subconjuntos de acuerdo a criterios específicos de planificación (López-Pérez y Ríos-Mercado, 2013). Estos subconjuntos se conocen como territorios, rutas, distritos o *clusters*. La definición geográfica del problema también incluye otras restricciones espaciales. Estas restricciones reflejan una serie de criterios de sentido común. Una de ellas consiste en equilibrar el volumen de entregas entre los territorios. Además, los territorios obtenidos deben ser contiguos y geográficamente compactos (Novaes *et al.*, 2009).

Cada territorio o ruta es atendido por un solo vehículo de carga. Para evitar que en cierto día algunos camiones terminen de visitar a los clientes asignados muy temprano y otros muy tarde generando descontento entre los trabajadores, se requiere que el volumen de entregas asignado a los camiones en términos de pe-

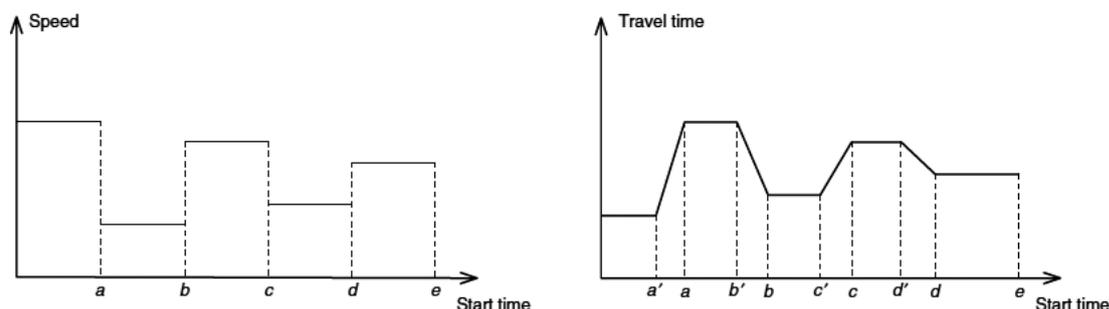
so o cantidad de unidades de carga sea equilibrado. Esto se traduce en equilibrar o balancear los volúmenes de entrega asociados con los territorios. También es muy importante la compacidad, por la cual clientes que comparten un mismo territorio están cerca entre sí tanto como sea posible. Por último, el criterio de contigüidad evita la asignación de un cliente dado a dos territorios diferentes. En general, además de los criterios básicos de equilibrio, compacidad y contigüidad, no hay un conjunto de criterios generales comunes a todos los problemas de diseño de territorios (Novaes *et al.*, 2009).

Dependiendo del contexto del problema, los problemas de diseño de territorios pueden ser vistos como problemas de conformación de distritos (DP, *districting problem*) (López-Pérez y Ríos-Mercado, 2013). Los problemas de conformación de distritos se asocian con varias aplicaciones prácticas. La conformación de distritos políticos, en el que uno está interesado en la definición de límites políticos/electorales, ha recibido mucha atención en la literatura (Bozkaya *et al.*, 2003; Hojati, 1996; Mehrotra *et al.*, 1998; Ricca & Simeone, 2008; Ricca *et al.*, 2008, 2011; Tasnádi, 2011; Williams, 1995). La conformación de distritos escolares (Caro *et al.*, 2004; Schoepfle & Church, 1991), conformación de distritos policiales (Curtin *et al.*, 2010; D'Amico *et al.*, 2002; Zhang & Brown, 2013) y conformación de distritos de ventas (Boots & South, 1998; Kalcsics *et al.*, 2002; Zoltners & Lorimer, 2000; Zoltners & Sinha, 2005) son otras áreas de interés científico. En los últimos años, la conformación de distritos comerciales y logísticos (Caballero-Hernández *et al.*, 2007; Galvão *et al.*, 2006; Haugland *et al.*, 2007; López-Pérez & Ríos-Mercado, 2013; Novaes *et al.*, 2000, 2009; Ríos-Mercado & Salazar-Acosta, 2011; Ríos-Mercado & Fernández, 2009; Ríos-Mercado & López-Pérez, 2013; Salazar-Aguilar *et al.*, 2011a, 2012, 2013, 2011b; Suárez *et al.*, 2005) ha recibido mucha atención de la comunidad científica.

Muchos de los problemas de diseño de territorios de entrega se resuelven por medio de modelos de programación matemática (Suárez *et al.*, 2005; Haugland *et al.*, 2007; Ríos-Mercado & Fernández, 2009; Ríos-Mercado & Salazar-Acosta, 2011; Salazar-Aguilar *et al.*, 2011b; Salazar-Aguilar *et al.*, 2011a; Salazar-Aguilar *et al.*, 2012; Salazar-Aguilar *et al.*, 2013) mientras que otros utilizan el enfoque de aproximación continua el cual se basa en la densidad espacial y la distribución de la demanda (Novaes *et al.*, 2000; Galvão *et al.*, 2006; Novaes *et al.*, 2009).

De acuerdo con la revisión de la literatura, el equilibrio del volumen de entrega y/o cantidad de clientes entre los territorios es crítico para un buen diseño de territorios. De acuerdo a nuestro mejor conocimiento, ninguno de los artículos existentes en la literatura busca balancear el tiempo que los camiones distribuyen los productos. El tiempo total de distribución de un camión en un día en particular está compuesto por el tiempo de ida al territorio (tiempo necesario para llegar al territorio de entrega desde el centro de distribución), el tiempo de servicio (tiempo requerido para descargar

GRÁFICO 3
PERFIL DE VELOCIDADES Y FUNCIÓN DE TIEMPO DE TRÁNSITO



FUENTE: DABIA *et al.* (2013).

los productos del camión, trasladarlos a la tienda, entregarlos a la persona encargada y recibir el pago), el tiempo de tránsito (tiempo necesario para trasladarse entre tiendas) y el tiempo de regreso (tiempo necesario para volver al centro de distribución desde el territorio). Equilibrar el volumen de entrega implica equilibrar el tiempo de servicio debido a que este tiempo depende directamente del volumen suministrado. Sin embargo, los otros componentes del tiempo de distribución y por ende el tiempo total de distribución entre camiones permanece en desequilibrio originando insatisfacción entre trabajadores. Aún más, como se mencionó anteriormente, la congestión es un problema serio en zonas urbanas altamente pobladas lo cual causa que los camiones pasen más tiempo en las calles trasladándose que entregando los productos en las tiendas. Por lo tanto para un buen diseño de territorios en zonas urbanas de alta densidad poblacional el equilibrio del volumen de entrega no es suficiente. Es necesario también equilibrar el tiempo total de distribución.

En resumen, nuestro problema de diseño de territorios de entrega consiste en agrupar áreas geográficas o unidades básicas a territorios o rutas. Cada unidad básica debe pertenecer a un solo territorio. Además, los territorios deben ser compactos. Para cada unidad básica se conocen las coordenadas geográficas, cantidad de clientes, volumen a entregar (en kilogramos) y tiempo de servicio (en minutos). Cada territorio tiene asociado dos atributos medibles, el volumen de entrega y el tiempo (total) de distribución. Estos atributos se calculan sumando los valores correspondiente de las unidades básicas que pertenecen al territorio. Como se mencionó anteriormente, los territorios deben estar balanceados con respecto al volumen de entrega y tiempo de distribución. Estas restricciones de balanceo se modelan mediante el cálculo desviaciones con respecto a la media.

ALGORITMO PROPUESTO ↓

Como se describió anteriormente, las técnicas de diseño de territorios de entrega a tiendas de abarrotes del canal tradicional no toman en cuenta las condi-

ciones predominantes en zonas urbanas altamente pobladas. En esta sección se describe un algoritmo de agrupamiento que considera explícitamente estos factores. El efecto de la congestión se incorpora por medio de un perfil de velocidades el cual está asociado con la real vial de la ciudad. Los clientes se asignan al nodo más cercano (intersección de segmentos de calle) y el problema se reduce a agrupar los nodos satisfaciendo las restricciones de capacidad de los vehículos y tiempo de trabajo.

El algoritmo se basa en la red vial de una ciudad. Esta red esta formada por nodos (intersecciones de calles) y arcos (segmentos de calle entre intersecciones). Los clientes o tiendas al detalle se asignan al nodo más cercano, es decir, las tiendas en una calle particular se asignan a la esquina más cercana. En consecuencia, cada nodo tiene dos atributos: volumen de entrega y tiempo de servicio. Estos atributos se calculan sumando los valores de volumen de entrega y tiempo de servicio de los clientes asignados al nodo.

Como se mencionó, el efecto de la congestión se incluye por medio de un perfil de velocidades. Este perfil muestra como varía la velocidad vehicular a lo largo del día en cada arco de la red vial. En consecuencia, existe un perfil de velocidades diferente para cada arco de la red. El perfil de velocidades divide el día en intervalos de tiempo, cada uno de ellos con velocidad constante. Este perfil se traduce a una función de tiempo de tránsito. El gráfico 3 muestra un perfil de velocidades y su correspondiente función de tiempo para algún arco (i, j) . El perfil de velocidades muestra la velocidad esperada en el arco (i, j) a una hora particular del día y la función de tiempo muestra el tiempo esperado para trasladarse de i a j saliendo de i a una hora particular.

En base a esta información, el algoritmo calcula un árbol desde y hacia el origen (centro de distribución) usando un algoritmo Dijkstra dependiente del tiempo (Dijkstra TD) (Sung *et al.*, 2000) y un algoritmo Dijkstra en reversa dependiente del tiempo (TD Dijkstra en reversa) respectivamente. El árbol desde el origen es una colección de rutas de tiempo de viaje mínimo entre el centro de distribución y el resto de los nodos de la red.

Por el contrario, el árbol hacia el origen es una colección de rutas de tiempo mínimo entre los nodos de la red y el centro de distribución. En consecuencia, dada una hora específica de salida del centro de distribución, el algoritmo calcula la hora de llegada de los vehículos de reparto a cada uno de los nodos de la red vial para lo cual los vehículos siguieron la ruta que minimiza el tiempo de traslado. Del mismo modo, dada una hora de llegada específica al centro de distribución, el algoritmo en reversa calcula la hora a la cual los vehículos deberían dejar los nodos para llegar a tiempo al centro de distribución. La diferencia entre estas dos horas (hora de llegada al nodo y hora a la cual se debe dejar el mismo) representa la restricción de tiempo impuesta a un vehículo particular para visitar a los clientes y hacer las entregas en un nodo en particular.

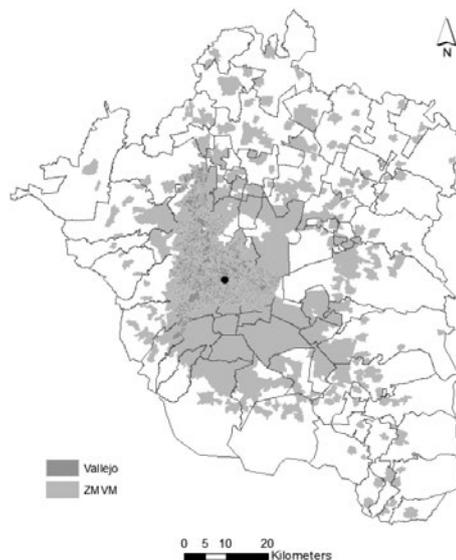
Una vez calculados los árboles dependientes del tiempo (hacia y desde el origen) y en consecuencia el tiempo máximo de trabajo por nodo, se utiliza un algoritmo de recorrido de árbol. El recorrido de árbol se refiere al proceso de visitar cada nodo del árbol, exactamente una vez, de una manera sistemática. En ese sentido, se aplica el algoritmo de orden posterior al árbol hacia el origen el cual recorre el árbol siguiendo una secuencia conocida como post-order.

Por último, el algoritmo de agrupamiento recorre el árbol siguiendo la secuencia establecida. Cada vez que se visita un nuevo nodo, el volumen de entrega y el tiempo de trabajo se acumulan. Como se dijo anteriormente, el volumen de entrega y el tiempo de servicio para cierto nodo se calculan sumando los valores de los clientes asignados al nodo. El árbol desde el origen proporciona información sobre la hora de llegada al nodo. De manera similar, el tiempo de tránsito de nodo a nodo se calcula utilizando la red vial y el perfil de velocidades. Cuando el volumen de entrega acumulado o el tiempo de trabajo acumulado del nodo y de los nodos visitados anteriormente supera la capacidad disponible del vehículo o el tiempo máximo de trabajo respectivamente, el algoritmo agrupa a los nodos visitados previamente para conformar un territorio. De lo contrario, el volumen de entrega y el tiempo se acumulan, y el nodo se etiqueta como visitado. De esta manera el algoritmo garantiza soluciones factibles en todo momento.

CASO DE ESTUDIO ↓

En esta sección se presenta un caso de estudio de una empresa distribuidora de cervezas que atiende a la Zona Metropolitana del Valle de México. Particularmente el caso de estudio se enfoca en un centro de distribución el cual se encuentra en la zona norte del Distrito Federal. La zona, denominada Vallejo, es una de las principales zonas industriales de la ciudad con aproximadamente 500 industrias de diferentes tamaños y sectores. El centro de distribución de Vallejo es el principal centro de distribución de la empresa (ver figura 2). Comprende un área de 466 Km² la cual se encuen-

FIGURA 2
AREA COVERED BY VALLEJO'S DISTRIBUTION CENTER



FUENTE: Elaboración propia.

tra dividida actualmente en 43 territorios de entrega y atiende a 9.443 clientes que demandan más de 30.000 pedidos por mes.

El proceso de diseño de territorios de entrega en la empresa bajo estudio implica principalmente el uso de software especializado. La persona responsable inicia el proceso descargando información sobre las entregas de los últimos seis meses. Esta información es el componente principal del proceso y el diseño de territorios depende en gran medida de ello. Además de información de entregas, el software requiere información del tiempo de servicio (fijo y variable) y velocidad promedio de los vehículos de carga para 3 escenarios (lento, medio y rápido). Con la información requerida disponible a la mano, la persona responsable define el número de territorios de entrega a construir o el cumplimiento de alguna meta (volumen de entrega o número de clientes). El software simula los territorios y proporciona un diseño preliminar. A continuación cada territorio se ajusta manualmente añadiendo o quitando clientes para hacer que los territorios se ajusten mejor a la topología de la zona. Finalmente, el equipo de operaciones y los conductores de vehículos revisan el diseño y después de algunos cambios dan su aprobación.

La compañía ha dividido la zona de Vallejo en 43 territorios o rutas como se ve en la Figura 5. Si bien actualmente los territorios se atienden con camiones de reparto de diferentes capacidades, la mayoría de ellos (21 de 43) tienen la misma capacidad disponible (11 ton.). En este sentido, por simplicidad se asume una flota homogénea con una capacidad máxima de 11 ton. (66 ton. a la semana). Así mismo se optó por la semana como unidad de tiempo para el análisis. La información acerca del volumen de entregas y el tiem-

po de distribución para la situación actual se muestra en la siguiente tabla.

CUADRO 2 ESTADÍSTICA DE LA SITUACIÓN ACTUAL	
Volumen de entrega promedio (Kg)	25.294
Coefficiente de variación del volumen de entrega	35,4%
Tiempo de distribución promedio (min)	3.652
Coefficiente de variación del tiempo de distribución	32,5%
Número de territorios	43
Cantidad promedio de clientes	220

FUENTE: Elaboración propia.

Bajo las condiciones actuales un vehículo de reparto de la compañía, en promedio, visita 220 clientes a la semana (»37 clientes por día), entrega 25.294 Kilogramos de cerveza y pasa 3.652 minutos a la semana en promedio distribuyendo sus productos (»10,1 horas por día). Además de los valores promedio, también se incluyen medidas de dispersión para determinar el grado de balanceo de los territorios en términos de volumen de entrega y tiempo. Específicamente se calculó el coeficiente de variación³. Un diseño totalmente balanceado implicaría que todos los territorios tengan exactamente el mismo volumen de entrega o tiempo de distribución por lo que el coeficiente de variación sería igual a 0%. Para la situación actual el coeficiente de variación del volumen de entrega es 35,4% y del tiempo de distribución es 32,5%. Estos valores muestran un área de oportunidad en el balanceo de los territorios de la compañía.

**FIGURA 3
DISEÑO ACTUAL DE TERRITORIOS DE ENTREGA**



FUENTE: Elaboración propia.

La red vial para Vallejo se obtuvo de *Open Street Map* (OSM, 2014). Esta red consta de 62.835 nodos (intersecciones de calles) y 128.109 arcos (segmentos de

calle entre intersecciones) que representan 11.241 Kilómetros de longitud.

De acuerdo a la Secretaría de Movilidad (SEMOVI, 2014), en un día cualquiera en el Distrito Federal existen tres intervalos de tiempo que experimentan mayor tráfico de vehículos: en la mañana (6:30 – 9:30 a.m.), a medio día (12:00 – 3:00 p.m.) y por la noche (6:30 – 9:30 p.m.). Estos intervalos de tiempo representan los horarios en los cuales el grueso de la población inicia su jornada trasladándose al trabajo y/o escuela, pasa a la escuela por los niños y regresa a sus hogares al terminar sus actividades laborales. En ese sentido para calcular el perfil de velocidades se dividió el día en 5 intervalos de tiempo: los tres intervalos mencionados y los periodos de tiempo que caen entre esos intervalos.

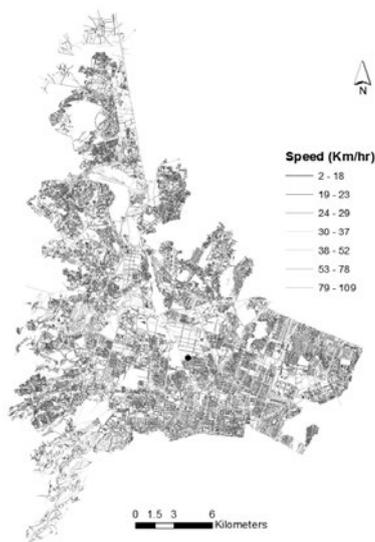
La velocidad promedio de tránsito sin congestión vehicular para cada segmento de calle de la red vial se calculó usando el API⁴ de Matriz de Distancias de Google (Google, 2014). Esta API es un servicio que proporciona la distancia y el tiempo de viaje para un conjunto de orígenes y destinos. La información proporcionada se basa en la ruta recomendada entre un punto de origen y otro de destino tal como funciona el API de Google Maps. En nuestro caso el punto de origen es la coordenada de inicio de un arco y el punto de destino es la coordenada donde termina el arco. La API proporciona la longitud del arco en cuestión y el tiempo necesario para recorrerlo en condiciones normales (e.g. sin tráfico). Con estos valores se calcula la velocidad promedio de tránsito (sin congestión) a la cual se puede trasladar un vehículo en el arco. Los resultados para Vallejo se muestran en la Figura 4, en la página siguiente, y cuadro 3.

CUADRO 3 ESTADÍSTICA DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE VALLEJO	
Velocidad	Km/hr
Mínimo	1,4
Promedio	24,7
Máximo	120,6x

FUENTE: Elaboración propia.

Para calcular el efecto de la congestión o la velocidad promedio de tránsito con congestión vehicular se utilizó la API de Google Maps. En forma similar, se calculó la velocidad a partir de la distancia y el tiempo suministrado por la API. Sin embargo, en este caso se seleccionó una muestra (1.000 arcos) la cual se evaluó a diferentes horas del día de acuerdo a las horas pico de tráfico definidas anteriormente. En ese sentido, para cada arco de la muestra se obtuvieron 4 valores de tiempo de recorrido del arco y en consecuencia 4 velocidades de tránsito diferentes, una para cada intervalo de tiempo. Finalmente estos valores se dividieron entre aquellos correspondientes a los de velocidad sin tráfico y se promediaron de acuerdo a los intervalos de tiempo a los que pertenecen. Como resultado se obtuvieron los porcentajes que se muestran en el cuadro

FIGURA 4
DISEÑO ACTUAL DE TERRITORIOS DE ENTREGA



FUENTE: Elaboración propia.

4, los cuales representan el decremento de la velocidad en cierto lapso de tiempo comparada con la velocidad en condiciones sin tráfico.

CUADRO 4
ESTADÍSTICAS DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE VALLEJO

Intervalo de tiempo	Porcentaje
Mañana (6:30-9:30)	6.33
Fuera de pico (9:30-12:00 y 15:00-18:30)	3.92
Medio día (12:00-15:00)	5.18
Noche (18:30-21:30)	5.21

FUENTE: Elaboración propia.

Estos porcentajes multiplicados por la velocidad sin tráfico proporcionan el perfil de velocidades para cada arco de la red. El perfil de velocidades es imprescindible para aplicar los algoritmos dependientes del tiempo como vimos en secciones anteriores.

Con la red vial y el perfil de velocidades aplicamos los algoritmos Dijkstra y Dijkstra en reversa dependientes del tiempo a la zona de Vallejo. Al ser algoritmos dependientes del tiempo cada uno de ellos depende de una hora específica de inicio (salida) y de fin (llegada) respectivamente. En el caso del algoritmo Dijkstra el tiempo de salida se fijó a las 8:00 a.m. mientras que para el algoritmo Dijkstra en reversa el tiempo de llegada se estableció a las 6:00 p.m. En otras palabras, los vehículos de reparto dejan el centro de distribución a las 8 de la mañana y deben retornar a las 6 de la tarde de acuerdo a la información proporcionada por la compañía.

Resultado de aplicar los algoritmos dependientes del tiempo, se obtuvieron los árboles desde y hacia el ori-

gen. El primero provee información acerca de la hora de llegada y por ende el tiempo necesario para llegar a cada uno de los nodos de la red. El segundo árbol indica la hora a la cuál cierto vehículo de carga debería estar dejando un nodo de la red para arribar al centro de distribución a la hora determinada. Adicionalmente el árbol hacia el origen es la entrada para los algoritmos post-order y de agrupamiento. Como se describió anteriormente, el algoritmo de agrupamiento recorre el árbol siguiendo un orden posterior mientras conforma los diferentes territorios o rutas garantizando el cumplimiento de la capacidad del vehículo y la restricción de tiempo máximo de trabajo. Los territorios obtenidos se muestran en la siguiente figura:

FIGURA 5
TERRITORIOS DE ENTREGA OBTENIDOS POR EL ALGORITMO PROPUESTO



FUENTE: Elaboración propia.

Las estadísticas correspondientes a los resultados obtenidos por el algoritmo se muestran en el cuadro 5.

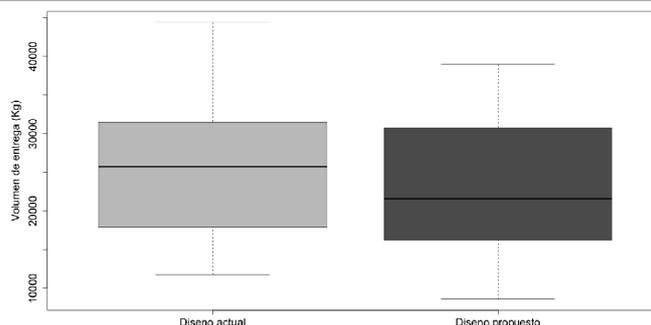
CUADRO 5
ESTADÍSTICAS CON EL ALGORITMO PROPUESTO

Volumen de entrega promedio (Kg)	24.719
Coefficiente de variación del volumen de entrega	47,3%
Tiempo de distribución promedio (min)	3.556
Coefficiente de variación del tiempo de distribución	17,7%
Número de territorios	44
Cantidad promedio de clientes	215

FUENTE: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en promedio un vehículo de carga visita a 215 clientes a la sema-

FIGURA 6
VOLUMEN DE ENTREGA

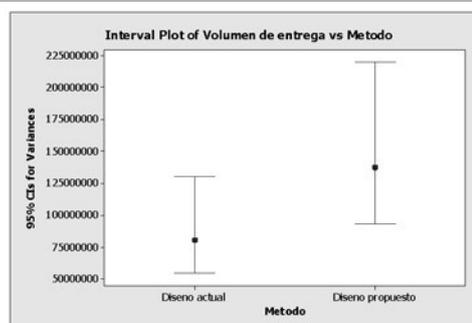


FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 7
PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL VOLUMEN DE ENTREGA

Test for Two Variances: Volumen de entrega vs Diseño				
Null hypothesis	Variance(Diseño actual) / Variance(Diseño propuesto) = 1			
Alternative hypothesis	Variance(Diseño actual) / Variance(Diseño propuesto) not = 1			
Significance level	Alpha = 0.05			
Statistics				
Diseño	N	Variance		
Diseño actual	43	8.02199E+07		
Diseño propuesto	44	1.36781E+08		
Tests				
Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	42	43	0.59	0.086
Levene's Test (any continuous)	1	85	0.13	0.721

a) Prueba de hipótesis para la igualdad de varianzas



b) Intervalo de confianza para varianzas

FUENTE: Elaboración propia.

na (» 36 por día), entrega 24.719 Kilogramos y necesita 3.556 minutos para distribuir los productos (- 9,9 horas por día). Los coeficientes de variación son 47,3% y 17,7% para el volumen de entrega y el tiempo respectivamente.

RESULTADOS

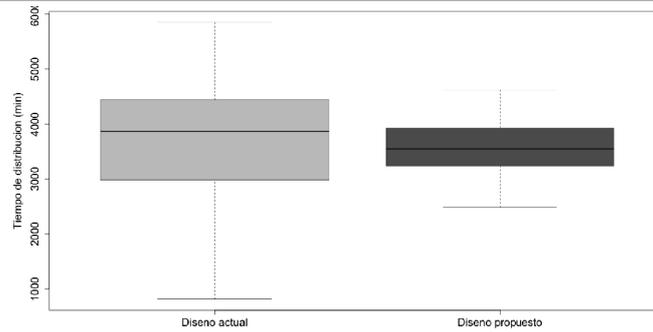
Como se definió anteriormente, a cada territorio se asocia un volumen de entrega y el tiempo de distribución. En las siguientes figuras se muestra una comparación del diseño actual de la compañía y el propuesto en términos a las medidas de desempeño.

La figura 7 muestra el volumen de entrega asociado con cada uno de los territorios de entrega para ambos diseños (situación actual y propuesta). Se puede observar que la variabilidad del volumen de entrega es bastante similar. Esta conclusión se puede confirmar con la prueba de hipótesis para igualdad de varianzas de la figura 9-a. Los resultados de esta prueba indican que no existen diferencias significativas entre las varianzas del volumen de entrega de ambos diseños ($p\text{-value} = 0.086$), lo cual significa que el diseño propuesto es tan bueno como el actual para balancear el volumen de entrega entre los territorios.

De igual forma, la figura 8, en la página siguiente, ilustra el tiempo de distribución asociado a cada uno de los territorios de entrega para el diseño actual y el propuesto. Se puede observar que la variabilidad del tiempo de distribución difiere entre ambos diseños. El diseño propuesto presenta una menor variabilidad en el tiempo de distribución. Es posible validar esta afirmación con la prueba de hipótesis para igualdad de varianzas de la figura 10-a. Los resultados de esta prueba sostienen que sí existen diferencias significativas entre las varianzas del tiempo de distribución de ambos diseños ($p\text{-value} = 0.000$). Se puede observar claramente en la figura 10-b que el diseño propuesto proporciona menores valores de varianzas, lo cual se traduce en territorios de entrega mejor balanceados desde el punto de vista del tiempo de distribución.

Adicionalmente la figura 10 muestra la comparación entre el diseño actual y el propuesto. En la gráfica se puede observar que algunos territorios tienen un algo grado de similitud mientras que otros son muy diferentes. El porcentaje de clientes que pertenecen al mismo territorio en ambos diseños o porcentaje de similitud se muestra en la figura 10c. En general, 47,6% de las tiendas pertenecen al mismo territorio en ambos diseños lo cual representa el 48.7% del volumen de entrega.

FIGURA 8
TIEMPO DE DISTRIBUCIÓN



FUENTE: Elaboración propia.

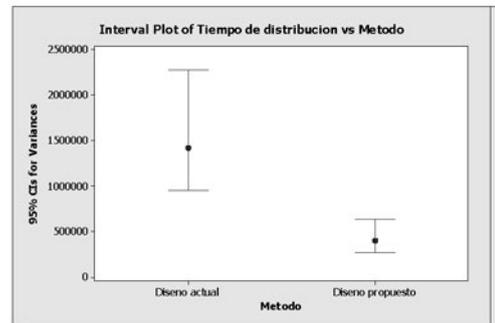
FIGURA 9
PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA AL VOLUMEN DE ENTREGA

Test for Two Variances: Tiempo de distribución vs Diseño

Null hypothesis Variance(Diseño actual) / Variance(Diseño propuesto) = 1
 Alternative hypothesis Variance(Diseño actual) / Variance(Diseño propuesto) not = 1
 Significance level Alpha = 0.05

Statistics		
Metodo	N	Variance
Diseño actual	43	1410204.197
Diseño propuesto	44	398432.099

Tests				
Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	42	43	3.54	0.000
Levene's Test (any continuous)	1	85	12.08	0.001

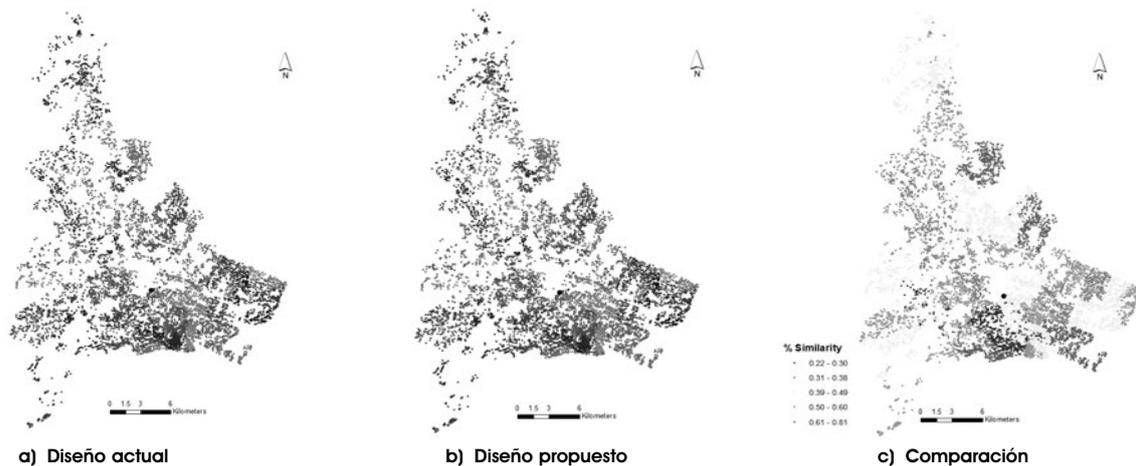


a) Prueba de hipótesis para la igualdad de varianzas

b) Material de confianza para varianzas

FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 10
COMPARACIÓN ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y LA PROPUESTA



FUENTE: Elaboración propia.

De forma similar, existen diferencias en la composición de la flota de camiones de ambos diseños. En la situación actual la mayoría de los vehículos de carga tienen una capacidad de 11 Ton. Por otra lado, el diseño propuesto requiere mayormente vehículos pequeños (4 Ton.) como se muestra en el cuadro 6, en la página siguiente)

CONCLUSIONES

En conclusión podemos mencionar:

- La exactitud de la información sobre las condiciones de tráfico, representada por medio del perfil de ve-

**CUADRO 6
COMPARACIÓN ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL
Y EL DISEÑO PROPUESTO**

Capacidad (Kg)	Situación actual	Diseño propuesto
4.000	8	27
4.500	2	2
5.500	5	5
6.000	5	4
7.000	1	4
11.000	21	2
11.500	1	0
Total	43	44

FUENTE: Elaboración propia.

locidades de la red vial, es crítica para modelar de forma realista el movimiento de vehículos de carga. Vale la pena invertir recursos para obtener estos datos. Si el costo de adquirir esta información es prohibitivo o no es factible obtener esta información para cada calle de una ciudad, una muestra representativa podría ser buena opción. Esta muestra debe incluir al menos las vías principales que experimentan mayor congestión y potencialmente afectan el tiempo que los vehículos de carga entregan sus productos.

- El diseño propuesto es tan bueno como el diseño actual para balancear el volumen de entrega entre los territorios o rutas de entrega. Adicionalmente el diseño propuesto proporciona territorios de entrega mejor balanceados desde el punto de vista del tiempo de distribución. El tiempo de entrega es una variable sensible en zonas urbanas altamente densas donde la congestión vehicular tiene un efecto considerable en los tiempos de traslado.

- En general, 47,6% de las tiendas de abarrotes o nano-tiendas pertenecen al mismo territorio de entrega en ambos diseños (actual y propuesto) lo cual representa el 48,7% del volumen de entrega.

- En la situación actual la mayoría de los vehículos de carga tienen una capacidad de 11 Ton. Por lo contrario, el diseño propuesto requiere mayormente vehículos pequeños (4 Ton.). Lo cual se puede traducir en ahorro de costos para la compañía.

NOTAS ¶

- [1] Producto interno bruto.
- [2] Las ciudades grandes se definen como aquellas con una población mayor o igual a 200.000 habitantes.
- [3] El coeficiente de variación (C.V.) se define como el cociente entre la desviación estándar σ y la media μ .
- [4] Interfaz de programación de la aplicación (API, *Application Programming Interface*)

BIBLIOGRAFÍA ¶

BLANCO, E. y Fransoo, J. (2013). DABIA«Reaching 50 million nanostores: Retail distribution in emerging megacities». *TUE Working Paper*, n° 404).

BOZKAYA, B.; ERKUT, E y Laporte, G. (2003). «A tabu search heuristic and adaptive memory procedure for political districting». *European Journal of Operational Research*, vol. 144, n° 1, pp. 12-26.

BOOTS, B Y SOUTH, R. (1998). «Modeling retail trade areas using higher-order, multiplicatively weighted Voronoi diagrams.» *Journal of Retailing*, vol. 73, n° 4, pp. 519-536.

CABALLERO-HERNÁNDEZ, SI.; RÍOS-MERCADO, R.Z.; LÓPEZ, F. y SCHAEFFER, S.E. (2007, November). «Empirical evaluation of a metaheuristic for commercial territory design with joint assignment constraints». In *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications, and Practice (IJIE)* (pp. 422-427).

CARO, F.; SHIRABE, T.; GUIGNARD, M. y WEINTRAUB, A. (2004). «School redistricting: Embedding GIS tools with integer programming». *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55, n° 8, pp. 836-849.

CURTIN, K.M.; HAYSLETT-MCCALL, K. y Qiu, F. (2010). «Determining optimal police patrol areas with maximal covering and backup covering location models». *Networks and Spatial Economics*, vol. 10(1), 125-145.

DABIA S.; ROPKE, S.; VAN WOENSEL, T.; y DE KOK, T. (2013). «Branch and price for the time dependent vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, n° 47(3), pp. 380-396.

D'AMICO, S.J.; WANG, S.J.; BATTÀ, R. y RUMP, C.M. (2002). «A simulated annealing approach to police district design». *Computers & Operations Research*, vol. 29, n° 6, pp. 667-684.

DÍAZ, A.; LA CAYO, J.A. y SALCEDO, L. (2007). «Selling to mom-and-popstores in emerging markets». *The McKinsey Quarterly*, n° 71-81.

GALVÃO, L.C.; NOVAES, A.G., DE CURSI, J.S. y SOUZA, J.C. (2006). «A multiplicatively-weighted Voronoi diagram approach to logistics districting». *Computers & Operations Research*, vol. 33, n° 1, pp. 93-114.

GOOGLE – Google Distance Matrix API (2014). URL <https://developers.google.com/maps/documentation/distancematrix/>. [Online; accessed 25-Nov-2014].

GS1 (2012). *Comercio tradicional en México. La tiendita de la esquina*.

HAUGLAND, D.; HO, S.C. y LAPORTE, G. (2007). «Designing delivery districts for the vehicle routing problem with stochastic demands». *European Journal of Operational Research*, vol. 180, n° 3, pp. 997-1010.

HOJATI, M. (1996). «Optimal political districting. *Computers & Operations Research*, vol. 23, n° 12, pp. 1147-1161.

INEGI – Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2009). *Censos económicos 2009*.

INEGI – Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2010). *Censo de población y vivienda 2010*.

INEGI – Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2012). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, 2012*.

KALCSICS, J.; MELO, T.; NICKEL, S. y Gündra, H. (2002, January). «Planning sales territories - a facility location approach». In *Operations Research Proceedings 2001* (pp.141-148). Springer Berlin Heidelberg.

KHANNA, T. y PALEPU, K.G. (2006). «Emerging giants: Building world-class companies in developing countries». *Harvard business review*, vol. 84, n° 10.

KHANNA, T. y PALEPU, K. G. (2010). *Emerging giants: Competing at home*. Harvard Business Press, Boston: MA.

- LENARTOWICZ, T. y BALASUBRAMANIAN, S. (2009). «Practices and performance of small retail stores in developing economies». *Journal of International Marketing*, vol. 17(1), 58-90.
- LÓPEZ-PÉREZ, J.F. y RÍOS-MERCADO, R.Z. (2013). «Embotelladoras ARCA uses operations research to improve territory design plans». *Interfaces*, vol. 43, n° 3, pp. 209-220.
- MEHROTRA, A.; JOHNSON, E.L y NEMHAUSER, G.L. (1998). «An optimization based heuristic for political districting». *Management Science*, vol. 44, n° 8, pp. 1100-1114.
- MGI – Mckinsey global institute (2011). *Building globally competitive cities: The key to Latin American growth*.
- MGI – Mckinsey Global Institute (2013). *Urban world: The shifting global business landscape*.
- NOVAES, A.G.; DE CURSI, J.E.S. y GRACIOLLI, O.D. (2000). «A continuous approach to the design of physical distribution systems». *Computers & Operations Research*, vol. 27, n° 9, pp. 877-893.
- NOVAES, A.G.; DE CURSI, J.S.; DA SILVA, A.C y SOUZA, J.C. (2009). «Solving continuous location-districting problems with Voronoi diagrams». *Computers & Operations Research*, vol. 36, n° 1, pp. 40-59.
- OSM – Open Street Map (2014). URL <http://www.openstreetmap.org>. [Online; accessed 15-Oct- 2014].
- PULSO ESTRATÉGICO (2012). *Radiografía de las ventas*.
- RICCA, F. y SIMEONE, B. (2008). «Local search algorithms for political districting». *European Journal of Operational Research*, vol. 189, n° 3, pp. 1409-1426.
- RICCA, F.; SCOZZARI, A. y SIMEONE, B. (2008). «Weighted Voronoi region algorithms for political districting». *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 48, n° 9, pp. 1468-1477.
- RICCA, F., SCOZZARI, A. y SIMEONE, B. (2013). «Political Districting: from classical models to recent approaches». *Annals of Operations Research*, vol. 204, n° 1, pp. 271-299.
- RÍOS-MERCADO, R.Z. Y FERNÁNDEZ, E. (2009). «A reactive GRASP for a commercial territory design problem with multiple balancing requirements». *Computers & Operations Research*, vol. 36, n° 3, pp. 755-776.
- RÍOS-MERCADO, R. y SALAZAR-ACOSTA, J. (2011). «A GRASP with strategic oscillation for a commercial territory design problem with a routing budget constraint». *Advances in Soft Computing*, pp. 307-318.
- RÍOS-MERCADO, R.Z. y LÓPEZ-PÉREZ, J.F. (2013). «Commercial territory design planning with realignment and disjoint assignment requirements». *Omega*, vol. 41, n° 3, pp. 525-535.
- SALAZAR-AGUILAR, M.A.; RÍOS-MERCADO, R.Z. y GONZÁLEZ-VELARDE, J.L. (2011a). «A bi-objective programming model for designing compact and balanced territories in commercial districting». *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, n° 5, pp. 885-895.
- SALAZAR-AGUILAR, M.A., RÍOS-MERCADO, R.Z. y CABRERA-RÍOS, M. (2011b). «New models for commercial territory design». *Networks and Spatial Economics*, vol. 11, n° 3, pp.487-507.
- SALAZAR-AGUILAR, M. A., RÍOS-MERCADO, R. Z., GONZÁLEZ-VELARDE, J.L. y Molina, J. (2012). «Multiobjective scatter search for a commercial territory design problem». *Annals of Operations Research*, vol. 199, n° 1, pp. 343-360.
- SALAZAR-AGUILAR, M.A., RÍOS-MERCADO, R.Z. y GONZÁLEZ-VELARDE, J. L. (2013). «GRASP strategies for a bi-objective commercial territory design problem». *Journal of Heuristics*, vol. 19, n° 2, pp. 179-200.
- SEMOM - Secretaría de Movilidad (2014). URL http://www.semovi.df.gob.mx/wb/stv/vialidades_con_mayor_y_menor_saturacion_vehiculo.html. [Online; accessed 20-Nov-2014].
- SCHOEPFLE, O.B. y CHURCH, R. L. (1991). «A new network representation of a "classic" school districting problem». *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 25, n° 3, pp.189-197.
- SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL (SEDESOL), Consejo Nacional de Población (CONAPO) e INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI) (2010). *Delimitación de zonas metropolitanas de México 2010*.
- SUÁREZ, L.V.; RÍOS-MERCADO, R. y LÓPEZ, F. (2005). «Usando GRASP para resolver un problema de deficiencia de territorios de atención comercial. In *Proceedings of the IV Spanish Conference on Metaheuristics, in: Evolutionary and Bioinspired Algorithms*, volume 2.
- SUNG, K.; BELL, M.G.; SEONG, M. y PARK, S. (2000). «Shortest paths in a network with time-dependent flow speeds». *European Journal of Operational Research*, vol. 121, n° 1, pp. 32-39.
- TASNÁDI, A. (2011). «The political districting problem: A survey». *Society and Economy*, vol. 33, n° 3, pp. 543-554.
- WILLIAMS, J.C. (1995). «Political redistricting: a review». *Papers in Regional Science*, vol. 74, n° 1, pp.13-40.
- ZHANG, Y. y BROWN, D.E. (2013). «Police patrol districting method and simulation evaluation using agent-based model & GIS». *Security Informatics*, vol. 2, n° 1 pp. 1-13.
- ZOLTNER, A.A. y LORIMER, S.E. (2000). «Sales territory alignment: An overlooked productivity tool». *Journal of Personal selling & sales Management*, vol. 20, n°3, pp. 139-150.
- ZOLTNER, A.A. y SINHA, P. (2005). «The 2004 ISMS Practice Prize Winner-Sales territory design: Thirty years of modeling and implementation». *Marketing Science*, ol. 24, n° 3, pp. 313-331.