





Descubriendo la infraestructura de la red móvil en México utilizando datos colaborativos Uncovering mobile network infrastructure in Mexico using crowdsourced data

Laura Ivonne Contreras Potenciano ¹  - Catalina Ovando ²  - Zoraida Frías ³  

¹ Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

² Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México

³ Universidad Politécnica de Madrid

✉ Autora de correspondencia: lauraiivonne.contreras@upaep.edu.mx

Recepción: 13-07-2021 / Aceptación: 25-10-2021

© Nova Scientia, bajo licencia Creative Commons

Resumen

Se sabe que el acceso a las telecomunicaciones móviles —y, a través de ellas, al Internet— puede brindar mayor bienestar social. En este sentido, recientemente, dentro del sector de las telecomunicaciones se registró una demanda creciente en el uso y acceso a los servicios. Lo anterior genera la necesidad de que los operadores móviles expandan y aumenten la capacidad de sus redes de telecomunicaciones. Para lograrlo, es importante analizar las estrategias de aumento de capacidad y de cobertura de la infraestructura móvil de los principales operadores móviles. En este estudio, se realizó un análisis longitudinal de la densidad de los nodos por área geográfica a nivel municipal. También se analizaron los cuatro principales operadores móviles con red en México, a partir de datos colaborativos (*crowdsourced data*). Los datos se filtraron por tecnología LTE y se realizó una correspondencia entre los nodos y las bandas de frecuencia utilizadas por cada operador. Se analizaron las estrategias de aumento de capacidad de la red de los operadores y el porcentaje de uso de las bandas de frecuencia que cada operador tiene asignadas. Como resultado, se obtuvo que los principales operadores móviles con red en México han seguido una estrategia de cobertura similar. En los datos analizados no se encontró una correlación positiva entre la densidad de nodos y las características tecnológicas de las bandas de frecuencia. Se sugiere invertir en infraestructura nueva para el despliegue de nuevas tecnologías, y fomentar la cobertura móvil en zonas rurales. Por último, se recomienda facilitar a los operadores la arrendación de bandas en diversas frecuencias que permitan aprovechar las características tecnológicas de las mismas, mediante costos alineados al mercado internacional.

Palabras clave: estrategias de despliegue; Operadores Móviles en Red (OMR); LTE; datos colaborativos; comunicación; telecomunicaciones; Internet; red; tecnología; infraestructura móvil; cobertura móvil; conectividad

Abstract

It is known that access to mobile telecommunications, and through them to the Internet, can provide greater social well-being. Likewise, within the telecommunications sector there was a growing demand in the use and access to services. This generates the need for mobile operators to expand and increase the capacity of their telecommunications networks. In order to achieve this, it is important to analyze the strategies for increasing the capacity and coverage of the mobile infrastructure of the main mobile operators. A longitudinal analysis of the node density by geographic area was carried out at the municipal level. Likewise, the four main mobile operators with a network in Mexico were analyzed using crowdsourced data. Also, the data was filtered by LTE technology and a correspondence was made between the nodes and the frequency bands used by each operator. The operators' network capacity increase strategies and the percentage of use of the frequency bands assigned to each operator were analyzed. As a result, the main mobile network operators in Mexico have followed a similar coverage strategy. Likewise, in the analyzed data, a positive correlation was not found between node densification and the technological characteristics of the frequency bands. It is suggested to invest in new infrastructure for the deployment of new technologies, and to promote mobile coverage in rural areas. Finally, it is suggested to facilitate the leasing of bands on various frequencies that allow operators to take advantage of their technological characteristics; through costs that are aligned with the international market.

Keywords: deployment strategies; Mobile Network Operators (MNO); LTE; crowdsourced data; communication; telecommunications; Internet; net; technology; mobile infrastructure; mobile coverage; connectivity

1. Introducción

El progreso tecnológico tiene el potencial de mejorar el bienestar y eliminar las barreras sociales (OECD, 2020). Así mismo, los derechos humanos, la política, la cultura, la educación, la economía y muchos otros aspectos sociales se ven grandemente influenciados por las telecomunicaciones (Álvarez, 2018). Aunado a lo anterior, el estado de emergencia mundial causado por el brote del coronavirus conocido como SARS-CoV-2, registró dentro del sector de las telecomunicaciones una demanda creciente en el uso y acceso a los servicios. En los últimos años, ha existido la necesidad de los operadores móviles de expandir y aumentar la capacidad de sus redes de telecomunicaciones. Para poder satisfacer esta necesidad, es importante analizar las estrategias de aumento de capacidad y de cobertura de la infraestructura móvil de los principales operadores móviles a través del tiempo.

Por otro lado, desde que se inició la Reforma de Telecomunicaciones en México en el 2013, las políticas de telecomunicaciones se han comprometido a promover la competencia y la asequibilidad (IFT, 2017). Además, el servicio móvil de acceso a internet en México registró una tasa de crecimiento anual del 11.7 % (IFT, 2020c). Sin embargo, en el 2019, el operador de Telefónica en México empezó a devolver el espectro IMT que tenía asignado debido a los altos costos, ya que tienen planes de quedarse en el mercado únicamente como operador móvil virtual (IFT, 2020a). Aunado a lo anterior, AT&T devolvió el espectro que tenía asignado a la banda de 800 MHz en diversas regiones del país (IFT, 2020b). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar la infraestructura de la red móvil que utiliza la tecnología LTE de los principales Operadores Móviles con Red (OMR) en México en el periodo del 2013 al 2020.

En la ley de telecomunicaciones y radiodifusión del 2013, se encargó a Telecomm que construyera una red troncal de fibra óptica nacional, aprovechando la infraestructura de la compañía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) del país. De acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), la red de CFE cuenta con más de 25 000 km de cable de fibra óptica instalados en las torres de transmisión y distribución de energía eléctrica (Bnamericas, 2020b). A continuación, se describen las características principales de cada Operador Móvil con Red (OMR) que se analizó en el desarrollo de esta investigación.

El primer operador que se analizó en esta investigación, América Móvil, es el operador móvil preponderante en México, con una cuota de mercado del 71 % (IFT, 2020c) respecto al número de líneas al segundo trimestre del 2020. Así mismo, en el 2021 el IFT planeó subastar las bandas de 600 MHz y lo que resta de la banda de 3.5 GHz, comúnmente utilizada para 5G. El operador cuenta con 100 MHz en la banda de 3.5 GHz, al haber comprado 50 MHz de la compañía Axtel y al haber recibido mediante un traspaso de Telmex otros 50 MHz, por lo que es incierta la participación de este operador en la subasta del IFT del 2021 (Lucas, 2020a). También cuenta con una tenencia espectral total del 26.4 %, donde el máximo permitido es del 35 %. Aunado a lo anterior, para febrero del 2021 contaba con el 44.44 % del total del espectro IMT en México (IFT, 2021).

El segundo operador AT&T, tiene el 16 % de la cuota de mercado al segundo trimestre del 2020, respecto al número de líneas (IFT, 2020c). Por otro lado, en el 2019 este operador regresó el espectro que tenía asignado en la banda de 800 MHz debido al alto costo de arrendamiento (Martínez, 2020). El costo total del espectro en 2019 representaba para el segundo operador el 14 % de sus ingresos, para el tercer operador el 15 % y para el primer operador el 5 %, de acuerdo con la cantidad de usuarios de cada operador (IFT, 2020b). Este operador arrenda el 36.28 % del total del espectro IMT en México (IFT, 2021).

El tercer operador, Telefónica, tenía el 11 % de la cuota de mercado al segundo trimestre del 2020, respecto al número de líneas (IFT, 2020c). También, el 4 de diciembre del 2020, fue aprobada por el IFT la devolución del espectro de este operador en las bandas de 800 MHz y de 1900 MHz (PCS) del 31 de diciembre del 2020 al 30 de junio del 2022 (Lucas, 2020b). Así mismo, tiene planeado regresar el espectro de 2500 MHz. En el 2019, contaba con 17.91 % del total del espectro disponible en México (IFT, 2019), en comparación con febrero del 2021, cuando contaba con el 5.46 % del total del espectro IMT en México, siendo el operador con la menor cantidad de espectro IMT (IFT, 2021).

Por último, el cuarto operador corresponde a la Red Compartida Mayorista (RCM) a cargo de Altan Redes. Al ser un operador mayorista, solo puede ofrecer servicios de telecomunicaciones móviles a través de terceros. Así mismo, el 1 de abril del 2017 inició el despliegue de la Red Compartida (SCT, 2020). Este operador tiene cobertura en 48 zonas comerciales y 80 Pueblos Mágicos (63 % de la población) (Altan Redes, 2021). También 30 Operadores Móviles Virtuales (OMV) ofrecen servicios sobre la red de este operador (Ibarra, 2021). En octubre del 2020 contaba

con 5 200 torres, las cuales arrenda a Telesites y a American Tower, siendo estos los principales proveedores de los cuatro OMRs en México (Bnamericas, 2020a). En el 2024 debe de brindar cobertura al 92.2 % de los habitantes (Altan Redes, 2020), sin embargo, busca ampliar el plazo hasta el 2028 (Bravo, 2021). En febrero del 2021 tenía arrendado el 13.82% del espectro IMT utilizado en México a nivel nacional (IFT, 2021).

Los datos colaborativos (*crowdsourced data*) implican el uso de una gran cantidad de datos para realizar una tarea o resolver un problema. El trabajo de *crowdsourcing* permite a las empresas ahorrar tiempo y dinero (OpenSignal, 2019). Los datos de fuentes colaborativas se han utilizado para estudios en diversas disciplinas y han mostrado buenos resultados. Un ejemplo de lo anterior es la investigación realizada por Frías *et al.* (2020) donde analizaron el espectro de frecuencia utilizado en las redes 4G en áreas urbanas en relación con la densidad de los nodos (eNodeB). Para esta investigación se utilizó el método propuesto por los autores para analizar a partir de datos colaborativos las estrategias de despliegue de redes móviles de los principales operadores en México.

Se realizó un análisis profundo respecto al uso de datos colaborativos para el análisis de la infraestructura móvil. A continuación, se presentan algunos de los hallazgos más relevantes. En la investigación realizadas por Ogrenci y Arsan (2018), se presenta un modelo que utiliza datos colaborativos para predecir las ubicaciones de sus estaciones base. Así mismo, en la investigación presentada por Wang *et al.* (2019), se propone un método basado en *big data* para la detección e identificación de cobertura celular. En la investigación realizada por Ghasemi y Parekh (2021), los autores clasificaron imágenes a través de una red neuronal convolucional profunda para ubicar torres de telefonía celular utilizando mediciones de fuentes colaborativas desde teléfonos inteligentes. Después de un análisis exhaustivo de la literatura, para la presente investigación se decidió realizar un promedio de las diferentes medidas recolectadas para calcular las coordenadas de las estaciones base, utilizando filtros respecto a la tecnología y a la ubicación geográfica de las mediciones. Además, en el trabajo realizado por Zhang *et al.* (2017) se presenta una comparativa respecto a las pruebas de datos colaborativos móviles con las pruebas móviles tradicionales basadas en laboratorio. Dentro de los principales resultados se menciona la reducción de costos y la escalabilidad de las pruebas. Estos elementos cobran relevancia en la presente investigación ya que gracias a los costos reducidos fue posible realizarla. Así mismo las propiedades de escalabilidad de la investigación permiten utilizar la metodología propuesta en otras áreas geográficas y en diferentes niveles geográficos.

Por otro lado, en la investigación realizada por Sridhar *et al.* (2021), se recalca la importancia de la infraestructura móvil para los usuarios finales, ya que está afecta la velocidad de descarga de los datos. Así mismo, en la investigación realizada por Frias *et al.* (2020) se analiza el uso del espectro en zonas densamente pobladas. En la presente investigación también se toma en cuenta el uso del espectro y sus características tecnológicas. También, en el trabajo presentado por Zeydan (2021), se utilizan datos colaborativos para comparar el rendimiento de los sistemas operativos móviles en Turquía. Siendo la infraestructura móvil una variable importante al medir el rendimiento de un sistema operativo móvil. En la presente investigación, se analizaron principalmente los factores de capacidad y cobertura de la infraestructura móvil. Tomando en cuenta variables demográficas y tecnológicas para su estudio, las cuales se explican a detalle en la siguiente sección.

En la siguiente sección del artículo se presente el método utilizado para analizar la cobertura y capacidad de la infraestructura de los operadores móviles con red a partir de datos colaborativos. Se especifican las variables utilizadas y el procesamiento de los datos. En la tercera sección se presentan los resultados divididos en: a) Estrategias de despliegue de bandas; b) Estrategias de aumento de capacidad de la red, y c) Porcentaje de uso de las bandas de frecuencia. Finalmente, se presenta la discusión generada a partir de los resultados.

2. Métodos, técnicas e instrumentos

En esta sección, se presenta una metodología que permite dar respuesta al objetivo de esta investigación. En la figura 1 se presenta un diagrama que describe el proceso seguido a partir de los datos colaborativos para analizar a los operadores móviles con red en México. La densidad de los nodos a partir de los datos colaborativos fue obtenida siguiendo el procedimiento propuesto por Frías *et al.* (2020), el cual se basa en las áreas geográficas, la frecuencia del espectro y las medidas recolectadas. Enseguida, se presentan las variables utilizadas y sus características. Finalmente, se presenta el procesamiento de los datos para calcular la densidad de los nodos en su respectiva frecuencia.

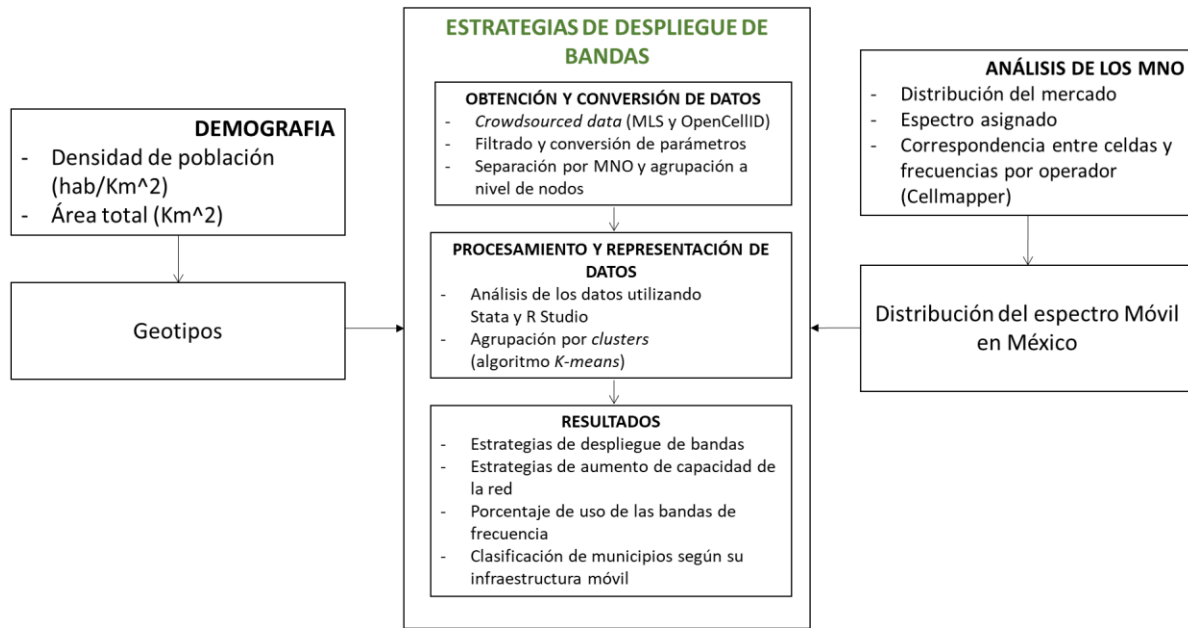


Figura 1. Metodología utilizada en la investigación.

Fuente: Elaboración propia basada en la metodología de Frías *et al.* (2020).

Figure 1. Methodology used in the research.

Source: Authors based on the methodology of Frias *et al.* (2020).

Definición de variables y mediciones

Las variables principales utilizadas en la investigación son: el número de nodo (eNB ID), el código de celda (Cell ID), el área en km² de la superficie del municipio, el año en que fue realizada la medición, el número de nodos por municipio y la densidad espacial en nodos/km². La celda se identifica de manera global en la red de telecomunicaciones mediante el ECI (E-UTRAN Cell Identity), el cual es un código de 28 bits. Los 20 bits más significativos identifican el nodo (eNB ID) y los 8 bits menos significativos identifican el código de celda de ese nodo (Cell ID).

Para esta investigación, se utilizaron datos colaborativos de OpenCellID y de Mozilla MLS. Se unificó la información de ambas bases de datos en un solo archivo utilizando Stata y se filtró por país (mcc = 334) quedando un total de 873 194 observaciones con fecha de corte del 23 de septiembre del 2020. Posteriormente se filtró por tecnología LTE, quedando 226 149 observaciones. Finalmente, se filtró por ubicación geográfica resultando 223 678 observaciones. Se analizó la información de 34 835 nodos de cuatro operadores móviles en red presentes en México. De acuerdo con el IFT (2020) en México hay 40 656 sitios celulares (nodos) que utilizan la tecnología 4G.

Se decidió clasificar los datos a nivel de municipio debido a que en México existe una total disparidad territorial, además se cuenta con la información necesaria para poder realizar el análisis a este nivel y cumplir el objetivo de la investigación. Así mismo, esta clasificación permite mapear los datos y visualizarlos más claramente que si se realiza a un nivel más granular como Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs), manzanas o localidades. Una limitante de la investigación es que no se encontró información disponible públicamente respecto a alguna de las variables relevantes para el estudio, como superficie territorial o densidad de población, en algunos de los niveles más granulares. Otra limitante es la disponibilidad de los archivos *shapefile* los cuales permiten mapear la información. Lo anterior debido a que los archivos que se encontraron, al mapearlos usando Stata y R Studio mostraban algunas anomalías.

Procesamiento de los datos

Para definir la correspondencia entre las celdas y las frecuencias por operador se utilizó el servicio público Cellmapper, el cual contiene el E-UTRAN Cell Identifier (ECI) y la banda de frecuencia de cada celda conocida. Se revisó manualmente una cantidad suficientemente considerable de celdas para cada OMR, lo cual permitió inferir las reglas de asignación. Por otro lado, para definir la densidad espacial, primero se calculó la cantidad de nodos por municipio

utilizando Stata. Se realizó un *merge* entre los datos colaborativos, la información de los municipios de las bases de datos de INEGI y la información geográfica de los municipios disponible en un *shapefile* para su posterior mapeo en RStudio. Posteriormente, se contaron los nodos que se encontraban dentro de cada municipio utilizando la función *geoinpoly* de Stata. Finalmente, se dividió la cantidad de nodos por municipio entre el área de la superficie del municipio en km² dando como resultado la densidad espacial en nodos/km². En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos en esta investigación.

3. Resultados y discusión

En esta investigación, se realizó un análisis del sesgo de los datos por comparación con las fuentes oficiales (tabla 1). Se encontró que en el reporte del Comportamiento de los Indicadores de los Mercados Regulados (2020b) del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), el cuál es el órgano regulador en México, había 40 656 sitios celulares con la tecnología 4G durante el año 2019. Por otro lado, se encontró que el operador América Móvil en el 2019 tenía 15 953 nodos pertenecientes a la compañía Telesites (Bamericas, 2020b). También, que en octubre del 2020 el operador de la Red Compartida Mayorista contaba con 5200 torres (Altan Redes, 2020). La información anterior se utilizó para calcular la cantidad de los nodos de los operadores AT&T y Telefónica. Restando del total de nodos con la tecnología 4G reportados por el IFT los nodos de los operadores América Móvil y la Red Compartida Mayorista (RCM). Posteriormente, en base a la participación del mercado de cada operador, se calculó la cantidad de nodos por cada uno de los operadores.

Tabla 1. Comparación de datos colaborativos con fuentes oficiales.

Table 1. Crowdsourced data comparison with official sources.

Operador	Nodos		Participación de mercado
	Crowdsourced	Fuente oficial	
América Móvil	18 338	15 953	71 %
AT&T	8 353	9 752	16 %
Telefónica	5 607	9 751	11 %
RCM	232	5 200	2 %

Nota: La participación de mercado corresponde a lo reportado en el informe del IFT del segundo trimestre del 2020, respecto al número de líneas.

Note: The market share corresponds to what was reported in the IFT report for the second quarter of 2020, regarding the number of lines.

Por otro lado, el aumento de capacidad de las redes móviles ha sido abordado por los operadores a través de tres técnicas de expansión de la red. La primera mediante la construcción de más sitios celulares (densificación de la red). La segunda, aumentando el espectro disponible para servicios móviles. Y la tercera, usando tecnologías más avanzadas con mayor eficiencia espectral. Para dar respuesta a la pregunta de investigación, los resultados se dividieron en tres bloques: a) Estrategias de despliegue de las bandas; b) Estrategias de aumento de capacidad de la red, y c) Porcentaje de uso de las bandas de frecuencia. Para cada bloque se realizó un análisis por operador, es decir, los datos colaborativos se filtraron por operador para su análisis. Posteriormente los resultados obtenidos fueron comparados entre los distintos operadores.

3.1 Estrategias de despliegue de bandas

Los operadores de telecomunicaciones móviles utilizan dos estrategias principalmente para el despliegue de infraestructura. La primera es desplegar un nodo nuevo con la banda de frecuencia. Y la segunda es integrar el espectro en un nodo existente. En esta investigación se analizaron las estrategias utilizadas por los operadores en México. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Las estrategias de despliegue por bandas de frecuencia de los cuatro OMR principales en México se muestran en la figura 2. El operador América Móvil utiliza las bandas de frecuencia de 2500 MHz y la banda AWS (1700 MHz

– 2100 MHz). El operador AT&T utiliza las bandas de frecuencia de 800 MHz y la banda AWS. El operador Telefónica utiliza la banda PCS que corresponde a los 1900 MHz. Finalmente, el operador de la RCM utiliza la banda de 700 MHz.

El operador América Móvil es el que tiene mayor cobertura en México. Posee 2x40 MHz en la banda AWS y 2x25.5 MHz en la banda de 2500 MHz. Es el operador con mayor antigüedad en México. De los datos colaborativos se pudieron obtener mediciones de los nodos desde el 2013. En la mayoría de los casos, reutiliza la infraestructura con la que cuenta para desplegar nuevas portadoras en nodos que existían previamente. En los años 2015, 2016 y 2017 es cuando utiliza mayor cantidad de nodos nuevos en la banda AWS.

La banda AWS es compartida por los operadores América Móvil y AT&T. El operador AT&T cuenta con 2x25 MHz en la banda AWS y con 2x10 MHz en la banda de 800 MHz. Al igual que el operador América Móvil, despliega mayor cantidad de portadoras en nodos existentes, reutilizando de esta manera la infraestructura previamente desplegada. En el año 2017 es cuando utiliza mayor cantidad de nodos nuevos en la banda AWS.

El operador Telefónica tiene asignados 2x25 MHz en la banda PCS. Al igual que el operador AT&T, en el año 2017 es cuando utilizó mayor cantidad de nodos nuevos. Así mismo, utiliza en su mayoría nodos existentes. Para esta investigación, si un operador despliega más de una portadora en un mismo nodo, se considera que la primera portadora utiliza un nodo nuevo y la segunda o tercera reutilizan esa base.

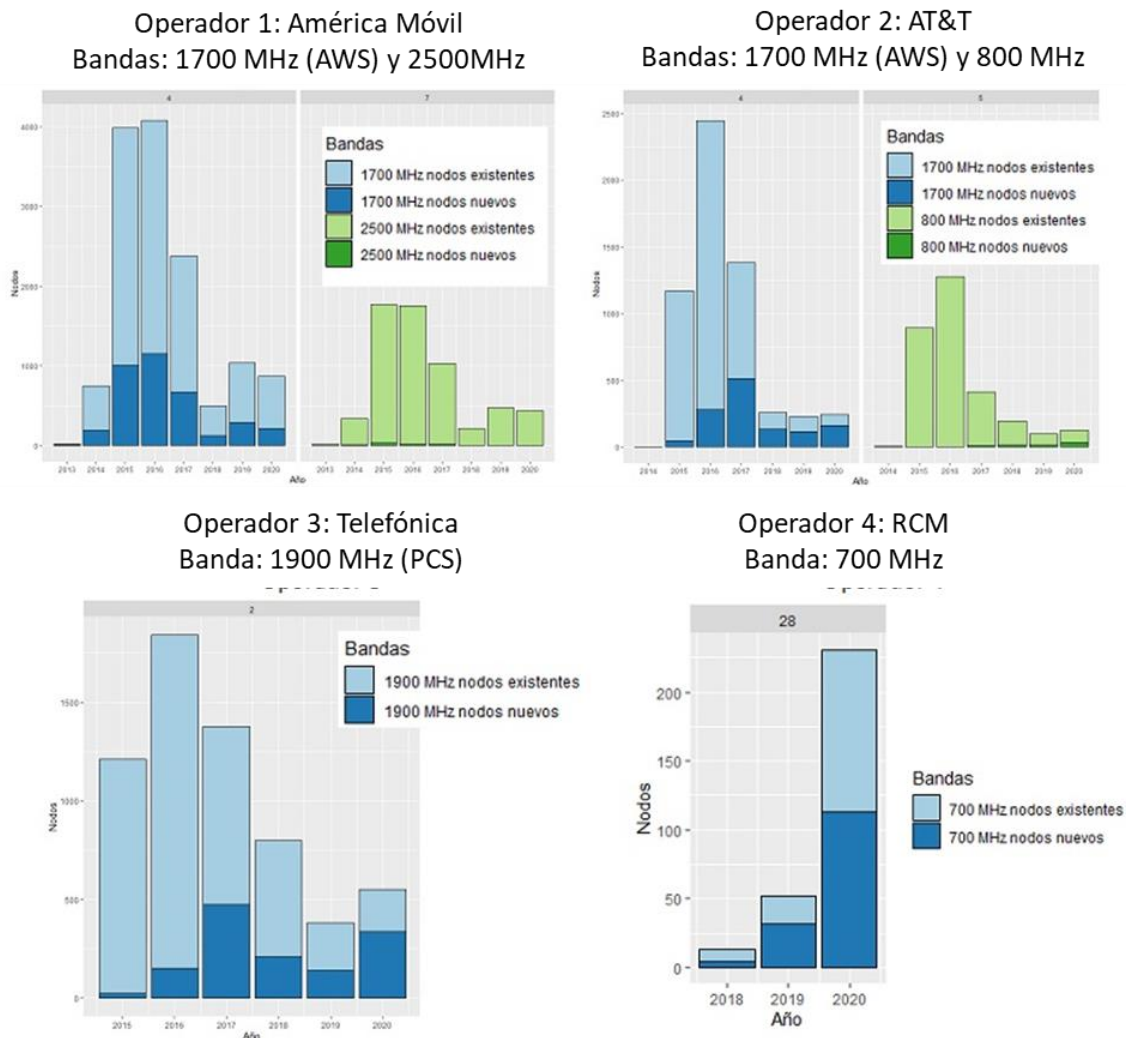


Figura 2. Estrategias de despliegue de los operadores por banda de frecuencia.
Figure 2. Deployment strategies of operators by frequency band.

Finalmente, el operador de la RCM tiene asignados 2x45 MHz en la banda de 700 MHz. A través de una Asociación Público-Privada (APP) se comprometió a cubrir el 92.2 % de la población en el año 2024. Inició sus operaciones en el año 2017. Debido a lo anterior, los datos colaborativos para este operador inician a partir del año 2018. Para el año 2020, utiliza 113 nodos nuevos y 118 nodos existentes.

3.2 Estrategias de aumento de capacidad de la red

A continuación, se presenta el análisis de la evolución temporal del aumento de capacidad de la red de los operadores en México a través del mapeo de la densificación de la red por operador. De las figuras 3 a 6 se puede observar la densificación de la red de cada operador en el primer año de medición disponible de los datos colaborativos y en el último año del periodo (2020). Se utilizó una escala logarítmica en el color de los mapas para facilitar la visualización de los datos.

La densificación de la red (o densificación espacial) se mide en nodos/km². Los valores más pequeños corresponden a los municipios con mayor extensión territorial y/o con menor cantidad de nodos. Los valores más altos corresponden a los municipios, por lo general en la parte central de México, que tienen un área territorial menor y mayor cantidad de nodos.

Del análisis de la evolución temporal de los datos, se encontró que el operador América Móvil comienza desplegando las estaciones base en la parte central del país y en algunos municipios de la frontera con Estados Unidos (figura 3). Posteriormente continúa con la densificación espacial de los núcleos urbanos como Guadalajara y Monterrey. Finalmente logra una gran cobertura del territorio mexicano aumentando progresivamente la densidad de los nodos, teniendo en el centro del país los municipios con mayor densidad espacial.



Figura 3. Densificación de la red del operador América Móvil años 2013 y 2020.
Figure 3. Densification of the operator network America Mobil years 2013 and 2020.

El operador AT&T, al igual que el operador América Móvil, inicia el despliegue de nodos en la parte central del país (figura 4). Posteriormente densifica los núcleos urbanos. Tiene una cantidad menor de nodos que el operador América Móvil, lo cual se puede ver reflejado en el mapeo de los datos. Se puede apreciar un gran salto en cobertura entre el 2015 y el 2016. Lo anterior debido a un acuerdo de cobertura (*roaming* nacional) entre el operador América Móvil y el operador AT&T. El operador América Móvil presta su infraestructura al operador AT&T en donde no cuente con infraestructura propia o se encuentre construyendo su infraestructura. Así mismo, el operador AT&T tiene un convenio de arrendamiento con el operador Telefónica. El IFT aprobó el convenio permitiendo al operador Telefónica arrendar infraestructura del operador AT&T.

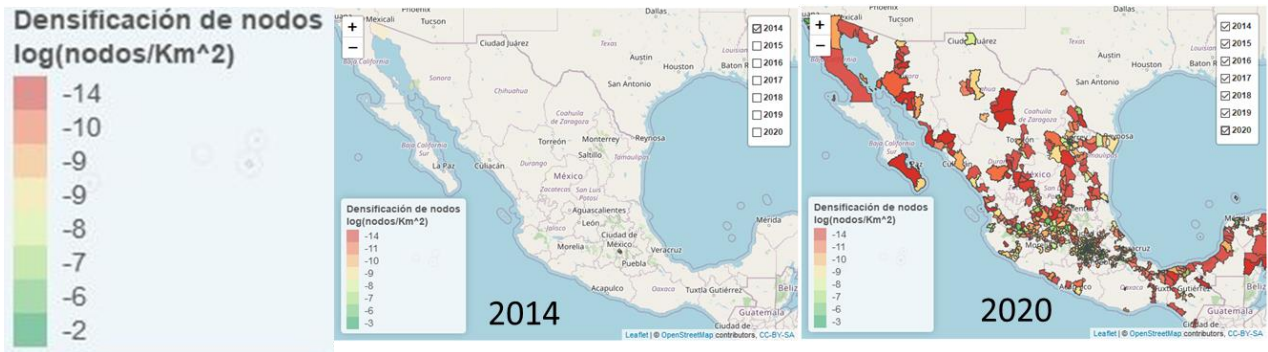


Figura 4. Densificación de la red del operador AT&T años 2014 y 2020.
Figure 4. Densification of the operator network AT&T years 2014 and 2020.

Aunado a lo anterior, el operador Telefónica tiene menor cantidad de nodos que el operador AT&T, lo cual se puede ver reflejado en el mapeo de la densidad de los nodos (figura 5). Al igual que los dos operadores anteriores, tiene mayor densificación de nodos en la parte central del país (Ciudad de México) y en los núcleos urbanos como Monterrey y Guadalajara. A diferencia de los dos operadores anteriores, tiene una menor cobertura en el territorio mexicano.

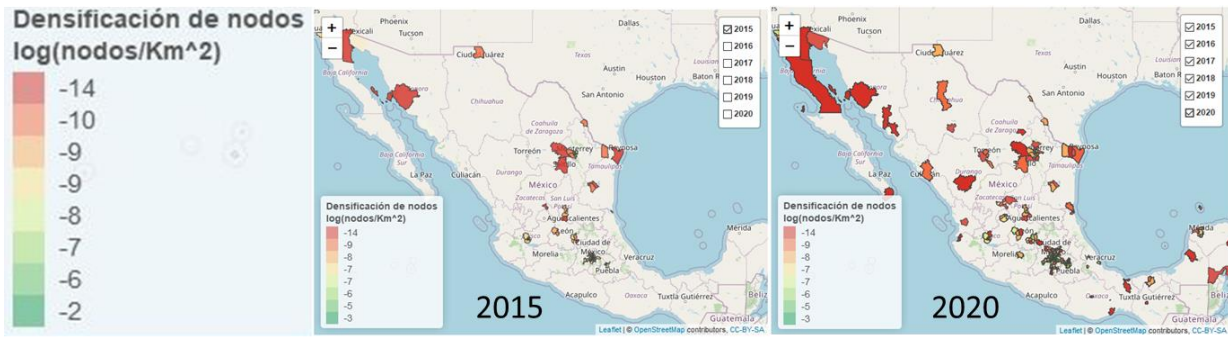


Figura 5. Densificación de la red del operador Telefónica años 2015 y 2020.
Figure 5. Densification of the operator network Telefonica years 2015 and 2020.

Por último, el operador de la RCM tiene la mayor densificación de nodos en la parte central de país, posteriormente densifica la ciudad de Guadalajara (figura 6). Es el operador más reciente, contando con datos colaborativos del 2018, 2019 y 2020. En esos tres años se puede observar un avance progresivo en el aumento de la densificación de nodos hacia las zonas urbanas.



Figura 6. Densificación de la red del operador Red Compartida años 2018 y 2020.
Figure 6. Densification of the operator network Shared Network years 2018 and 2020.

3.3 Porcentaje de uso de las bandas de frecuencia

A continuación, se presentan los resultados respecto al uso que le da cada operador móvil a las bandas de frecuencia que tiene asignadas. El operador América Móvil utiliza en mayor medida la banda de 2500 MHz que la banda de 1700 MHz (AWS). Así mismo, en los datos analizados del año 2020, se encontró que 78 municipios están cubiertos únicamente por la banda de 1700 MHz, en contraste con 240 municipios que se encuentra cubiertos únicamente por la banda de 2500 MHz, mientras que 47 municipios se encuentran cubiertos por ambas bandas (1700 MHz y 2500 MHz). De lo anterior se puede concluir que el operador América Móvil utiliza en mayor cantidad de municipios la banda alta (2500 MHz) que la banda baja (1700 MHz), a pesar de que la banda baja tiene mejores características de propagación, de acuerdo con las características tecnológicas propias de las bandas de baja frecuencia. Por otro lado, el porcentaje de uso de ambas bandas aumentó considerablemente en los años 2015 y 2016.

Por su parte, el operador AT&T utiliza la banda de 800 MHz y la banda de 1700 MHz (AWS). A través de los años, el porcentaje de uso de la banda de 800 MHz ha sido menor que el de la banda de 1700 MHz. Para el año 2020 se encontró que 57 municipios se encontraban cubiertos únicamente por la banda de 800 MHz. En comparación con 93 municipios que se encontraban cubiertos únicamente por la banda de 1700 MHz, mientras que 32 municipios se encontraban cubiertos por ambas bandas (800 MHz y 1700 MHz). De lo anterior se puede concluir que el operador AT&T, al igual que el operador América Móvil, utiliza en mayor cantidad de municipios la banda alta (1700 MHz) que la banda baja (800 MHz), a pesar de que la banda baja tiene mejores características de propagación. En el mapeo del despliegue de las bandas se puede observar que la banda de 800 MHz es utilizada principalmente en las zonas urbanas mayormente pobladas.

El operador Telefónica utiliza la banda de 1900 MHz. Ha tenido un porcentaje de uso relativamente menor que el que los dos operadores anteriores les dan a las bandas que tienen asignadas. El año 2016 es el que presenta el mayor porcentaje de uso. El despliegue de la banda puede observarse primero en el centro del país, posteriormente en los núcleos urbanos del norte del país y en los años más recientes, en los núcleos urbanos del sur del país.

Finalmente, el porcentaje de uso de la banda de 700 MHz del operador de la RCM es muy menor comparado con el de los 3 operadores anteriores. Esto puede deberse a que el operador de la RCM acaba de iniciar operaciones en el año 2017, a que se encuentra desplegando la Red Compartida en el territorio mexicano y a que es un operador mayorista. En el mapeo de los datos se puede observar que el despliegue de la red inició en el centro del país. Posteriormente en el municipio de Guadalajara y en la parte norte del país con el municipio de Mexicali, entre otros, para continuar con la parte sur en municipios como Cancún (Benito Juárez) y Mérida.

3.4 Discusión

En esta investigación se analizaron las redes LTE de los principales operadores móviles en México. En base a los resultados obtenidos se sugieren tres recomendaciones principales: a) Inversión en infraestructura nueva para el despliegue de nuevas tecnologías; b) Fomento de la cobertura móvil en zonas rurales, y c) Facilitar a los operadores la arrendación de bandas en diversas frecuencias que permitan aprovechar las características tecnológicas de las mismas; a través de costos que se encuentren alineados al mercado internacional. Para lograrlo, se utilizaron grandes cantidades de datos colaborativos de MLS y OpenCellid desde el año 2013 al 2020.

Respecto a las estrategias de despliegue de banda de los operadores analizados, se puede concluir que los primeros tres operadores han utilizado en mayor medida nodos ya existentes, a diferencia del operador de la RCM, el cual ha utilizado mayor cantidad de nodos nuevos. Por otro lado, los operadores América Móvil y AT&T utilizan en mayor medida la banda AWS (1700 MHz – 2100 MHz) con nodos tanto nuevos como existentes, a diferencia de la otra banda que tienen asignada en donde prefieren utilizar en mayor medida nodos existentes. La primera sugerencia que se propone, desprendida de este hallazgo, es la inversión en infraestructura nueva para el despliegue de nuevas tecnologías.

En cuanto a las estrategias de aumento de capacidad de la red, los cuatro operadores han seguido una estrategia de cobertura similar. Densificando en primera instancia el centro del país, posteriormente los núcleos urbanos y finalmente las zonas con menor cantidad de población y mayor extensión territorial. Como segunda propuesta, se sugiere el fomento de contratos de colaboración empresarial entre los distintos operadores para brindar mayor cobertura en las distintas regiones del país. Enfocados principalmente en facilitar el acceso de los operadores móviles virtuales

a las zonas rurales. Se espera que en un futuro exista un mayor contraste en la estrategia de despliegue del operador Altan Redes respecto a los demás operadores, ya que tiene el compromiso de cobertura social del 7.2 % de la población para enero del 2022. La cobertura social se encuentra enfocada principalmente en los estados de Oaxaca, Chiapas y Veracruz. Lo anterior se debe a que en el programa de cobertura social 2020-2021 de la SCT se identificaron estos estados como aquellos en los cuales se encuentran las localidades de atención prioritaria. La mayoría de los municipios de los estados mencionados anteriormente no se encuentran cubiertos por los principales operadores con red en México, esto puede deberse a que son en su mayoría zonas de baja densidad de población y una amplia extensión territorial, lo cual se traduce en poca rentabilidad para los operadores.

En general, del porcentaje de uso de las bandas de frecuencia de los datos analizados se obtiene que el uso que han dado los primeros tres operadores en las bandas de frecuencia que tienen asignadas ha tenido variaciones considerables a través de los años. El caso del operador Altán Redes es diferente al de los tres anteriores, debido a que ha tenido un porcentaje de uso menor en comparación. Sin embargo, este porcentaje ha ido en aumento con el paso del tiempo. En todos los casos, en los datos analizados no se encontró una correlación positiva entre la densificación de nodos y las características tecnológicas de las bandas de frecuencia. De lo anterior, como tercera propuesta se sugiere facilitar a los operadores la arrendación de bandas en diversas frecuencias que permitan aprovechar las características tecnológicas de las mismas; a través de costos que se encuentren alineados al mercado internacional.

4. Conclusiones

Se espera que esta investigación pueda contribuir en brindar información a los usuarios finales, a los órganos reguladores de telecomunicaciones y a los operadores móviles respecto a las características de las redes de telecomunicaciones LTE que se encuentran operando en México. Así mismo, se espera que esta investigación sirva de apoyo en la toma de decisiones para la implementación de nuevas tecnologías de telecomunicaciones en México.

Como trabajos futuros se sugiere utilizar este método en otros países y otras áreas (como las zonas rurales) para lograr un mayor entendimiento respecto a las estrategias de infraestructura utilizadas por los OMR globalmente. Otra aproximación puede ser utilizar la clasificación de clústeres. Así mismo, se podrían utilizar otras técnicas de clasificación de la infraestructura móvil como el análisis de factores utilizando parámetros distintos a los utilizados en esta investigación. También, se sugiere que en la próxima subasta del segmento 6425-7125 MHz para IMT/5G se tomen en cuenta las características tecnológicas propias de la banda de frecuencia en las estrategias de cobertura de los operadores. Finalmente, se sugiere desarrollar técnicas más avanzadas de análisis de datos a partir de los datos disponibles de colaboración compartida de los operadores móviles. Estos pueden ser utilizados en otro tipo de estudios como en la planeación y simulación de redes móviles.

5. Información adicional

No.

6. Agradecimientos

Laura Contreras agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Zoraida Frías agradece el apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España con el código de proyecto RTI2018-098189-B-I00.

Información de los autores

Laura Ivonne Contreras Potenciano ¹  0000-0001-7938-0197

Catalina Ovando ²  0000-0001-5059-2946

Zoraida Frías ³  0000-0002-6265-9359

Contribución de los autores en el desarrollo del trabajo

Las autoras declaran que contribuyeron por igual para la realización de esta investigación.

Conflicto de interés

Las autoras declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

- Altan Redes. (2020). *Altán Redes: desarrollador de la Red Compartida Agenda*.
http://www.ift.org.mx/sites/default/files/presentacion_isabel_prieto_altan-panel_ift.pdf
- Altan Redes. (2021). *Our coverage*. Altan Redes. <https://www.altanredes.com/en/solutions-to-operators/our-coverage/>
- Álvarez, C. L. (2018). *Telecomunicaciones y Radiodifusión en México*. Santi Ediciones.
- Bnamericas. (2020a). Las dos mayores empresas de torres de telecomunicaciones de México. *Bnamericas*, 2–5.
<https://www.bnamericas.com/en/news/spotlight-mexicos-2-biggest-telecom-tower-companies>
- Bnamericas. (2020b). *Snapshot: Latin America's main fiber backbone projects*.
<https://www.bnamericas.com/en/features/snapshot-latin-americas-main-fiber-backbone-projects>
- Bravo, J. (2021). La Red Descompuesta. *El Economista*, 1–14. <https://www.eleconomista.com.mx/opinion/La-Red-Descompuesta-20210430-0049.html>
- Frias, Z., Mendo, L., & Oughton, E. J. (2020). How Does Spectrum Affect Mobile Network Deployments? Empirical Analysis Using Crowdsourced Big Data. *IEEE Access*, 8, 190812–190821.
<https://doi.org/10.1109/access.2020.3031963>
- Ghasemi, A., & Parekh, J. (2021). Deep Learning based Localization of LTE eNodeBs from Large Crowdsourced Smartphone Datasets. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2021-April*. <https://doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448857>
- Ibarra, D. (2021). Operadores Móviles Virtuales en México 2021. *Selectra*, 1–7.
<https://selectra.mx/celular/operadores-moviles-virtuales>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones [IFT]. (2017). *Las Telecomunicaciones a 4 años de la Reforma Constitucional en México*.
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/estadisticas/a4anosdelareforma.pdf>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones [IFT]. (2019). *IMT en México*. 1–11.
http://www.ift.org.mx/sites/default/files/imt_en_mexico_febrero_2019.pdf
- Instituto Federal de Telecomunicaciones [IFT]. (2020a). Análisis sobre el mercado de Operadores Móviles Virtuales (OMVs) 2020. *IFT*. <http://www.ift.org.mx/estadisticas/analisis-sobre-el-mercado-de-los-operadores-moviles-virtuales-omvs>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones [IFT]. (2020b). *Efectos y Alternativas de la Iniciativa de la Reforma a la Ley Federal de Derechos para 2021 en materia de Espectro Radioeléctrico* (pp. 1–34).
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/efectosyalternativasdelainiciativadereformaalaleyfederaldederechospara2021enmateriadeespectroradioel.pdf>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones [IFT]. (2020c). *Segundo Informe Trimestral Estadístico 2020*.
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/estadisticas/ite2t2020.pdf>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones [IFT]. (2021). *IMT en México*.
http://www.ift.org.mx/sites/default/files/imt_en_mexico_2021_febrero2021.pdf
- Lucas, N. (2020a). Telcel compra la banda de 3.5 GHz de Axtel y mete presión a la primera subasta de 5G en México. *El Economista*, 1–11. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Telcel-compra-la-banda-de-3.5-GHz-de-Axtel-y-mete-presion-a-la-primera-subasta-de-5G-en-Mexico-20200701-0065.html>
- Lucas, N. (2020b). Telefónica renuncia a sus concesiones mexicanas en las bandas de 800 MHz y PCS. *El Economista*, 1–13. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Telefonica-renuncia-a-sus-concesiones-mexicanas-en-las-bandas-de-800-MHz-y-PCS-20200101-0012.html>
- Martínez, C. (2020). Ante alza en precio, AT&T devuelve espectro. *El Universal*, 1–6.
<https://www.eluniversal.com.mx/carera/ante-alza-en-precio-att-devuelve-espectro>
- OECD. (2020). *Latin American Economic Outlook 2020: Digital Transformation for Building Back* (O. Publishing

- (ed.)). <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/e6e864fb-en>
- Ogrenci, A. S., & Arsan, T. (2018). Transmitter source location estimation using crowd data. *Computers and Electrical Engineering*, 66, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.09.026>
- OpenSignal. (2019). *OpenSignal: About us*. <https://www.opensignal.com/about/about-us>
- SCT. (2020). Evaluación de la Red Compartida 2020. In *Gobierno de México* (Vol. 53, Issue 9). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/604427/Evaluaci_n_de_la_Red_Compartida_2020_Versi_n_FINAL_P_BLICA_.pdf
- Sridhar, V., Girish, K., & Badrinarayan, M. (2021). Analysis of crowdsourced data for estimating data speeds across service areas of India. *Telecommunication Systems*, 76(4), 579–594. <https://doi.org/10.1007/s11235-020-00736-z>
- Wang, H., Xie, S., Li, K., & Omair Ahmad, M. (2019). Big data-driven cellular information detection and coverage identification. *Sensors (Switzerland)*, 19(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/s19040937>
- Zeydan, E. (2021). Android vs. IOS: a comparative analysis over mobile operator infrastructures based on crowdsourced mobile dataset. *Telecommunication Systems*. <https://doi.org/10.1007/s11235-021-00820-y>
- Zhang, T., Gao, J., & Cheng, J. (2017). Crowdsourced Testing Services for Mobile Apps. *Proceedings - 11th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, SOSE 2017*, 75–80. <https://doi.org/10.1109/SOSE.2017.28>