



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA ABORDAR
EL DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURA TIC EN
ENTORNOS RURALES**

Autor: Pablo Menéndez Ruiz de Azúa

Co-Director: Rosendo Castañón Naseiro

Co-Director: Javier Matanza Domingo

Madrid

Junio 2023

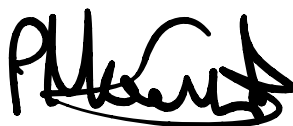
Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Modelo de Optimización para abordar el despliegue de infraestructura tic en entornos
rurales

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2022/2023 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Pablo Menéndez Ruiz de Azúa Fecha: 02/ 06/ 2023



Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.: Rosendo Castañón Naseiro

Fecha: 02/ 06/ 2023



Fdo.: Javier Matanza Domingo

Fecha: 02/ 06/ 2023

Firmado por MATANZA
DOMINGO JAVIER - ***4397**
el día 05/06/2023 con un
certificado emitido por AC
FNMT Usuarios



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA ABORDAR EL
DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURA TIC EN
ENTORNOS RURALES**

Autor: Pablo Menéndez Ruiz de Azúa

Co-Director: Rosendo Castañón Naseiro

Co-Director: Javier Matanza Domingo

Madrid

Junio 2023

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA ABORDAR EL DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURA TIC EN ENTORNOS RURALES

Autor: Menéndez Ruiz de Azúa, Pablo

Directores: Castañón Naseiro, Rosendo; Matanza Domingo, Javier

Entidad Colaboradora: IdEst Advisory

RESUMEN DEL PROYECTO

Durante los años 2020 y 2021, se ha sufrido una grave e inesperada crisis debida al virus COVID-19. Esta crisis obligó a imponer severas medidas de confinamiento internacional, nacional y local, durante múltiples meses, donde los hábitos más enraizados como ir a la oficina o a la universidad o hacer ejercicio en el exterior tuvieron que ser modificados por otros de corte digital como el advenimiento del “streaming” o el teletrabajo, que aún hoy en día se siguen conservando, y se prevé que se mantengan por muchos años en el futuro.

En este paradigma de revolución tecnológica, las redes de comunicación han tenido y tendrán un rol esencial en el desarrollo de las sociedades modernas. Este desarrollo, a su vez, trae consigo algunos retos relevantes desde el punto de vista social y económico, como los de mitigar las desigualdades que emergen de la disparidad de medios y recursos entre zonas rurales y urbanas.

Pese a que numerosos estudios parecen señalar que la infraestructura de las TIC aporta importantes beneficios al desarrollo de las comunidades rurales (aumento de la tasa de afiliación a la seguridad social, repoblación, y crecimiento de la renta per cápita, por nombrar algunos), los proveedores de servicios se enfrentan a varios retos cuando se expanden a las zonas rurales, siendo el mayor de ellos la rentabilidad. La dificultad radica en la dificultad de monetización del espectro debido a los bajos ingresos, ya que hay menos abonados y en general, menor tráfico de datos. Por este motivo y con el objetivo de que toda la población disponga de conectividad de calidad, la Unión Europea está desarrollando algunas iniciativas orientadas a financiar estos despliegues y ofrece posibilidades de coinversión público/privadas para que el despliegue sea viable económicamente para las empresas encargadas.

Es precisamente en este contexto donde los trabajos como el que aquí se plantean cobran especial relevancia. Este trabajo tiene como objetivo proponer un modelo cuantitativo-financiero para abordar el problema del despliegue de infraestructura TIC en entornos

rurales, con el fin último de realizar un análisis de repotenciamiento económico y de coste/beneficio social de la región devenido de la mejora en infraestructura de conectividad.

El modelo planteado considera datos de entrada de índole i) técnica (como el plan de red o la cobertura y capacidad aportada por cada tecnología y frecuencia de radiación), ii) financiera (como el CAPEX y el OPEX de los puntos de servicio), e iii) sociales (como el tráfico de datos de la región), y propone un despliegue de torres y antenas para cubrir unas necesidades de cobertura y capacidad (inicialmente exógenas), minimizando la suma de los costes de instalación y operación.

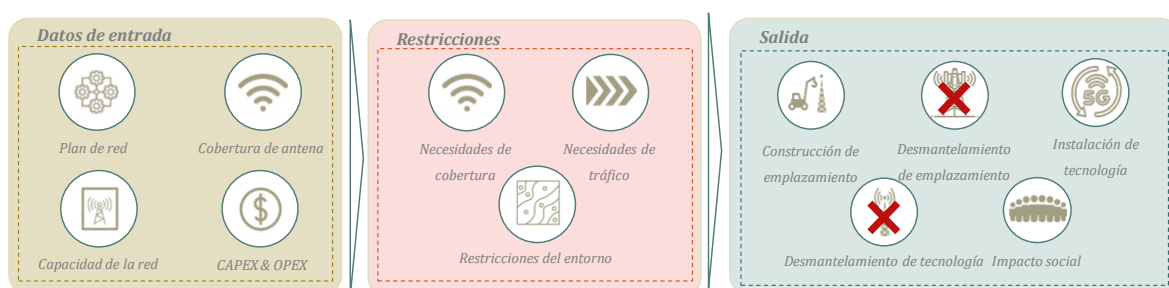


Ilustración 1. Esquema del modelo planteado. Fuente: Elaboración Propia

Se han estudiado distintos casos de estudio ante diferentes hipótesis y escenarios de entrada, para mostrar la utilidad del modelo en materia de impacto social en entornos rurales. Los resultados sugieren que el modelo planteado tiene cierto potencial para ser empleado como una herramienta para abordar análisis de tipo coste/beneficio social que pueden ser empleados por Administraciones y Gestores Públicos para tomar decisiones acerca del despliegue de fibra en entornos rurales.

Entre las conclusiones más relevantes se destaca que:

- Con el objetivo de llevar conectividad de alta velocidad a entornos rurales a bajo coste, la inversión en tecnologías de radio de baja frecuencia resulta ser dominante sobre la inversión en altas frecuencias. Siendo las antenas y los equipos de acceso más caros para bajas frecuencias que para las altas, el sobrecoste queda justificado por el mayor alcance de estas tecnologías y la menor exposición a interferencias.
- Para realizar una estimación del coste del despliegue es necesario valorar un escenario multianual en el que no solo se tiene en cuenta el CAPEX sino también el OPEX anual y los desmantelamientos después de que termine el tiempo de vida. Este coste puede llegar a ser elevado y más si los análisis se realizan en zonas de más de

130 kilómetros cuadrados, como las de los casos de estudio de este trabajo. Además, generalmente este coste no puede ser asumido únicamente por los operadores porque no existe rentabilidad, lo que apunta a la necesidad de desarrollos de coinversión pública y privada.

- Los resultados apuntan a que en zonas como las analizadas en los casos de estudio, los beneficios asociados al crecimiento económico de la región después del despliegue realizado son superiores a los costes de la inversión realizada. Por lo tanto, aunque desde el punto de vista del operador no es rentable invertir, se considera que a nivel socioeconómico sí lo es porque se va a generar más riqueza de la invertida. Por ello, es necesario que existan iniciativas que fomenten la inversión.

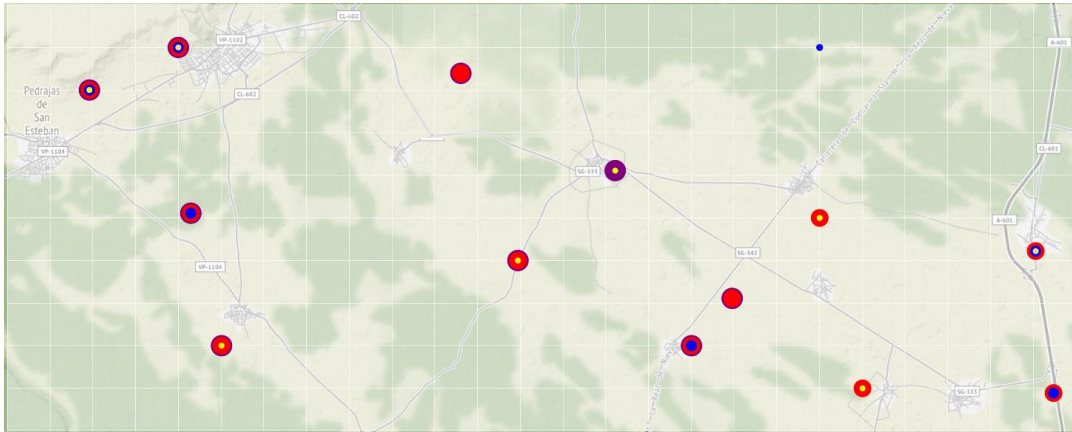


Ilustración 2. Salida del modelo para un despliegue en Chañe, Segovia. Fuente: Elaboración Propia

El modelo desarrollado se ha presentado a numerosos concursos de innovación de ámbito tanto público como privado y ha sido galardonado con múltiples premios por su carácter conciliador técnico y social en materia de digitalización. En particular, el proyecto recibió el primer premio al emprendimiento social de Madrid Impacta 2022, así como el primer premio en innovación propuesto por un startup en la Primera Edición de Premios de Digitalización en Madrid, entregado por la Presidenta de La Comunidad, Isabel Díaz Ayuso. Así mismo, el modelo aquí desarrollado pretende ser usado para dar respuesta a Proyectos en el marco Horizon de la Comisión Europea, en los que la empresa colaboradora IdEst Advisory participa en consorcio con la Universidad Pontificia de Comillas.

OPTIMIZATION MODEL TO ADDRESS THE DEPLOYMENT OF ICT INFRASTRUCTURE IN RURAL ENVIRONMENTS

Author: Menéndez Ruiz de Azúa, Pablo

Supervisors: Castañón Naseiro, Rosendo; Matanza Domingo, Javier

Collaborating Entity: IdEst Advisory

ABSTRACT

During the years 2020 and 2021, we suffered a severe and unexpected crisis due to the COVID-19 virus. This crisis imposed severe international, national, and local lockdown measures for several months, where deeply rooted habits such as going to the office or university or exercising outdoors had to be replaced by digital ones such as streaming or remote work. These new practices are still in place today and are expected to remain for many years in the future.

In this paradigm of technological revolution, communication networks have played and will continue to play an essential role in the development of modern societies. This development, in turn, brings some significant social and economic challenges, such as mitigating inequalities emerging from the disparity of means and resources between rural and urban areas.

Although numerous studies seem to indicate that ICT infrastructure brings significant benefits to the development of rural communities (increased social security affiliation rate, repopulation, and per capita income growth, to name a few), service providers face several challenges when expanding to rural areas, the most significant of which is profitability. The difficulty lies in the monetization of the spectrum due to low income, as there are fewer subscribers and, in general, less data traffic. For this reason, and with the aim of providing all the population with quality connectivity, the European Union is developing some initiatives aimed at financing these deployments and offering possibilities for public/private co-investment so that the deployment is economically viable for the companies in charge.

It is precisely in this context where works like the one proposed here take on special relevance. This work aims to propose a quantitative-financial model to address the problem of deploying ICT infrastructure in rural environments, with the goal of performing an analysis of economic repowering and social cost/benefit of the region resulting from the improvement in connectivity infrastructure.

The proposed model considers input data of a) technical nature (like the network plan or the coverage and capacity provided by each technology and radiation frequency), b) financial (like the CAPEX and the OPEX of the service points), and c) social (like the data traffic of the region), and proposes a deployment of towers and antennas to meet coverage and capacity needs (initially exogenous), minimizing the sum of installation and operation costs.

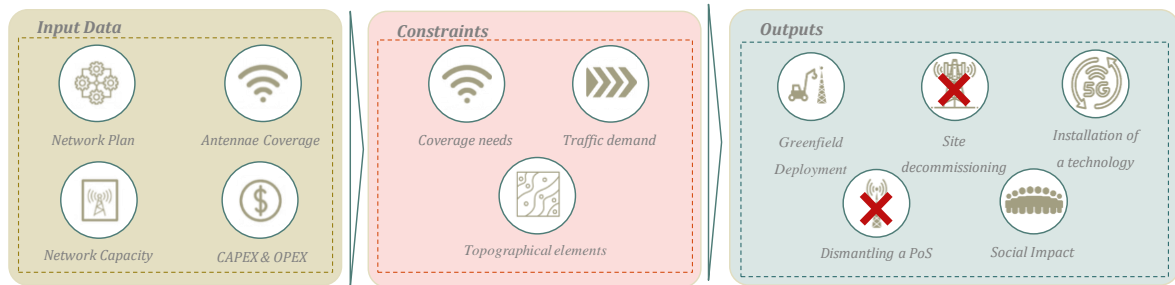


Ilustración 3. Diagram of the proposed model. Source: Self made

Different case studies were analyzed under different hypotheses and input scenarios, to show the usefulness of the model in terms of social impact in rural environments. The results suggest that the proposed model has potential to be used as a tool to carry out social cost/benefit analyses that can be used by Administrations and Public Managers to make decisions about the deployment of fiber in rural environments.

Among the most relevant conclusions, it is highlighted that:

- To bring high-speed connectivity to rural environments at low cost, the investment in low-frequency radio technologies turns out to be dominant over the investment in high frequencies. Although antennas and access equipment are more expensive for low frequencies than for high ones, the extra cost is justified by the greater range of these technologies and less exposure to interference.
- To estimate the cost of deployment, it is necessary to consider a multi-year scenario in which not only the CAPEX is considered, but also the annual OPEX and the dismantling after the end of the life cycle. This cost can be high, especially if the analyses are carried out in areas of more than 130 square kilometers, like the case studies of this work. Also, this cost generally cannot be assumed solely by the operators because there is no profitability, which points to the need for public and private co-investment developments.
- The results suggest that in areas like the ones analyzed in the case studies, the benefits associated with the region's economic growth after the deployment are higher than

the costs of the investment made. Therefore, although it is not profitable for the operator to invest from their point of view, it is considered socioeconomically viable because more wealth will be generated than invested. For this reason, initiatives that encourage investment are necessary.

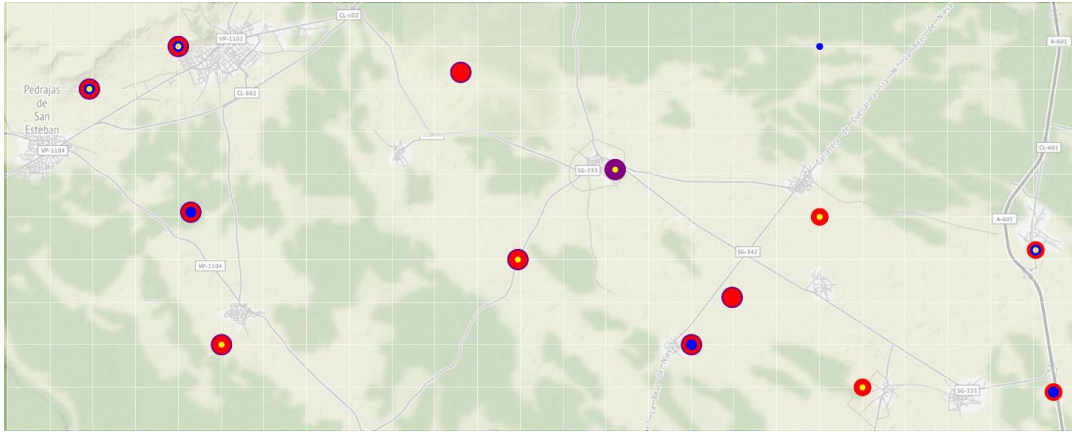


Ilustración 4. Output of the model for a deployment in Chañe, Segovia. Source: Self made

The developed model has been presented to numerous public and private innovation competitions and has won multiple awards for its conciliatory technical and social character in terms of digitalization. In particular, the project received the first prize for social entrepreneurship at Madrid Impacta 2022, as well as the first prize in innovation proposed by a startup at the First Edition of Digitalization Awards in Madrid, presented by the President of the Community, Isabel Díaz Ayuso. Likewise, the model developed here aims to be used to respond to Projects within the European Commission's Horizon framework, in which the collaborating company IdEst Advisory participates in consortium with the Pontifical University of Comillas.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	8
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	11
Capítulo 3. Definición del Trabajo	18
3.1 Justificación.....	18
3.2 Objetivos	19
3.3 Metodología.....	19
3.4 Recursos	21
3.5 Planificación y Estimación Económica	21
Capítulo 4. Modelado del despliegue de infraestructuras TIC	25
4.1 Planteamiento y flujograma.....	25
4.2 Hipótesis de modelado	28
4.3 Nomenclatura	30
4.4 Función objetivo.....	33
4.5 Restricciones	34
4.5.1 Restricción de capacidad	34
4.5.2 Restricciones de demanda.....	34
4.5.3 Restricciones de construcción y desmantelamiento	35
Capítulo 5. Datos de Entrada.....	39
5.1 Localización de torres de telecomunicación.....	39
5.1.1 Localización Actual de Torres De Telecomunicación.....	39
5.1.2 Localización Futura de Torres de Telecomunicación.....	42
5.2 Cobertura.....	43
5.3 Capacidad.....	47
5.4 Demanda.....	49
5.5 Costes	50
5.5.1 Costes de Emplazamiento.....	50
5.5.2 Costes de Nodo.....	54
Capítulo 6. Impacto Social.....	59

Capítulo 7. Implementación en Código	63
7.1 Inicialización del modelo y de los datos a representar	63
7.2 Implementación del Modelo en Código	65
Capítulo 8. Análisis de Resultados y Casos de Estudio.....	68
8.1 Impacto Socioeconómico en Zonas Rurales.....	68
8.1.1 Escenario Atemporal	70
8.1.2 Escenario Temporal	84
8.1.3 Evaluación del Impacto.....	95
Capítulo 9. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	103
Capítulo 10. Bibliografía.....	107
ANEXO I: Alineación del Proyecto con los ODS	112
ANEXO II: Código Del Modelo.....	114
ANEXO III: Representación Temporal del Despliegue de Telecomunicaciones en la Zona de Villasequilla de Yepes	115
ANEXO IV: Representación Temporal del Despliegue de Telecomunicaciones en la Zona de Chañe.....	122

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de Gantt del proyecto. Fuentes: Elaboración Propia	20
Figura 2. Flujograma del modelo. Fuentes: Elaboración Propia	27
Figura 3. Mapa de las torres de telecomunicación y operadoras. Fuente: [29]	40
Figura 4. Frecuencias y tecnología de una torre de telecomunicaciones. Fuente: [29].....	40
Figura 5. Localización de las torres de telecomunicación en el barrio de Argüelles. Fuente: [30]	41
Figura 6. Información sobre un nodo de telecomunicaciones de Telefónica en Argüelles. Fuente: [30]	41
Figura 7. Conversión de radio de cobertura a booleano cubierto/no cubierto. Fuente: Elaboración Propia	47
Figura 8. Zonas blancas y grises en España. Fuente: [57].....	60
Figura 9. Representación de emplazamientos construidos (en verde) y disponibles (en azul). Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 10. Representación de la demanda por parcelas. Fuente: Elaboración Propia.....	64
Figura 11. Representación de la cobertura inicial de las torres. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 12. Representación de los resultados del modelo. Fuente: Elaboración Propia.....	67
Figura 13. Distribución de la demanda alrededor de Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	72
Figura 14. Localización Inicial de las torres en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia.....	73
Figura 15. Comprobación demanda correcta Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración propia.....	74
Figura 16. Aumento de la demanda en un 200% en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	75
Figura 17. Aumento de la demanda en un 400% en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	76

Figura 18. Aumento de la demanda en un 800% en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	77
Figura 19. Distribución de la demanda alrededor de Chañe. Fuente: Elaboración Propia..	79
Figura 20. Localización inicial de las torres en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	79
Figura 21. Comprobación demanda correcta en Chañe. Fuente: Elaboración propia	80
Figura 22. Aumento de la demanda en un 200% en Chañe. Fuente: Elaboración Propia...	81
Figura 23. Aumento de la demanda en un 400% en Chañe. Fuente: Elaboración Propia...	81
Figura 24. Aumento de la demanda en un 800% en Chañe. Fuente: Elaboración Propia...	82
Figura 25. Representación de la variación del coste a lo largo de los 12 años en Villasequilla. Fuente: Elaboración Propia	89
Figura 26. Representación de la variación del coste a lo largo de los 12 años en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	94
Figura 27. Año 1 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	116
Figura 28. Año 2 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	116
Figura 29. Año 3 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	117
Figura 30. Año 4 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	117
Figura 31. Año 5 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	118
Figura 32. Año 6 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	118
Figura 33. Año 7 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	119
Figura 34. Año 8 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	119
Figura 35. Año 9 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	120
Figura 36. Año 10 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	120
Figura 37. Año 11 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	121
Figura 38. Año 12 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia	121
Figura 39. Año 1 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	123
Figura 40. Año 2 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	123
Figura 41. Año 3 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	123

Figura 42. Año 4 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	124
Figura 43. Año 5 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	124
Figura 44. Año 6 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	124
Figura 45. Año 7 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	125
Figura 46. Año 8 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	125
Figura 47. Año 9 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	125
Figura 48. Año 10 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	126
Figura 49. Año 11 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	126
Figura 50. Año 12 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	126

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los análisis en el Estado del Arte. Fuente: Elaboración propia ..	17
Tabla 2. Sueldo de los analistas, director y asesores del proyecto. Fuente: Elaboración Propia	22
Tabla 3. Coste de los analistas, director y asesores. Fuente: Elaboración propia	23
Tabla 4. Subíndices. Fuente: Elaboración Propia.....	30
Tabla 5. Parámetros. Fuente: Elaboración Propia	31
Tabla 6. Variables. Fuente: Elaboración Propia.....	32
Tabla 7. Radio de cobertura en función de la tecnología y la banda de frecuencias. Fuente: Elaboración Propia	46
Tabla 8. Capacidades en función de la banda de frecuencia y el ancho de banda. Fuente: Elaboración Propia	49
Tabla 9. CAPEX asociado a cada una de las tecnologías y frecuencias. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 10. OPEX asociado a cada una de las tecnologías y frecuencias. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Tabla 11. Impacto Social de las velocidades de 30 y 100 Mbps en entornos rurales. Fuente: [7]	62
Tabla 12. Datos para la ejecución del primer caso de estudio atemporal. Fuente: Elaboración Propia.....	71
Tabla 13. Inversiones de CAPEX realizadas en función de cada aumento de demanda. Fuente: Elaboración Propia	77
Tabla 14. Inversiones realizadas en función de cada aumento de demanda en Chañe. Fuente: Elaboración Propia	83
Tabla 15. Datos de entrada escenario temporal. Fuente: Elaboración Propia	86
Tabla 16. Costes asociados al despliegue de infraestructura en Villasequilla de Yepes durante 12 años. Fuente: Elaboración Propia	87
Tabla 17. Costes asociados al despliegue de infraestructura en Chañe durante 12 años. Fuente: Elaboración Propia	92

Tabla 18. Datos referentes al crecimiento de Villasequilla. Fuente: Elaboración propia ...	97
Tabla 19. Crecimiento económico de la región de Yepes. Fuente: Elaboración propia.....	98
Tabla 20. Datos referentes al crecimiento de Chañe. Fuente: Elaboración propia.....	101
Tabla 21. Crecimiento económico de la región de Chañe. Fuente: Elaboración propia ...	102
Tabla 22. Colores utilizados para la representación. Fuente: Elaboración Propia	115
Tabla 23. Colores utilizados para la representación. Fuente: Elaboración Propia	122

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En el año 2020, se ha sufrido una grave e inesperada crisis debida al virus COVID-19. Esta crisis obligó a imponer severas medidas de confinamiento internacional, nacional y local, durante más de 3 meses, donde los hábitos más enraizados como ir a la oficina o a la universidad o hacer ejercicio en el exterior tuvieron que ser modificados por otros de corte digital como el teletrabajo (69% de los trabajadores trabajaban de manera remota [1]), realizar videollamadas (30% de empresas globales empezaron a hacer videoconferencias en la pandemia [2]) o consumir contenidos de plataformas audiovisuales (como Netflix, que tuvo el mejor resultado topline y bottomline de su historia [3]). Como se puede intuir, todas estas actividades requieren conexión a Internet, por lo que las redes de telecomunicación han tenido un rol esencial durante esta pandemia. Además, si el teletrabajo no hubiera sido posible, las consecuencias económicas de esta crisis sanitaria podrían haber sido devastadoras.

Sin embargo, no todo el mundo ha estado disfrutando del mismo acceso a la infraestructura digital durante estos últimos años. La realidad de los entornos rurales es una completamente distinta a la de las zonas urbanas, poniendo de manifiesto una clara brecha digital. Por poner un ejemplo en esta línea, únicamente un 40% de las zonas rurales en toda Europa han contado con cobertura de banda ancha a través de tecnologías móviles durante el COVID, según un estudio elaborado por la Universidad Politécnica de Madrid [4].

Además, hay que destacar que, según otro estudio realizado por Cellnex, Red Eléctrica y la colaboración de Ericsson [5] sobre "Conectividad digital, fomento de la ciberseguridad y despliegue del 5G", el 33% de la geografía española está fuera de la huella de los 30 Mbps. Esta velocidad de conexión, que caracteriza la capacidad de acceso de entre 800 000 y 1 400 000 personas en el territorio nacional, no es suficiente para satisfacer todas las necesidades actuales de llamadas, videollamadas o ver contenido en stream. De hecho, esta situación da pie a otro gran problema al que se enfrenta la sociedad española, que es el de la despoblación rural. En España, hay 6815 municipios con menos de 5000 habitantes, que concentran a un

total de 5,7 millones de personas [6] . Estos municipios han perdido un total de 410.000 habitantes en la última década. Esta despoblación también llega a las pequeñas ciudades con 29 capitales de provincia que han perdido población en la última década. Las causas de este éxodo rural son muchas, pero la falta de infraestructuras de comunicación de alta velocidad podría ser una de las más significativas. Así, números estudios ([7], [8], [9]) señalan que desplegar infraestructura TIC de mayor capacidad podría ayudar a mitigar este éxodo rural, o incluso a repotenciar poblacional y socioeconómicamente estas regiones .

Aunque la infraestructura de las TIC aporta muchos beneficios al desarrollo de las comunidades rurales, los proveedores de servicios se enfrentan a varios retos cuando se expanden a las zonas rurales [10], siendo el mayor de ellos la rentabilidad. La dificultad radica en la monetización del espectro debido a los bajos ingresos, ya que hay menos abonados y en general, menor tráfico de datos. Por este motivo y con el objetivo de que toda la población disponga de conectividad de calidad, la unión europea ayuda a financiar estos despliegues y propone medidas para que sea viable económicamente [11]. Además, pese a que la fibra es más fiable y puede llegar a ofrecer conectividades más altas, las comunicaciones móviles pueden ser más económicas en algunos contextos ([7], [12], [13]) además de que con el 4G LTE y 5G se pueden llegar a obtener conectividades superiores a 100 Mbps y hasta 10 Gbps.

Estos tres principales problemas (la brecha digital entre el entorno rural y el urbano, la despoblación rural y el bajo retorno de inversión de los proveedores de servicios de telecomunicaciones) son los que motivan el desarrollo del trabajo que aquí se plantea.

Este trabajo tiene como objetivo proponer un modelo cuantitativo-financiero para abordar el problema del despliegue de infraestructura TIC en entornos rurales, con el fin último de realizar un análisis de repotenciamiento económico de la región devenido de la mejora en infraestructura de conectividad.

El modelo planteado considera datos de entrada de índole i) técnica (como el plan de red o la cobertura y capacidad aportada por cada tecnología y frecuencia de radiación), ii) financiera (como el CAPEX y el OPEX de los puntos de servicio), e iii) sociales (como el

tráfico de datos de la región), y propone un despliegue de torres y antenas para cubrir unas necesidades de cobertura y capacidad (inicialmente exógenas), minimizando la suma de los costes de instalación y operación.

Se han estudiado distintos casos de estudio ante diferentes hipótesis y escenarios de entrada, para mostrar la utilidad del modelo en materia de impacto social en entornos rurales. Para ello, se ha estudiado cuál sería el despliegue de infraestructura óptimo económicamente y se ha analizado el impacto socioeconómico en la región devenido del aumento de la conectividad.

El trabajo que aquí se expone está estructurado como sigue: en el segundo capítulo se presenta una revisión del estado del arte de los trabajos similares al propuesto en este escrito y se muestra una comparación frente a las soluciones actuales. En el tercer capítulo, se introduce la motivación del proyecto a través de la justificación de su realización, la metodología a seguir y los objetivos que se pretenden alcanzar. Además, en este capítulo se hará una breve estimación económica del proyecto. En el cuarto capítulo se presenta en detalle el modelado a través de una explicación en alto nivel del modelo para después explicar las hipótesis asumidas y formular las ecuaciones de este. En el quinto capítulo se presentan los datos de entrada que serán utilizados en el modelo: cobertura, capacidad, demanda y costes. En el sexto capítulo, se presenta la componente de impacto social que se tiene en cuenta tras la realización del modelo y cómo se valorará el impacto socioeconómico de un despliegue de telecomunicaciones en un entorno rural. En el séptimo capítulo, se presentará brevemente la implementación en Python. En el octavo capítulo, se presentan varios casos de estudios y se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, en el noveno capítulo, se presentan las principales conclusiones del trabajo y se proponen futuras líneas de trabajo que surgen a raíz de este modelo de optimización desarrollado.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La investigación sobre la planificación celular es más antigua que el propio sistema celular [14]. Cuando la red celular comenzó a expandirse, durante la década de los 90, se utilizaron por primera vez técnicas de optimización con el objetivo de maximizar la cobertura mientras se mantenía al mínimo el número de estaciones base [15]. Desde entonces, son numerosos los trabajos de investigación que han abordado el problema de planificar una red celular de manera óptima, minimizando costes, maximizando la cobertura o minimizando la potencia consumida. Estos trabajos ofrecen un punto de partida para el proyecto que aquí se quiere realizar.

El estudio realizado en [16] contempla que se está produciendo un cambio de paradigma en la planificación del despliegue de las redes de telecomunicación y tiene como objetivo analizar este cambio. Este trabajo defiende que en los sistemas celulares emergentes intervienen una gran variedad factores tecnológicos como i) la heterogeneidad de las redes, ii) la conectividad con la nube o iii) casos de estudio particulares basados en MIMO (multiple input multiple output), el IOT, o el M2M (machine to machine communication).

Así, [16] tiene como objetivo caracterizar el cambio de paradigma actual mediante una revisión del estado del arte, y una identificación de retos actuales y futuros sobre la planificación de red, teniendo en cuenta la aparición del 5G. Comienza con una explicación de las entradas y salidas típicas en un problema de planificación celular y caracteriza la complejidad computacional de abordar el problema, usando como referencia algunos modelos de planificación celular recogidos en la literatura actual. Tras esto, comparte algunos avances recientes para hacer que los problemas de planificación celular reflejen más fielmente la realidad. Por último, menciona los actuales retos que se encuentra la planificación celular actualmente y concluye con una discusión detallada sobre las oportunidades de investigación en este ámbito especialmente centradas en el 5G. Debido al análisis tan completo y detallado que se realiza en [16], éste se considera como el punto de partida del estado del arte y, consecuentemente, de este proyecto.

En el modelo desarrollado en este trabajo fin de grado se pretende tener en cuenta las tecnologías de 3G, 4G y 5G. Por ello, en lo que sigue se estudian diferentes trabajos en los que se desarrollan modelos de optimización de una red celular para cada una de estas tres tecnologías.

El trabajo de [17] propone un modelo de optimización integral con el objetivo de maximizar la cobertura total de una red 3G mientras minimiza los costes de inversión. En este estudio, se tiene en cuenta tanto la localización de la torre a instalar, como la configuración de ésta, que incluye, entre otras, la potencia máxima de emisión, la altura de la antena o el tilt, para que al establecer un nivel mínimo de relación señal a ruido, se pueda conocer la cobertura de una estación base. Uno de los problemas que se encuentra este modelo es que, debido a la complejidad en el cálculo de cobertura, se trata de un enfoque computacionalmente muy costoso, sin conseguir, a pesar de ello, resultados de alta precisión.

En [18] los autores abordan el problema de localización de estaciones base con el único objetivo de minimizar la interrupción en las conexiones. Para ello, consideran una red de telecomunicaciones heterogénea con una instalación inicial de un número fijo de micro emplazamientos. El algoritmo propuesto para abordar el problema, llamado SMART, se divide en tres pasos que son “Simulated Annealing” (SA), “Greedy with Memory” (GreedyMem) y “Simulated Annealing with memory” (SAMem). Se demuestra que SA y GreedyMem consiguen prácticamente la misma optimalidad en el despliegue cuando el número de iteraciones es alto pero que cuando es bajo, GreedyMem converge mucho más rápido que SA. Además, se muestra que en un el algoritmo SMART supera a anteriores técnicas metaheurísticas.

En el trabajo de [19] se aborda el problema de determinar la localización de las estaciones base de una red de 3G y su configuración considerando una minimización de costes con restricciones de cobertura y capacidad. Mientras que, en otros trabajos, estos dos objetivos se combinan en uno solo, este estudio plantea un algoritmo binivel en el que se maximiza la cobertura por un lado y se minimiza los costes totales por otro. La principal conclusión del trabajo es que, de esta manera, el modelo es computacionalmente más rápido y se pueden

conseguir soluciones aproximadas muy parecidas a los modelos multiobjetivo de un único nivel. Este trabajo se centra exclusivamente en el despliegue, pero carece de cronología, con lo que no es capaz de evaluar efectos como la mejoría tecnológica interanual o el desmantelamiento por envejecimiento de la infraestructura.

Dado que en este proyecto fin de grado sí se considera un marco temporal de inversión, el trabajo [20] es especialmente relevante. En él, los autores utilizan una herramienta de planificación para comparar el rendimiento computacional de diferentes algoritmos con el objetivo de optimizar el valor neto presente (NPV). Este NPV considera los ingresos esperados, CAPEX y OPEX de las antenas desplegadas (que se caracterizan tanto por sus estaciones base como por su direccionalidad y alcance) durante un periodo de 6 años. Con este objetivo de optimización sujeto a restricciones técnicas y económicas, se busca el número de estaciones base y sus localizaciones, así como el número de sectores por estación base. Los resultados muestran que el algoritmo Tabú es el que encuentra la solución óptima en comparación con otros enfoques debido a el uso de memoria adaptativa, aunque consume mayor tiempo.

Un modelo más simple que los anteriores, basado en 4G, es el de [21], en el que, según unas restricciones de cobertura y capacidad, el plan de red inicial y los emplazamientos potenciales donde poder construir nuevas torres, se aplica programación lineal para la selección de estaciones base con el objetivo de minimizar el coste tanto de instalación como de operación. Este modelo es menos complejo a en anteriores modelos la cobertura era endógena mientras que en este es exógena. Esto hace referencia a que se calcula la cobertura que tendría una torre en una determinada localización y se introduce como dato de entrada en el modelo a través de un booleano cubierto o no cubierto entre una torre y un punto del mapa. Este planteamiento es el que se seguirá en el proyecto fin de grado que se plantea ya que es computacionalmente menos costoso.

El modelo de [21] considera una capacidad agregada para celdas superpuestas. Es decir, en caso de que haya solapamiento entre las coberturas de dos torres, la demanda de la zona solapada se reparte entre ambas. Esta forma de modelar la red es realmente útil para redes

con tecnologías superiores a 3G ya que las interferencias entre celdas contiguas son mínimas y, aunque se trata de una aproximación de funcionamiento “ideal”, es una manera aproximada de representar la realidad. La principal carencia de [21] es que considera un tráfico de datos homogéneo en toda la zona de la planificación, además de no considerar un marco temporal de inversión y estar centrado únicamente en 4G, con lo que el impacto de los resultados está acotado a una casuística muy académica, en lugar de a un caso real.

Por su parte, el modelo realizado en [22] tiene como objetivo planificar una red celular 5G minimizando los costes al mismo tiempo que se busca maximizar la cobertura. Para ello, se basa en restricciones de campos electromagnéticos para calcular la cobertura y el nivel de señal mínimo que debe tener un usuario, mediante una estimación de la potencia radiada por un nodo de 5G. Debido a que el problema tiene una complejidad muy alta, se utilizan técnicas heurísticas, más concretamente PLATEA (Planning Algorithm Towards EMF Emissions Assessment), que se basa principalmente en un enfoque divide et impera, en el que el complejo problema de planificación se divide en conjuntos de subproblemas utilizando la frecuencia operativa como métrica de separación. Este trabajo tiene en cuenta, además, los campos electromagnéticos de otras tecnologías anteriores (2G, 3G y 4G) y como afectan sobre 5G. La principal conclusión recogida de este proyecto es que la planificación de 5G es factible en general utilizando este algoritmo, es decir, es posible atender una gran cantidad de píxeles mientras se limitan los costos de instalación y se aseguran las restricciones de EMF. Sin embargo, el principal problema con el que se encuentra este trabajo es que los parámetros de escala que se utilizan para estimar el nivel de exposición de los nodos 5G juegan un papel fundamental para determinar la viabilidad del problema y, en consecuencia, el conjunto de nodos instalados.

El trabajo en [23] tiene como objetivo diseñar un modelo de optimización de redes celulares 5G formulado con MILP. El modelo tiene en cuenta los parámetros físicos radioeléctricos y de planificación básicos tales como el ancho de banda, la demanda, el coste de instalación, la potencia transmitida o la relación señal a ruido. Este modelo considera una transición de 4G a 5G aplicando el enfoque de NSA (Non Standalone), en el que el nodo 5G en lugar de

conectarse a un nuevo core de 5G se conecta la infraestructura existente de 4G (EPC). De esta manera los costes de despliegue de 5G son menores.

Una vez se han estudiado diferentes modelos de optimización de redes celulares desde 3G hasta 5G, es necesario conocer cómo obtener los datos de entrada públicos como la localización inicial de las torres así como las opciones existentes para modelar datos de entrada como la cobertura, la capacidad, los costes o el tráfico de datos.

El tráfico en redes de comunicación celulares fluctúa mucho a lo largo del tiempo debido entre otras, a la movilidad de los usuarios. Para evitar cuellos de botella en la red, los operadores sobreestiman el volumen de tráfico durante la planificación celular (con el ánimo de ofrecer algo de holgura en la capacidad resultante). Por ejemplo, en [24] se considera un diseño de la red de telecomunicaciones teniendo en cuenta la incertidumbre del tráfico de datos, aplicando lo que se conoce como optimización robusta. Este tipo de optimización tiene como objetivo encontrar soluciones factibles para todos los grupos de datos en un conjunto de incertidumbre. En el estudio se presentan los resultados de comparar tres formulaciones matemáticas distintas para resolver el problema de diseño robusto de una red considerando 288 matrices de tráfico distintas. De entre las conclusiones más relevantes, se encuentra un análisis sobre la complejidad de modelar la incertidumbre sobre la cronología de la demanda mediante consideraciones estocásticas. En última instancia, plantea emplear el valor máximo de la demanda a modo de referencia en el diseño de las redes, aunque tampoco cierra la puerta a la definición de otras métricas más elaboradas desde el punto de vista estadístico.

En la referencia [25] se analizan los requerimientos en costes, cobertura y capacidad de redes 4G y 5G en dos ciudades de la India con el objetivo de satisfacer la demanda de datos móviles mediante estas dos tecnologías entre los años 2019 y 2029. Para ello, se realiza una estimación de cuál será el número de usuarios y la demanda de tecnologías 4G y 5G en ese intervalo de tiempo aplicando el modelo Bass, ampliamente utilizado para el pronóstico de ventas de nuevos productos y el pronóstico de tecnología. Este modelo divide a los usuarios en innovadores (independientes) e imitadores (se dejan llevar por otros usuarios) y se tienen

en cuenta tres factores fundamentales i) el mercado potencial, ii) el coeficiente de innovación y iii) el coeficiente de imitación. A continuación, computa el despliegue de infraestructura que cubre dichas necesidades, considerando diferentes escenarios (urbano, semiurbano y rural) para evaluar el CAPEX y el OPEX en función de la tecnología.

Este proyecto fin de grado se basa en el trabajo de [25] en lo que respecta a los datos de entrada para inspirar: i) el crecimiento interanual de la demanda pico, que está caracterizada por crecer en todos los años del horizonte bajo estudio, y ii) en el CAPEX y OPEX de las tecnologías bajo consideración.

Por último, el modelo propuesto en este trabajo también valora el impacto social de la instalación de infraestructura de telecomunicaciones en entorno rural. Para ello, el enfoque se apoya en [7] donde se estudia el impacto de la Agenda Digital Europea en las localidades rurales españolas y, más concretamente, el impacto que tiene en entidades singulares de menos de 10 000 habitantes el tener velocidades de 30Mbps o 100 Mbps. En este trabajo se utiliza un modelo de “Machine Learning”, más concretamente Causal Forest, con el objetivo de conocer si las entidades singulares se han visto beneficiadas por las políticas de la Agenda Digital Europea y conocer el impacto que ha tenido la implantación de redes de 30 y 100 Mbps en estas localidades.

Entre las conclusiones más relevantes, se destaca que aumentar la conectividad de 30Mbps a 100Mbps tiene ventajas muy notables en 4 ámbitos: renta media disponible (aumenta en un 2,3%), población total (aumenta en un 1,9%), tasa de paro (disminuye en un 0,7%) y afiliación a la seguridad social (aumenta en un 3,1%). De hecho, también se señala que el aumento de la conectividad a los 30 Mbps (en lugar de a 100 Mbps), también logra que se produzcan aumentos de renta promedio y de población, aunque con un impacto sustancialmente más limitado que el obtenido con el caso de los 100 Mbps.

El estado del arte de este proyecto, descrito en esta sección, permite clasificar los trabajos revisados en función de si estudian la localización de estaciones base, si tienen en cuenta los costes, la cobertura, la capacidad, si valoran un horizonte temporal, si están diseñados para

3G, 4G o 5G, y, por último, si se tiene en cuenta el impacto social en la región. La siguiente tabla muestra tal clasificación.

	<i>Localización de estaciones base</i>	<i>Costes</i>	<i>Cobertura</i>	<i>Capacidad</i>	<i>Marco temporal</i>	<i>3G</i>	<i>4G</i>	<i>5G</i>	<i>Impacto Social</i>
[17]	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	No	No
[18]	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	No
[19]	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	No	No
[20]	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No
[21]	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	No	No
[22]	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	Sí	No
[23]	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No
[24]	Sí	No	Sí	Sí	No	No	Sí	No	No

Tabla 1. Clasificación de los análisis en el Estado del Arte. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

Este Proyecto tiene como objetivo cubrir algunas de las carencias encontradas en los modelos de la revisión del estado del arte descrito en la sección anterior. Toma como punto de partida el modelo de [21] pero expande la formulación para incluir la inversión en diferentes tecnologías (desde 3G hasta 5G), un horizonte de inversión multianual, así como consideraciones sobre el impacto social devenido del despliegue.

Al incluir la representación de múltiples tecnologías, el modelo desarrollado permite capturar la heterogeneidad tecnológica del contexto actual, en el que conviven tecnologías desde el 2G al 5G. En este sentido, el modelo permite tanto representar la inversión como la desinversión (desmantelamiento) de distintas torres por razones como i) la sustitución de nodos dedicados a 2G por otros que incorporen funcionalidades del 5G y ii) el posible rediseño de la red considerando oportunidades de consolidación de la infraestructura de diversos agentes, con el fin de hacerla más eficiente en costes. Para el análisis de diferentes tecnologías, se estudian modelos de 3G ([17]–[20]), de 4G ([18], [21], [24]) y de 5G ([22], [23]).

El modelo que aquí se propone considerará una minimización de costes en la planificación de red celular para varias tecnologías teniendo en cuenta un horizonte temporal multianual, considerando restricciones de cobertura y capacidad. Esta perspectiva es crítica para los inversores en infraestructura, para los que las posibles tendencias de crecimiento en materia de demanda de datos, y las políticas de repotenciación rural, pueden tener un importante impacto sobre la rentabilidad de la inversión en la cola de la vida útil. Este modelo se apoya en datos públicos para la localización de las antenas y en la documentación de [24], [25] para estimar el valor de algunos datos de entrada al modelo como la cobertura, la capacidad, los costes y el tráfico de datos móviles.

Así, entre otros, este modelo tiene como objetivo servir como herramienta en el proceso de toma de decisiones para cerrar la brecha digital entre los entornos urbanos y rurales, buscando una repotenciación económica de la región a través de la inversión en infraestructura de telecomunicaciones. Para ello, este proyecto se apoya en [7] para conocer cuál es el valor mínimo necesario de capacidad para que diversos indicadores socioeconómicos se vean mejorados.

3.2 OBJETIVOS

El modelo de inversión se apalanca en metodologías enraizadas en investigación operativa y ha sido programado en Python para perseguir los siguientes objetivos:

- Desarrollar el modelo de optimización para evaluar los emplazamientos en los que desarrollar servicios de conectividad, combinando diferentes tecnologías en un contexto multianual, minimizando los costes de despliegue y, considerando restricciones de ubicación, cobertura y capacidad.
- Calcular los costes totales del modelo de inversión en TIC para los próximos años, valorando el coste/beneficio social en una zona rural concreta, evaluada mediante un caso de estudio ad hoc.
- Servir como herramienta para la toma de decisiones en política regulatoria orientada a combatir la brecha digital entre entornos urbanos y rurales.
- A partir de los estudios realizados se pretende realizar un artículo de investigación para su posible publicación.

3.3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos expuestos anteriormente se ha realizado, en primer lugar, una cuidada revisión bibliográfica, para desarrollar un mejor entendimiento de investigación operativa y del funcionamiento de una red celular para las diferentes tecnologías existentes, así como a obtener los datos necesarios para alimentar el modelo propuesto en este trabajo. Además, se realizó una revisión de proyectos de índole similar y una búsqueda activa de herramientas que puedan servir para apoyar la realización del proyecto.

La segunda fase del proyecto ha estado orientada al desarrollo del propio modelo matemático, abordado principalmente en tres etapas. En primer lugar, una etapa de formulación de las ecuaciones, seguida de una etapa de implementación en código y, finalmente, una etapa de validación, para analizar su respuesta ante análisis de sensibilidades y comprobar que las salidas resultantes son coherentes con los escenarios planteados. Estas tres etapas, como se puede observar en el diagrama de Gantt, son prácticamente paralelas, debido a que se sigue una metodología Agile. Esto hace referencia a que, se empieza formulando un primer modelo básico funcional, se implementa en código y una vez validado tanto a nivel técnico como con los diferentes stakeholders, se añaden mejoras sobre el primer modelo, y se repite el proceso de forma iterativa, hasta llegar a una versión final, consolidada para el entregable. Además, en cada una de estas iteraciones y una vez que se ha verificado que el modelo se comporta bien frente a escenarios simples, se presentan casos más complejos para explorar el compromiso entre complejidad e impacto del modelado.

Una vez desarrollado, implementado y validado una primera versión del modelo, se ejecuta el modelo en casos de uso reales con el objetivo de presentarlo en concursos donde se pueda obtener financiación.

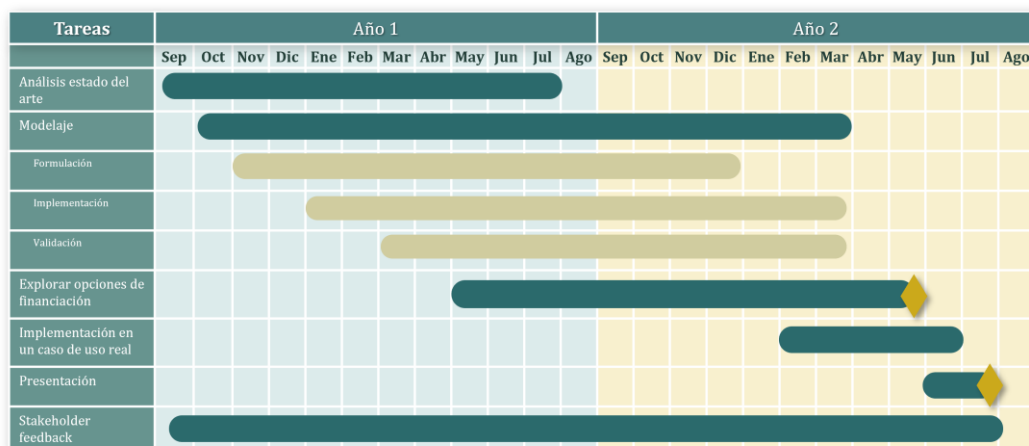


Figura 1. Diagrama de Gantt del proyecto. Fuentes: Elaboración Propia

3.4 RECURSOS

La revisión bibliográfica se hará con la documentación encontrada en internet y la base de datos que la Universidad Pontificia Comillas pone a disposición de sus alumnos.

El desarrollo del modelo se realizará mediante Python, utilizando la librería de pyomo, especializada en problemas de optimización. El solver utilizado será Gurobi, empleando una licencia proporcionada por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT).

Para el análisis de los resultados de los casos de estudio, la redacción de la memoria y la presentación del proyecto se empleará el paquete de ofimática de Microsoft Office (Word, Excel y Powerpoint).

3.5 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

La planificación del modelo es la que se muestra en la Figura 1 siguiendo la metodología explicada en el apartado 0 de este trabajo. En referencia al coste de cada una de las actividades mencionadas en el apartado de metodología, en primer lugar, se debe calcular el coste asociado al tiempo de trabajo de cada una de las personas implicadas en el proyecto. Desde IdEst Advisory, empresa colaboradora en este proyecto, se plantea un grupo de trabajo para este tipo de proyectos que es el siguiente. El equipo estará formado por un analista junior (generalmente un becario, estudiante joven en la mitad de la carrera), un analista senior (un estudiante en su último año de carrera o ya graduado), un director de proyecto (la persona que gestiona el proyecto y que tiene experiencia previa con proyectos similares) y asesores (personas con gran experiencia en el sector en el que se desarrolle el proyecto, en este caso, las telecomunicaciones). Según el rol de cada persona el sueldo obtenido variará. Seguidamente, se plantea una estimación de cuánto cobraría cada persona en este proyecto, sin descontar el IRPF:

<i>Puesto</i>	<i>Sueldo a la hora</i>	<i>Horas trabajadas en un mes</i>	<i>Sueldo recibido al mes</i>
Analista Junior	7€	40	280€
Analista Sénior	18€	80	1.440€
Director de Proyecto	45€	40	1.800€
Asesores	100€	10	1.000€
Total	-	-	4.520€

Tabla 2. Sueldo de los analistas, director y asesores del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

Se estima que un analista junior únicamente le puede dedicar al proyecto unas 10 horas semanales debido a que todavía está a mitad de la carrera y tendrá mayor carga académica. Un analista senior se considera que trabaja unas 20 horas semanales a media jornada. Un director de proyecto se considera que trabaja alrededor de 10 horas semanales ya que un único director tendría entre 3 ó 4 proyectos. Por último, se considera que los asesores se les hará unas consultas de unas 2,5 horas a la semana. Con todos estos datos, se obtiene que el coste asociado a los trabajadores del proyecto es de 4.520€ al mes, o unos 54.000€ al año.

Si se analizan los recursos empleados (apartado 3.4), se puede observar que Python no tiene ningún coste asociado, pero Gurobi y el paquete de Office sí. Al basarse en los datos de [26], se deduce que la licencia de Gurobi tiene un coste de entre 5.000€ y 11.000€ anual, en función del número de usuarios y sesiones. Para realizar este análisis, se usará el valor más alto (11.000€). Por último, las licencias de Microsoft Office también tienen un coste asociado y tomando como referencia los precios de [27], se estima que el coste estaría entre los 200€ y los 720€ anuales, en función del plan elegido y estimando que va a ser usado por 3 usuarios en este proyecto. Por lo tanto, a raíz de estos cálculos, se obtendría un precio anual

del proyecto alrededor de 66.000€. Como la duración del proyecto son aproximadamente dos años, este precio total sería 132.000€.

Una vez analizado el coste total del proyecto, se van a estudiar diferentes vías de financiación, comenzando con la financiación necesaria para la realización del proyecto. El precio evaluado para este proyecto estaría en torno a los 100.000€ anuales, basándonos en los costes establecidos en la Tabla 3, que son el precio que se le cobraría a una empresa.

<i>Puesto</i>	<i>Coste a la hora</i>	<i>Horas trabajadas en un mes</i>	<i>Coste al mes</i>
Analista Junior	10€	40	400€
Analista Sénior	30€	80	2400€
Director de Proyecto	100€	40	4000€
Asesores	200€	10	2000€
Total	-	-	8800€

Tabla 3. Coste de los analistas, director y asesores. Fuente: Elaboración propia

Se aspira a obtener esta financiación mediante inversores públicos y privados, además de premios de innovación. Si este proyecto se realizara directamente para una empresa, se le cobraría unos 100.000€ al año para la realización del proyecto. Sin embargo, este es un proyecto ya realizado y que no se puede medir el precio hacia una empresa en horas. Por lo tanto, se establece también un precio en función de análisis. Esto quiere decir que, si se quiere desplegar infraestructura de telecomunicaciones en una zona concreta, se harían los análisis y posteriormente para que el cliente pueda visualizarlos debe pagar un precio que rondaría los 2.000€ por análisis. Siguiendo con este planteamiento, resulta de interés el convertir esta herramienta en un SaaS (Software as a Service) ya que sería mucho más cómodo de escalar y de obtener financiación.

Por último, para financiar el proyecto también se presenta el modelo a premios de innovación y concursos. Concretamente, este trabajo ha recibido el premio Madrid Impacta al mejor proyecto de emprendimiento social realizado por un emprendedor joven por una cuantía de 2.000€ y el premio al mejor proyecto de digitalización propuesto por una startup en la Comunidad de Madrid, este último de naturaleza honorífica.

Capítulo 4. MODELADO DEL DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURAS TIC

4.1 PLANTEAMIENTO Y FLUJOGRAMA

El modelo de optimización propuesto representa inversiones en infraestructuras TIC en un contexto multianual minimizando el coste de despliegue y operación. En concreto, los costes considerados son los asociados a la construcción, mantenimiento y desmantelamiento tanto de emplazamientos como de antenas de distintas tecnologías desplegadas en dichos emplazamientos.

En este contexto, el término "emplazamiento" se refiere al lugar físico o la ubicación específica donde se instala y se despliega un equipo de telecomunicaciones. Por lo general, se utiliza para hacer referencia a las instalaciones de infraestructura que albergan equipos de telecomunicaciones, como antenas, torres, cables, racks de equipos, etc. Un emplazamiento puede ser un edificio, una torre de comunicaciones, una estación base o cualquier otra estructura diseñada para albergar equipos de telecomunicaciones. Así, dentro de un emplazamiento pueden convivir diferentes tecnologías como 2G, 3G, 4G y 5G de manera simultánea, que incluso pueden operar a diferentes frecuencias [28]. El término "tecnología" se refiere, en lo que sigue, a los puntos de servicio (PoS) de una tecnología de red (2G, 3G, 4G, 5G), desplegada para cubrir la demanda dentro de la zona de su cobertura mediante antenas omnidireccionales, que operan a una frecuencia determinada. También se utilizará el término de nodo que hace referencia a una tecnología y banda de frecuencia específica. Por ello en este trabajo se diferencia entre el coste del emplazamiento y el coste asociado a la tecnología que se instale, contemplando que desde un emplazamiento se pueden ofrecer servicios asociados a más de una tecnología.

Para el modelado se consideran restricciones de cobertura, capacidad, entorno (urbano, semiurbano y rural) y de tiempo de vida. La restricción de cobertura hace referencia a satisfacer al mayor número de usuarios posible, mientras que la de capacidad hace referencia a que no se sature la red porque haya muchos usuarios conectados a un mismo emplazamiento de telecomunicaciones. Además, se debe tener en cuenta que la cobertura variará en función del entorno, siendo mucho mayor en entornos rurales que en urbanos, debido a una menor presencia de agentes y cuerpos que causen interferencias. Finalmente, en el modelo se considera que los emplazamientos y las tecnologías deben ser actualizadas o reconstruidas cada cierto tiempo, de acuerdo con el tiempo de vida del activo. En última instancia, las salidas del modelo se refieren a la actualización del plan de red que aborda el despliegue de manera eficiente en costes. Para ello, de la zona bajo estudio, se necesita conocer, en primer lugar, el plan de red inicial, esto es, la localización de los emplazamientos y las tecnologías que operan en cada uno de ellos. En segundo lugar, también se necesita contar con las posibles ampliaciones de dicho plan de red, esto es, las localizaciones en las que se podrían construir nuevos emplazamientos. Por último, se requiere de una estimación de la demanda de datos zonal, (con un grado adecuado de granularidad geográfica), ya que la evolución de esta variable es la que llevará a establecer las zonas más estratégicas de despliegue.

En la siguiente figura se presenta de manera esquemática un flujograma del modelo desarrollado en el que se presentan parámetros de entrada, restricciones y salidas. Las salidas del modelo pueden ser directas, como las variables de decisión de construir o dismantelar, o pueden ser indirectas, como las salidas que se calculen a partir de las directas, p. ej. el impacto social.

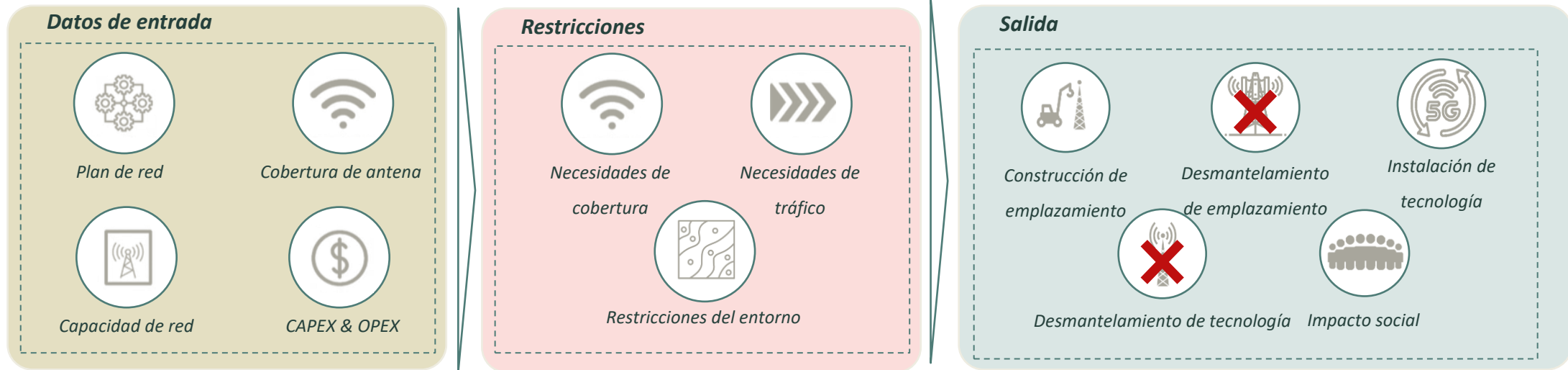


Figura 2. Flujograma del modelo. Fuentes: Elaboración Propia

4.2 HIPÓTESIS DE MODELADO

En este apartado se describen las hipótesis del modelo propuesto. Es importante diferenciar entre hipótesis de modelado e hipótesis de ejecución ya que estas últimas hacen referencia a simplificaciones realizadas por motivos computacionales. Por su parte, las hipótesis presentadas en este apartado hacen referencia a las suposiciones realizadas con el objetivo de simplificar una realidad extremadamente compleja para poder representar decisiones reales a través de ecuaciones matemáticas. Estas hipótesis son las siguientes:

- 1) El nivel de señal no se considera en el modelo como dato de entrada, sino que se considera un booleano “cubierto/no cubierto” para cada relación emplazamiento- tecnología-parcelas. En términos prácticos de hipótesis de ejecución, si una parcela es cubierta en más de un 50% por una tecnología posicionada en un emplazamiento, se considerará que la parcela ha quedado cubierta.
- 2) Se considera una capacidad agregada entre emplazamientos. Esto quiere decir que, si dos emplazamientos cubren una parcela, la demanda de la parcela será dividida entre los dos de la manera óptima según el modelo.
- 3) No se consideran ni interferencias ni asignación de canales.
- 4) No se considera un enfoque de competencia, sólo son modeladas las decisiones de un solo agente, que jugaría el papel de un decisor centralizado.
- 5) No se considera la mejora de un emplazamiento ya que depende de mejoras en tecnología difíciles de prever en el futuro y aumenta considerablemente la complejidad del modelo.
- 6) Se consideran antenas omnidireccionales.
- 7) No se considera una demanda por tecnología, sino que frente a una demanda global de conectividad se busca la mejor solución considerando varias tecnologías.
- 8) No se diferencia entre uplink y downlink, sino que se estudia el caso más desfavorable (el que requiere de mayores necesidades de conectividad), que suele ser downlink.

- 9) Se considera una demanda creciente durante los años en los que se realiza la estimación.
- 10) Se tiene en cuenta que el valor y consecuentemente el coste de la tecnología es menor en función avanzan los años.
- 11) Se aplica una tasa de descuento para calcular el valor actual de los costes que se paguen en el futuro.
- 12) Se considera que los costes de construcción se pagan directamente el primer año en el que el emplazamiento o nodo son construidos. Esto es, sin amortización o depreciación a lo largo de su vida útil.
- 13) Se considera un tiempo de vida de los emplazamientos y de los nodos después del cual se debe desmantelar, o bien reconstruir.

4.3 NOMENCLATURA

En esta sección se recoge la nomenclatura empleada en la formulación del modelo. Variables endógenas e índices se representan con minúscula y los parámetros se representan con mayúscula.

<i>Índices</i>	<i>Significado</i>
s	Emplazamiento (“site”)
t	Tecnología
l	Parcela (“lot”)
y	Año (“year”)

Tabla 4. Subíndices. Fuente: Elaboración Propia

<i>Parámetros</i>	<i>Significado</i>
A_s	Emplazamientos iniciales [binaria, 1: Construido, 0: No construido]
$N_{s,t}$	Nodo de una tecnología en un emplazamiento [binaria, 1: Construido, 0: No construido]
$\Omega_{s,t,l}$	Cobertura de una parcela por un nodo de una tecnología localizado en un emplazamiento [binaria, 1: Cubierta, 0: No cubierta]
$DEM^{MAX}_{l,y}$	La demanda máxima en una parcela en un año [MB/s]
$CAP_{s,t}$	Capacidad de un emplazamiento para una tecnología [MB/s]
$CBA_{s,y}$	Costes de construir un emplazamiento un año [k€]

$CBN_{s,t}$	Costes de construir un nodo en un emplazamiento un año [k€]
$CXA_{s,y}$	Costes de mantenimiento de un emplazamiento [k€]
$CXN_{s,t,y}$	Costes de mantenimiento de un nodo en un emplazamiento [k€]
$CDECA_{s,y}$	Coste de desmantelamiento de un emplazamiento un año [k€]
$CDECN_{s,t,y}$	Coste de desmantelamiento de un nodo de un emplazamiento en un año [k€]
A	Porcentaje de demanda que se pretende cubrir [p.u.]
LTA_s	Tiempo de vida de un emplazamiento [años]
$LTN_{s,t}$	Tiempo de vida de un nodo [años]
TD_y	Tasa de descuento [p.u.]

Tabla 5. Parámetros. Fuente: Elaboración Propia

<i>Variables</i>	<i>Significado</i>
$\alpha_{s,y}$	Decisión de mantener construido un emplazamiento [binaria]
$n_{s,t,y}$	Decisión de mantener construido un nodo de una tecnología en un emplazamiento [binaria]
$u_{s,t,l,y}$	Demanda de cada lot cubierta por un nodo de una tecnología concreta localizado en un emplazamiento en un año [MB]
$z_{l,y}$	La demanda cubierta de un lot en un año [MB]

$ba_{s,y}$	Decisión de construir un emplazamiento [binaria]
$bn_{s,t,y}$	Decisión de construir un nodo de una tecnología en un emplazamiento [binaria]
$deca_{s,y}$	Decisión de desmantelar un emplazamiento [binaria]
$decn_{s,y,t}$	Decisión de desmantelar un nodo de una tecnología en un emplazamiento [binaria]

Tabla 6. Variables. Fuente: Elaboración Propia

4.4 FUNCIÓN OBJETIVO

El modelo de inversiones propuesto minimiza la suma de los costes asociados a la construcción, mantenimiento y desmantelamiento tanto de un emplazamiento como de los nodos incluidos en él.

$$\begin{aligned}
 E. 1 \quad \text{Min} \quad & \sum_{y>0} \sum_s \frac{ba_{sy} CBA_{sy} + \alpha_{s,y} CXA_{s,y} + dec\alpha_{s,y} CDECA_{sy}}{[1 + TD_y]^y} \\
 & + \sum_{y>0} \sum_s \sum_t \frac{bn_{sty} CBN_{sty} + n_{s,t,y} CXN_{s,t,y} + decn_{sty} CDECN_{sty}}{[1 + TD_y]^y}
 \end{aligned}$$

Como se puede observar en la ecuación E. 1 hay dos sumandos. El primero hace referencia a los costes asociados a un emplazamiento y a las decisiones que llevan a asumir esos costes mientras que el segundo hace referencia a los nodos, las decisiones de inversión y sus costes asociados. Estos se reparten (en el orden que aparecen en la ecuación) en costes de construcción, costes de mantenimiento y costes de desmantelamiento. Los tres costes se dividen entre uno más el valor de la tasa de descuento elevado al año, con el objetivo de retraer los costes al momento presente. Además, este sumatorio únicamente se realiza para años posteriores a la inicial para no considerar los "costes hundidos" del plan de red inicial.

4.5 RESTRICCIONES

4.5.1 RESTRICCIÓN DE CAPACIDAD

En esta restricción del modelo, se pretende restringir que la suma de la demanda total que es cubierta por un nodo de una tecnología no supere a su capacidad. Esta restricción está basada en que si la demanda soportada por un nodo de telecomunicaciones supera su capacidad, la red se congestiona y la calidad del servicio decae. Esto es, que si un nodo tiene una capacidad de 1Gbps y un instante de tiempo se quieren hacer transmisiones utilizando este nodo por valor de 2Gb, habrá congestión y la latencia será mayor.

$$E. 2 \quad \sum_l \Omega_{s,t,l} u_{s,l,t,y} \leq CAP_{s,t} n_{s,t,y} \quad \forall s, t, y > 0$$

Esta ecuación indica que para cada nodo de cada emplazamiento tiene que cumplir que la capacidad de un nodo construido (término de la derecha) debe ser mayor o igual que la suma de toda la demanda que cubre en todas las parcelas a las que llega con un nivel de señal mínimo (término de la izquierda), para todo año del horizonte bajo estudio. Es decir, si un nodo tiene una capacidad de 1Gbps, en ningún momento la suma de la demanda de todos los usuarios a los que está prestando servicio ese nodo puede superar 1GBps.

4.5.2 RESTRICCIONES DE DEMANDA

4.5.2.1 Restricción de demanda por parcela

Al haberse considerado que la demanda de una parcela puede cubrirse combinando nodos de distintos emplazamientos, la siguiente restricción impone que la suma de la demanda cubierta por varios emplazamientos con cobertura en una parcela sea mayor o igual al nivel de demanda que se quiere llegar en esa parcela.

$$E. 3 \quad \sum_s \sum_t u_{s,l,t,y} \Omega_{s,t,l} \geq z_{l,y} \quad \forall l, y > 0$$

Nótese que en la ecuación anterior no se impone que el reparto de la demanda tenga que ser equitativo, sino que la forma de repartir la demanda es la óptima escogida de manera endógena por el modelo.

4.5.2.2 Restricción de demanda global

En muchas ocasiones es complicado que se alcance una cobertura de toda la demanda de una zona. Por ello, en ese modelo se introduce un parámetro Λ que indica el porcentaje de toda la demanda que se pretende cubrir. Es por este parámetro que se introduce la variable z en el modelo, ya que si quisiéramos cubrir toda la demanda podríamos sustituir en la ecuación E. 3 el término z por el parámetro de demanda máxima y el modelo cubriría toda la demanda.

$$E. 4 \quad \sum_l z_{l,y} \geq \Lambda \sum_l DEM_{l,y}^{MAX} \quad \forall y > 0$$

Esta restricción impone que la demanda total cubierta por el modelo debe ser mayor a la suma de la demanda máxima de todas las parcelas multiplicado por un parámetro Λ cuyo valor oscila entre 0 y 1. Por ejemplo, si se quiere que el modelo cubra el 95% de la suma de la demanda en las distintas regiones, el parámetro Λ toma el valor 0.95, sin hacer consideraciones específicas sobre si en cada una de las parcelas se cubra el 95% o bien si en el 95% de las parcelas estén cubiertas al 100% de su demanda máxima.

4.5.3 RESTRICCIONES DE CONSTRUCCIÓN Y DESMANTELAMIENTO

4.5.3.1 Restricciones de construcción y desmantelamiento de un emplazamiento

Si un año un emplazamiento está construido y al siguiente pasa a no estarlo, ha tenido que ser desmantelado por lo que la variable asociada a los costes de desmantelamiento de un emplazamiento ($deca_{s,y}$) debe pasar a valer 1. De esta condición se obtiene la ecuación E. 5.

$$E. 5 \quad dec\alpha_{s,y} \geq \alpha_{s,y-1} - \alpha_{s,y} \quad \forall s, y > 0$$

Si se analiza la anterior ecuación, *dec* tratará de tomar el valor 0 siempre que le sea posible para minimizar los costes del sistema. Por ello, *dec* únicamente va a valer 1 en el momento en el que el año pasado un emplazamiento estuviera construido y este año ya no esté. Ahora bien, esta ecuación ha de ser analizada con las siguientes, y en particular con la ecuación 11, que será la que relacione la necesidad de despliegue con la posibilidad de operación del activo.

Se debe tener en cuenta que en muchas ocasiones se desmantela un emplazamiento por motivo de haber transcurrido o su vida útil (LTA_s). Por ello, en este modelo se impone que pasada la vida útil de un emplazamiento se tiene que pagar los costes de desmantelamiento. Sin embargo, también se da la opción de que en el mismo año en el que es desmantelado se pueda volver a reconstruir.

$$E. 6 \quad b\alpha_{s,y} \geq \alpha_{s,y} - \alpha_{s,y-1} + dec\alpha_{s,y} \quad \forall s, y > 0$$

Al analizar la ecuación E. 6, si se ignora el término de desmantelamiento es una ecuación muy parecida a E. 5, solo que en esta hacemos referencia a la construcción. Su lectura, ignorando el término de desmantelamiento, sería que, si un emplazamiento está construido un año y el anterior no lo estaba, la variable que hace referencia a los costes de construcción debe valer 1.

Ahora, como se comentaba previamente, puede ocurrir que se pase la vida útil de un emplazamiento, por lo que el desmantelamiento pasaría a valer 1. En este momento, surgen dos casos. El primero es en el que después del desmantelamiento se decide que no merece la pena reconstruirlo para el año siguiente por lo que en la ecuación E. 6, $\alpha_{s,y}$ tendría valor 0, $\alpha_{s,y-1}$ tendría valor 1 y el desmantelamiento valdría 1. En este caso, la variable $b\alpha_{s,y}$ se mantendría en 0. En el segundo caso es en el que se ha desmantelado el emplazamiento, pero se quiere que siga operativo, es decir $\alpha_{s,y} = 1$. En este caso obligatoriamente $b\alpha_{s,y}$ tiene que valer 1 porque, aunque las dos $\alpha_{s,y}$ valen 1, el desmantelamiento también tiene valor 1. Por

lo tanto, esta restricción impone que el coste de construcción siempre se tenga en cuenta cuando un emplazamiento pasa de estar operativo a no estarlo incluso cuando ha sido desmantelado en el mismo año.

Por último, se ha comentado que después del tiempo de vida un emplazamiento debe ser desmantelado o al menos sustituido y esto es lo que se ve en la ecuación E. 7.

$$E. 7 \quad \sum_{y-LTA_s}^{y-1} \alpha_{s,y} + b\alpha_{s,y-LTA_s} - LTA_s \leq deca_{s,y} \quad \forall s, y > 0$$

En esta ecuación se indica que si durante los últimos LTA_s años la variable $\alpha_{s,y}$ ha valido 1, (es decir, que el emplazamiento ha estado operando, primer término de la ecuación) y los costes de construcción se pagaron hace LTA_s años (segundo término), la variable de desmantelamiento debe valer 1. Por ejemplo, si los último LTA_s años mi emplazamiento ha estado operando el primer término valdrá LTA_s , que se compensa con el tercer término. Además, si justamente se construyó hace LTA_s años, el segundo término sería 1 obligando al desmantelamiento a ser 1. En el caso en el que el emplazamiento haya estado operativo durante los últimos LTA_s pero no se construyó justamente hace LTA_s años, el desmantelamiento se mantendrá a 0. Por último, en el caso en el que no haya estado operativo los últimos LTA_s , el desmantelamiento también será 0, porque la parte izquierda sería 0 o negativa. El resultado de esta ecuación condiciona las ecuaciones E. 5 y E. 6 de la manera que se ha explicado previamente.

4.5.3.2 Restricciones de construcción y desmantelamiento de un nodo

Las restricciones de construcción y desmantelamiento de un nodo son equivalentes a las previamente explicadas en el apartado anterior. Es más, se puede observar como las ecuaciones E. 5, E. 6 y E. 7 son idénticas a E. 8, E. 9 y E. 10, respectivamente, pero estas últimas utilizan las variables asociadas a los nodos. El razonamiento, por tanto, para estas ecuaciones es el mismo que en el apartado anterior.

$$E. 8 \quad decn_{s,t,y} \geq n_{s,t,y-1} - n_{s,t,y} \quad \forall s, t, y > 0$$

$$E. 9 \quad bn_{s,t,y} \geq n_{s,t,y} - n_{s,t,y-1} + den_{s,y} \quad \forall s, t, y > 0$$

$$E. 10 \quad \sum_{y-LTA_{s,t}}^{y-1} n_{s,t,y} + bn_{s,t,y-LTA_{s,t}} - LTA_{s,t} \leq decn_{s,t,y} \quad \forall s, t, y > 0$$

Sin embargo, para construir un nodo es necesario una restricción más, que es la que hace que los emplazamientos sean importantes. Esta restricción es la que aparece en la ecuación E.11, que impone que para que un nodo opere debe haber construido un emplazamiento y que este esté operativo.

$$E. 11 \quad n_{s,t,y} \leq \alpha_{s,y} \quad \forall s, t, y > 0$$

Capítulo 5. DATOS DE ENTRADA

En este capítulo se explica el tratamiento de los datos de entrada al modelo además de analizar las fuentes de las que han sido obtenidos.

5.1 LOCALIZACIÓN DE TORRES DE TELECOMUNICACIÓN

Para realizar un análisis detallado de un modelo de planificación de red celular como es el que se presenta en este trabajo, es necesario tener dos tipos de datos en referencia a la localización de las torres de telecomunicación. Por un lado, se necesita tener datos de la localización actual de las torres de telecomunicación y, por otro, es necesario conocer donde se pueden instalar nuevas torres de telecomunicación

5.1.1 LOCALIZACIÓN ACTUAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIÓN

Los datos de la localización actual de las torres se pueden encontrar en diferentes fuentes como [29] donde se visualizan datos de la localización actual de las torres de telecomunicación en España, las operadoras en cada localización (ver Figura 3), las frecuencias en las que operan y en qué tecnología opera cada una (ver Figura 4).

Además, también se pueden encontrar datos oficiales del gobierno de España con la localización de las torres de telecomunicación [30], que contrastando con los datos anteriores coinciden las localizaciones (ver Figura 3 y Figura 5). La principal novedad de estos datos es que ofrecen información sobre los niveles medidos en el entorno (ver Figura 6), lo que es resulta de gran interés para el cálculo de cobertura que se verá posteriormente.

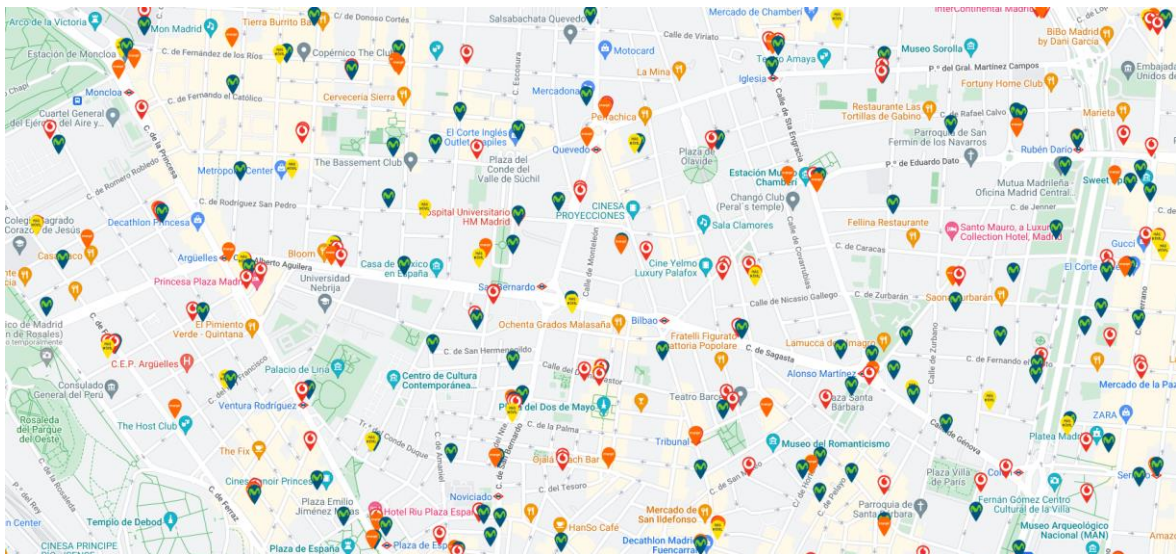


Figura 3. Mapa de las torres de telecomunicación y operadoras. Fuente: [29]

TELEFONICA MOVILES ESPAÑA, S.A.U.

Estación: 2805151
 Dirección: CL Alberto Aguilera, 50. MADRID, MADRID
 Posición: 40.430622 lat / -3.71255 lng
 Elevación: **Sólo PRO**

ID	BANDA	MODOS*
1	1805.10 - 1825.10	4G
1	1805.10 - 1825.10	4G
1	1910.00 - 1915.00; 2155.00 - 2170.00	3G
1	2155.00 - 2170.00	4G
1	2620.00 - 2640.00	4G
1	852.00 - 862.00	4G
1	935.10 - 949.90	2G
1	935.10 - 949.90	2G

Figura 4. Frecuencias y tecnología de una torre de telecomunicaciones. Fuente: [29]



Figura 5. Localización de las torres de telecomunicación en el barrio de Argüelles. Fuente: [30]



Figura 6. Información sobre un nodo de telecomunicaciones de Telefónica en Argüelles. Fuente: [30]

5.1.2 LOCALIZACIÓN FUTURA DE TORRES DE TELECOMUNICACIÓN

Conocer la futura localización de torres de telecomunicación a ciencia cierta es prácticamente imposible ya que, aunque a nivel teórico se puede colocar en el lugar que se desee, la realidad es mucho más compleja. Al escoger una zona para instalar una torre de telecomunicaciones nos podemos encontrar con diversos problemas:

- Disponibilidad de terrenos adecuados: En algunas áreas, puede ser difícil encontrar terrenos disponibles y adecuados para la instalación de una torre de telecomunicaciones, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas.
- Restricciones regulatorias y legales: Los proveedores de infraestructura deben cumplir con regulaciones específicas y obtener permisos y licencias adecuadas antes de instalar una torre de telecomunicaciones. La última ley respecto a infraestructuras de telecomunicaciones fue publicada en el año 2022 [31].
- Oposición comunitaria: En algunos casos, puede surgir oposición por parte de la comunidad local debido a preocupaciones sobre el impacto visual, la radiación electromagnética u otros aspectos relacionados con la instalación de una torre de telecomunicaciones.
- Acceso a infraestructura y servicios públicos: Para instalar una torre de telecomunicaciones, es necesario contar con acceso adecuado a la electricidad, el agua y otros servicios públicos. Si la ubicación no tiene una infraestructura adecuada o si los costos de acceso son prohibitivos, puede ser complicado establecer la torre de manera eficiente.
- Interferencia electromagnética: Al seleccionar una ubicación, es importante considerar la interferencia electromagnética que puede afectar la calidad de las señales. La presencia de edificios altos, líneas eléctricas u otros dispositivos electrónicos cercanos puede interferir con la propagación de las señales de telecomunicaciones.

Por estos motivos y alguno más, es muy complicado predecir dónde se va a poder construir una torre de telecomunicaciones. Por ello, en el modelo planteado en ese trabajo, las futuras

torres de telecomunicación son modeladas como puntos aleatorios dentro de una fracción de toda el área a analizar, entendiéndose que, si la salida del modelo escoge construir una de las torres, transferido a la realidad sería construir una torre en esa fracción. No tiene por qué ser el mismo lugar exacto pero un punto cercano al extraído del modelo.

Por todas estas complicaciones, en este trabajo se tiene en cuenta que es mucho más sencillo construir o instalar un nuevo nodo de una tecnología a una determinada frecuencia en un emplazamiento previamente construido a construir un emplazamiento desde el inicio (desarrollo GreenField).

Además, actualmente, debido a las dificultades encontradas a la hora de construir nuevos emplazamientos, la actividad más común por parte de los operadores es la de compartir emplazamientos. Esta práctica tiene como objetivo principal abaratar costes y optimizar el uso de los recursos de infraestructura de red. Por ejemplo, en España, se ha llevado a cabo un acuerdo entre operadores que ha reducido el número de emplazamientos de uno de los operadores en aproximadamente un 40%. Esto ha permitido ofrecer servicios a ciudades de menos de 25.000 habitantes en todo el país, así como servicios inalámbricos 3G en zonas rurales de 19 provincias españolas [32].

5.2 COBERTURA

La cobertura de una antena de telecomunicaciones depende de muchos factores como la topología del terreno, los edificios que haya alrededor, la tecnología, la frecuencia, la potencia de transmisión y la eficiencia. Por ello, para calcular la cobertura de la manera más eficiente se necesitaría una herramienta de cálculo de cobertura muy sofisticada. El problema es que este tipo de herramientas suelen ser muy costosas tanto económica como computacionalmente.

Por ello, para la realización de este modelo, se ha hecho una estimación de la cobertura utilizando la fórmula de Friis [33] para calcular las pérdidas en espacio libre:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi)$$

Esta fórmula ofrece una estimación ideal de la relación entre la potencia recibida y la transmitida. Al término $\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$ se le denomina pérdidas del espacio libre ya que sólo tiene en cuenta las pérdidas debidas a la dispersión de la energía sobre una superficie esférica que crece con el cuadrado de la distancia. En este término, λ hace referencia a la longitud de onda y R al radio, entendido como la distancia entre transmisor y receptor. $G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi)$ son las ganancias de transmisión y recepción respectivamente. La ganancia de una antena es un número adimensional que expresa la capacidad de concentrar la energía en una determinada dirección frente a otras. Por ejemplo, una antena que reciba sólo de la mitad del espacio tendrá una ganancia de 2. Para una antena isotrópica la ganancia es 1. La fórmula de Friis se suele expresar en decibelios de la siguiente manera:

$$L_{el}(dB) = 32,4 + 20\log(D_{km}) + 20\log(f_{MHz}) - G_t(dB) - G_r(dB)$$

El término $L_{el}(dB)$ hace referencia a las pérdidas entre la potencia transmitida y la recibida. El 32,4 surge de primero expresar la longitud de onda como la velocidad de la luz partido de frecuencia convertir y segundo operar las pérdidas del espacio libre.

Una vez se conoce la fórmula se puede realizar la estimación de cobertura. El radio de cobertura será la distancia para el cual la potencia recibida sea la mínima para tener un nivel de señal aceptable. Generalmente una buena señal suele situarse entre -50 y -70 dBm y una mala señal es la que está por debajo de -100 dBm [34]. En el caso de este proyecto, la gran mayoría de antenas receptoras son de teléfonos móviles, que son antenas muy pequeñas con una ganancia que suele estar entre los 2 y los 5 dBi [35]. Los datos de transmisión dependen del tipo de antena. Por ejemplo, para una antena de 4G, según los datos de [35], la potencia de transmisión es de 44 dBm y la ganancia de 18 dBi. Si trabajamos en la banda de frecuencias de 2600 MHz, obtendríamos una cobertura de alrededor de 3km. Sin embargo, esto es el caso ideal, por lo que en la realidad seguramente sería algo menos.

Como se ha podido observar, la cobertura depende en gran medida de la frecuencia en la que se esté operando, pero no es el único factor ya que también dependerá de la capacidad de la red porque si la demanda de datos es alta y la calidad del servicio es mayor, el radio de cobertura se vuelve menor ofreciendo mejor conectividad a los usuarios que se encuentren más cerca. La topología del terreno afecta considerablemente a la cobertura ya que obstáculos naturales (como montañas) o construidos (como edificios) absorben y reflejan las señales de radio, por lo que la potencia de señal disminuye. Es por esto por lo que dentro de edificios se tiene menor velocidad de conexión que en la calle. Por último, el tipo de antena también condiciona la cobertura ya que la potencia transmitida y la ganancia de la antena son factores que afectan directamente a la fórmula de Friis.

Aplicando la fórmula previamente mencionada y teniendo en cuenta los diferentes valores de potencia y ganancia para antenas de 3G [19], 4G [35] y 5G [23], se ha realizado una estimación del radio de cobertura para cada una de las bandas en España. También, se ha de tener en cuenta que existe una potencia máxima que puede radiar una antena debido a la regulación [31].

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Radio de cobertura</i>
5G	700 MHz	9km – 13km
4G	800 MHz	7,5km - 11 km
3G	900 MHz	6 km – 8km
4G	1800 MHz	2,5km - 4 km
3G	2100 MHz	2km - 3 km
4G	2600 MHz	1,5km - 2,5 km
5G	3500 MHz	1,3km - 2 km

5G	26 GHz (mmWave)	200 - 350 m
----	-----------------	-------------

Tabla 7. Radio de cobertura en función de la tecnología y la banda de frecuencias. Fuente: Elaboración Propia

Los valores de la tabla anterior son estimaciones teniendo en cuenta las fuentes previamente mencionadas además de contrastar las diferencias con los datos de [36] y [37]. Para todas las bandas de frecuencia se establece un rango de cobertura que está directamente relacionado con el coste. Por ejemplo, para 5G, el uso de la última tecnología de MIMO (Multiple Input Multiple Output) afecta a que tanto la cobertura como la capacidad sea mayor, pero también supone un aumento en el coste a tener en cuenta [36].

Finalmente, como para el cálculo anterior no se está teniendo en cuenta la topología del terreno desde el punto de vista de posibles interferencias, al resultado se le aplica un factor de reducción en función de si el modelo es ejecutado en un entorno urbano, semiurbano o rural, siendo el urbano el que se ve más reducido debido a que en la realidad la cobertura disminuye por el gran número de obstáculos que atenúan la señal más rápidamente. Los factores que se utilizarán para el modelo serán de 0,2 para el entorno urbano, de 0,6 para el semiurbano y 0,9 para el rural.

Además, cabe destacar que este trabajo, al poner el foco en un entorno rural, se centrará en frecuencias más bajas ya que son las que aportan mayor cobertura, aunque se pierda capacidad como se verá en el siguiente apartado. Es por esto, que realmente para este trabajo las frecuencias de onda milimétrica (26 GHz) no suponen de gran interés.

Una vez se obtiene el radio en un valor de distancia, como el modelo únicamente toma valores de cubierto o no cubierto entre los pares emplazamiento-parcela, se convierte esta distancia a través de un código realizado en Python (ver ANEXO II: Código Del Modelo, la función `square_abarcado`). Esta herramienta consiste en dibujar el círculo de radio d , siendo d el resultado de las operaciones para calcular la cobertura y si este círculo cubre el centro de la parcela de tamaño cuadrado, se considera como cubierto (valor 1) y si no lo cubre se considera como no cubierto (valor 0) (Ver Figura 7).

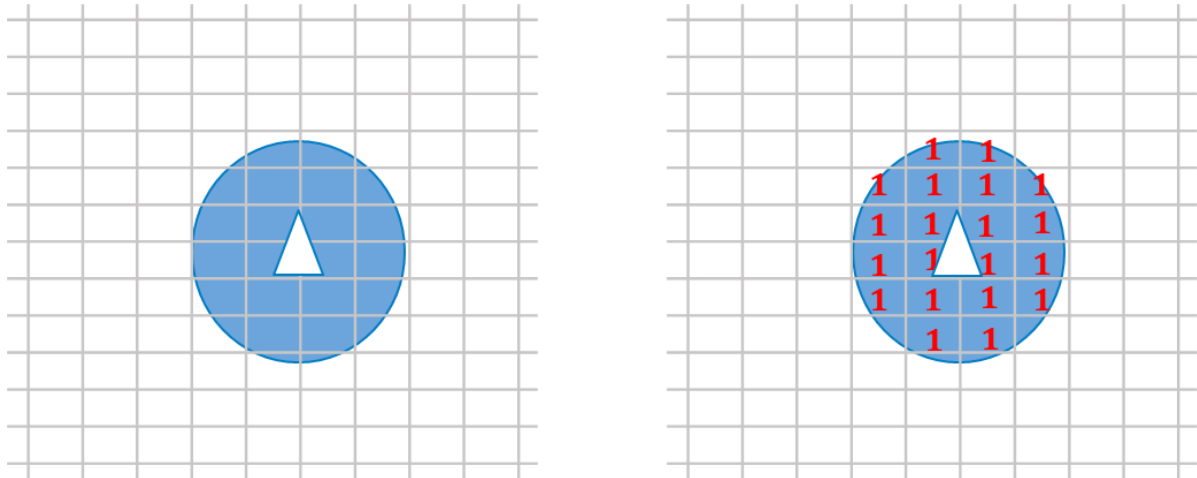


Figura 7. Conversión de radio de cobertura a booleano cubierto/no cubierto. Fuente: Elaboración Propia

5.3 CAPACIDAD

La capacidad de un canal se conoce como la máxima cantidad de información que se puede transmitir en un instante de tiempo de forma fiable, se mide en bps, aunque lo más común actualmente debido a la gran información que se transmite es Mbps. Para conocer la máxima capacidad para un canal con ancho de banda B (Hz) en presencia de ruido aditivo blanco y gaussiano, se utiliza el teorema de Shannon-Hartley:

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

El ancho de banda limita lo rápido que podemos enviar símbolos mientras que la relación señal a ruido (SNR) limita cuánta información puedo empaquetar en cada símbolo transmitido. Si el canal fuera ideal y no hubiera ruido, se podría enviar infinitos bits por segundo con un ancho de banda muy bajo. Sin embargo, el resultado no es el mismo si existe ruido y se escoge un ancho de banda infinito. En este caso, como se está utilizando un ruido blanco y gaussiano, la potencia de ruido también sería infinita.

Como se mencionaba previamente, esta capacidad es la máxima teórica que nunca se ha alcanzado debido a que se necesitaría una probabilidad de error de 0, que implicaría altos retardos y requisitos computacionales [38]. En este trabajo, se va a utilizar la capacidad

calculada de aplicar el teorema de Shannon-Hartley con una pequeña reducción causada por la probabilidad de bit. Además, se tiene en cuenta que para tecnologías más avanzadas como 5G se incluyen mejoras que afectan a la capacidad del canal. Estas mejoras incluyen un espectro de frecuencia más amplio, técnicas de modulación más avanzadas y una mayor eficiencia espectral. El 5G también introduce nuevas tecnologías, como MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) y el uso de ondas milimétricas, que permiten un mayor rendimiento y una mayor capacidad de transmisión de datos [39].

Algunos datos estimados en función del ancho de banda y de la banda en la que se opera se pueden ver en la Tabla 8. Para cada banda de frecuencia utilizada en España, utilizaremos los datos de [40]. La capacidad como se ha observado está directamente relacionada con el ancho de banda, que es una parte del espectro de frecuencias. Al decir que en la banda de 700 MHz existe un ancho de banda de 20 MHz, esto significa que cada operador en España tiene 20 MHz dentro de la banda de 700 MHz que comprende desde 703 a 788 MHz. Es por esto que en el resto de la tabla para algunas bandas de frecuencia se presenta un intervalo para el ancho de banda. Por ejemplo, para la banda de 2600 MHz, Movistar tiene 30MHz de espectro mientras que Vodafone tiene 40 MHz de espectro. Como la capacidad esta tan relacionada con el ancho de banda este es el principal beneficio de las tecnologías 5G. A parte de que la propia tecnología trae mejoras de capacidad y cobertura para el mismo ancho de banda, las bandas media y alta en las que opera cuentan con un ancho de banda muy amplio, permitiendo capacidades de más de 10 Gbps en ondas milimétricas.

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Ancho de banda</i>	<i>Capacidad</i>
5G	700 MHz	20 MHz	50-250 Mbps
4G	800 MHz	20 MHz	30 – 120 Mbps
3G	900 MHz	20 - 30 MHz	14 - 40 Mbps
4G	1800 MHz	15 - 20 MHz	30 - 150 Mbps

3G	2100 MHz	20 MHz	14 - 50 Mbps
4G	2600 MHz	20 - 50 MHz	100 - 400 Mbps
5G	3500 MHz	80 - 110 MHz	250 Mbps - 3Gpbs
5G	26 GHz (mmWave)	400 MHz – 1GHz	2 Gbps - 10 Gbps

Tabla 8. Capacidades en función de la banda de frecuencia y el ancho de banda. Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se puede observar que, para la misma tecnología y el mismo ancho de banda, se obtienen mayores capacidades para mayores bandas de frecuencia. Esto se debe a principalmente a técnicas de multiplexación utilizadas en bandas medias que permiten aumentar la capacidad del canal [39]. Además, las antenas en frecuencias menores son más grandes, por lo que cualquiera mejora que se busque hacer sobre estas es más costoso que para antenas de frecuencias mayores.

5.4 DEMANDA

En este apartado, se explica qué datos de demanda se utilizan como entrada para el modelo y cómo se estima el crecimiento de la demanda en los próximos años. Obtener datos reales de la demanda de datos concreta en un barrio determinado de una ciudad o de un pueblo es extremadamente complicado. Por lo tanto, se ha decidido hacer una estimación de la demanda de datos actual y futuro utilizando diferentes informes a nivel global y partiendo de estos datos, hacer una estimación de la demanda pico por usuario.

Partiendo de los datos de [41], que indican que el año 2021 se consumieron un total de 7,1 GB/línea/mes se puede conocer aproximadamente el número de datos por segundo que consume un usuario. Como se consumen 7,1 GB al mes por usuario, podemos extraer que de media un usuario consume 2,73 KB por segundo. Como este trabajo se centra en entorno rural, supondremos basándonos en los datos de [7] que de inicio el consumo medio de un usuario es alrededor de 4 veces menor a la media. Sin embargo, como en este trabajo se

pretende cubrir la demanda pico se usaremos el valor de la demanda media de un usuario como la demanda pico en un entorno rural.

Para conocer el crecimiento estimado de la demanda de datos en los próximos años, nos basaremos en un estudio de Ericsson [42] que estima que para 2028, la demanda de datos crecerá en el oeste de Europa a un ritmo del 18 % anualizado. De nuevo, al estar tratando un entorno rural, se estimará que esta crecida será algo más lenta, al menos mientras el despliegue de redes de telecomunicación no sea comparable al urbano. De todas formas, como el informe de Ericsson recoge el entorno rural y lo tiene en cuenta en el crecimiento, no vamos a asumir una crecida extremadamente lenta, sino que usaremos un crecimiento entre el 12 y el 16%. Por último, en función del número de habitantes de la localidad y el lugar en el que se encuentran las viviendas, hacemos una multiplicación para obtener la demanda máxima en un año para cada parcela. Esto es si en una parcela hay una localidad con 100 habitantes y estimamos que la demanda pico inicial es de 2,73 KBs, la demanda pico de toda esa parcela será de 273 KBs o 2,184 Mbps.

5.5 COSTES

En este apartado se revisan los costes referentes a la construcción y mantenimiento de un emplazamiento de telecomunicaciones y se hacen una serie de estimaciones para el CAPEX y OPEX que serán incluidos en el modelo como datos de entrada. Estos costes los vamos a dividir en función del emplazamiento o torre y de los nodos o tecnologías, de la misma manera que en el modelo. Esto se debe a que todas las tecnologías y frecuencias tendrán unos costes comunes del emplazamiento, pero en función del nodo, el equipamiento será diferente y por tanto los costes variarán.

5.5.1 COSTES DE EMPLAZAMIENTO

En primer lugar, se debe conocer cuáles son los costes asociados a CAPEX y cuáles son los costes asociados al OPEX para una estación base. Comenzando por el CAPEX, los costes más significativos se pueden dividir en tres etapas [43]:

1. Predesarrollo: Esta etapa considera todos los costes previos a la construcción de un emplazamiento. Entre los más destacables se encuentran:
 - a. Adquisición del terreno: El coste de adquirir el terreno donde se construirá la torre puede variar según la ubicación y la demanda de ese lugar en particular. Algunas veces, las empresas de telecomunicaciones optan por alquilar terrenos en lugar de adquirirlos. En caso de alquiler, este coste repercutiría en el OPEX.
 - b. Estudios de factibilidad y permisos: Antes de la construcción, se pueden requerir estudios de factibilidad y permisos para cumplir con los requisitos legales y de seguridad. Estos costes pueden incluir estudios de impacto ambiental, estudios de suelo, permisos de construcción y licencias.
 - c. Diseño y planificación: La contratación de profesionales y consultores para el diseño y la planificación de la torre también representa un coste. Esto puede incluir arquitectos, ingenieros estructurales y consultores de telecomunicaciones.
2. Materiales de construcción: Los materiales utilizados en la construcción de la torre, como el acero, el hormigón y los equipos de telecomunicaciones, pueden tener un impacto significativo en los costos. El precio de los materiales puede variar según la ubicación y las condiciones del mercado.
3. Construcción e instalación: Los costes de mano de obra y equipos necesarios para la construcción de la torre deben tenerse en cuenta. La construcción de una torre de telecomunicaciones puede ser completada en menos de 3 meses y por un equipo de entre 5 o 7 personas.

Basándonos en las estimaciones de [43], el total de los costes asociados a la construcción de una torre de telecomunicaciones en Europa, estaría aproximadamente entre 90.000€ y 160.000€, dejando una media de 125.000€. Estos costes están divididos en un 20% el predesarrollo, un 25% el coste de los materiales y un 55% la construcción del emplazamiento.

En entornos rurales, el coste sería superior a la media debido a que en entornos urbanos se pueden aprovechar tejados o estructuras ya construidas para ahorrarse material y tiempo de construcción. Por ello, en entornos rurales, los costes de construcción se estima que estarán entre los 130.000€ y los 160.000€ para un emplazamiento de telecomunicaciones. Sin embargo, estos datos hacen referencia a la media de Europa, pero según los datos de [44], el coste de vida en España es un 11% más económico que Europa por lo que este rango quedaría aproximadamente entre 115.000€ y 142.000€.

En referencia al OPEX, sus costes asociados son los siguientes:

- **Mantenimiento y reparaciones:** Las torres de telecomunicaciones requieren mantenimiento regular para asegurar su funcionamiento óptimo. Esto puede incluir inspecciones periódicas, limpieza, reparaciones menores, reemplazo de componentes y actualizaciones tecnológicas. Los costos de mantenimiento pueden variar según el tamaño y la complejidad de la torre.
- **Energía eléctrica:** Las torres de telecomunicaciones requieren electricidad para alimentar los equipos de transmisión, sistemas de iluminación, climatización y otros dispositivos necesarios para su funcionamiento. Los costos de energía eléctrica pueden ser una parte significativa de los gastos operativos, especialmente si la torre se encuentra en una ubicación remota o si hay fluctuaciones en los precios de la electricidad.
- **Arrendamiento de terreno:** En muchos casos, las torres de telecomunicaciones se encuentran en terrenos arrendados. Los costos de arrendamiento pueden variar según la ubicación y el acuerdo alcanzado entre el propietario del terreno y la empresa de telecomunicaciones. Estos costos pueden representar una parte sustancial de los gastos operativos a largo plazo.
- **Seguros:** Las torres de telecomunicaciones generalmente requieren cobertura de seguros para proteger contra posibles daños, vandalismo, robos o responsabilidad civil. Los costos de los seguros pueden variar según el tamaño y el valor de la torre, así como otros factores de riesgo asociados con la ubicación.

- **Monitoreo y gestión:** Las torres de telecomunicaciones suelen ser supervisadas y gestionadas de forma remota. Esto implica costos relacionados con el monitoreo de la torre, la gestión de alarmas, el control de acceso y la gestión de la infraestructura de telecomunicaciones.
- **Cumplimiento normativo:** Las torres de telecomunicaciones deben cumplir con las regulaciones y estándares establecidos por las autoridades locales y nacionales. Esto puede implicar costos asociados con auditorías, licencias, tasas y otros requisitos regulatorios.

Encontrar datos reales y medidos sobre el coste de operación de una torre de telecomunicación es una tarea muy compleja ya que dependen de muchas variables, de contratos negociados, del coste de la electricidad y del alquiler que se esté pagando. Basándonos en los datos de [45], se estima que el coste del alquiler de un emplazamiento está en torno a los 10.000€ anuales. Además, apoyándonos en los datos de [46], se estima que los costes de mantenimiento y operación son de alrededor de 18.000€ anuales. En este punto, no se van a tener en cuenta los costes de energía, ya que se consideran como costes asociados a la tecnología instalada porque no consume la misma energía un nodo de 4G que uno de 5G, siendo mayor el segundo. Teniendo en cuenta el resto de los costes, en este modelo se trabajará con un coste de operación de 35.000€, lo que supone un 25% del coste del CAPEX anual. Además, este valor cumple con la condición común en la industria de las telecomunicaciones de que el CAPEX debe ser el 30% del OPEX en un intervalo de 10 años [46].

Por último, como este modelo también considera el desmantelamiento de un emplazamiento y basándonos en los costes de construcción, eliminando el coste de los materiales y el coste del predesarrollo obtendríamos un coste de 77.000€. Sin embargo, esto sería teniendo en cuenta que el tiempo de construcción es igual que el de desmantelamiento, cuando realmente el tiempo de desmantelamiento es menor ya que es menos costoso. Por ello, se estima que el coste de desmantelamiento está alrededor de un cuarto del de construcción siendo de 20.000€

5.5.2 COSTES DE NODO

Para analizar los costes de CAPEX y OPEX de un nodo, en primer lugar, se debe definir a qué costes concretamente se hace referencia. En primer lugar, en referencia al CAPEX de una tecnología para una frecuencia concreta se consideran los costes de instalación de las antenas, la fibra, cables, conectores, software y el resto de los elementos necesarios para la transmisión a esa frecuencia. En este aspecto, para la construcción de nodos 5G, se tiene en cuenta en la información obtenida de [47], que nos indica que para mayores frecuencias, como el equipamiento a instalar es más pequeño, los costes de construcción son menores. Sin embargo, para estos emplazamientos es necesario un mayor coste total porque se necesitan mayor número de antenas para cubrir un área porque su cobertura es menor. Dentro de frecuencias similares, el coste será mayor para tecnologías superiores ya que utilizan mayor número de elementos y más pesados para la transmisión. Por último, cabe destacar que también la complejidad del equipamiento, y en consecuencia el coste, dependerá del ancho de banda. Por lo tanto, el coste se podrá calcular de manera estimada basándonos en tres datos: la tecnología, la frecuencia y el ancho de banda.

Se debe considerar que, al estar en un entorno rural, se trabaja con macroceldas, que generalmente son más costosas que las microceldas ya que suponen una instalación más compleja debido a su tamaño [48]. En entornos rurales se utilizan macroceldas porque la demanda es más dispersa y no se pueden aprovechar elementos ya construidos como edificios para colocar antenas.

Tomando como referencia los datos de [49], en los que la empresa Widelity hace una estimación del precio en Estados Unidos de instalación de tecnología 4G y 5G para macroceldas, se obtiene que el coste para 5G para la banda de 3500MHz con un ancho de banda de 100MHz estaría entre \$80.000 y 120.000\$, dependiendo del tipo de antena utilizada. Aplicando la conversión de dólares a euros (1 dólar = 0,93 euros. Valor del cambio a día 1 de junio de 2023) y teniendo en cuenta que el mercado europeo [43] y en concreto el español en materia de comunicaciones es más barato que el americano, se estima que el precio en España estaría entre 38.000€ y 50.000€. En este mismo documento, se presenta el coste de

5G para las frecuencias de onda milimétrica (26 GHz). En este caso el coste estaría entre 26.000€ y 34.000€.

Para el resto de las frecuencias 4G o 5G no se han encontrado datos concretos, únicamente estimaciones en diversos trabajos en los que los datos de unos a otros difieren en gran medida ya que se usan diferentes técnicas de estimación ([48], [50], [51]). Por ello, para estas frecuencias, se hará una estimación partiendo de los datos obtenidos y descritos en el párrafo anterior y teniendo en cuenta sus valores de cobertura y capacidad, ya que a mayor cobertura y capacidad mayor es el coste de instalación. Para la frecuencia de 2600 MHz, en el mejor caso tiene 400 Mbps de capacidad y un radio de cobertura de 2,5 km, mientras que para la frecuencia de 3500 MHz para el peor caso tendría una capacidad de 250 Mbps y un radio de cobertura de 1,3 km, por lo que no tendría sentido que el precio más caro para la frecuencia de 2600 MHz estuviera por encima del más barato de 3500 MHz. Por ello, se estima que siendo 38.000€ el precio de instalación de 5G a 3500 MHz en el peor caso, en el mejor caso de 2600 MHz que supone un aumento de 150 Mbps y del doble de radio, se estima un precio de 41.000€. Para el peor caso que es 100 Mbps con un radio de 1,5 km, se estima que el precio estará alrededor de los 30.000€.

Fijándonos ahora en la frecuencia de 700 MHz de 5G, se observa la relación que guarda con la de 3500 MHz es parecida a la que guarda esta última con la de 26GHz. Es decir, en ambos casos el radio de cobertura es unas 7 veces mayor para la frecuencia menor y la capacidad es unas 5 veces mayor para la frecuencia mayor. Por ello, se asume que la relación en costes también será parecida, siendo la más cara la de 700 MHz, y se establece que el precio estaría entre los 45.000€ y los 65.000€.

Para continuar, se estimará el coste de un nodo de 800 MHz, que, a nivel de cobertura es parecida a la de 700 MHz, aunque esta última es algo mayor. En el mejor caso, para la frecuencia de 800 MHz tiene una capacidad de 120 Mbps y una cobertura de unos 11 km mientras que en el peor caso del 5G a 800 MHz su capacidad es de 50 Mbps y el radio de cobertura de 9km. Por lo tanto, se deduce que en el mejor caso para la frecuencia de 800 MHz debe ser más caro que la frecuencia de 700 MHz. Haciendo una pequeña estimación,

se obtiene que el valor máximo debería estar en torno a los 48.000€ mientras que el peor caso debería estar en torno a los 33.000€.

Para la frecuencia de 1800 MHz de 4G, se aplica un proceso parecido, teniendo en cuenta que esta frecuencia tiene un radio unas 3 veces menor a la de 800 MHz y su capacidad es parecida. Se estima que el precio estaría entre los 20.000€ y 35.000€.

Es importante comentar que hay técnicas para minimizar el coste de la instalación 5G si ya hay instalada una tecnología 4G LTE. Por ejemplo, el uso de NSA (Non stand alone) que permite la conexión de 5G al core de 4G previamente instalado [39]. Este tipo de técnicas pese a ser muy interesantes y que actualmente son comunes de usar, no se han tenido en cuenta en este modelo debido al aumento de complejidad y tiempo de ejecución.

En referencia al 3G, los datos son muy complicados de encontrar ya que son muy antiguos y actualmente nadie invierte en 3G teniendo tecnologías 4G o 5G en bajas frecuencias. Además, son diversas las fuentes ([52], [53], [54]) que hablan de un desmantelamiento de las redes 3G en 2022, al menos en Estados Unidos, pero que se está expandiendo a Europa. Por ello, aunque la tendencia sería que un nodo 3G tuviera un menor coste debido a que su tecnología utiliza menos elementos que las demás, en este trabajo el CAPEX de un nodo 3G se incluirá como el superior ya que actualmente no se están realizando inversiones y es una manera de que el modelo no seleccione construir en 3G.

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Ancho de banda</i>	<i>CAPEX (k€)</i>
5G	700 MHz	20 MHz	45 - 65
4G	800 MHz	20 MHz	33 - 48
3G	900 MHz	20 - 30 MHz	-
4G	1800 MHz	15 - 20 MHz	20 - 35

3G	2100 MHz	20 MHz	-
4G	2600 MHz	20 - 50 MHz	30 - 41
5G	3500 MHz	80 - 110 MHz	38 - 50
5G	26 GHz (mmWave)	400 MHz – 1GHz	26 - 34

Tabla 9. CAPEX asociado a cada una de las tecnologías y frecuencias. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores del CAPEX para cada una de las tecnologías y frecuencias se hará un análisis del OPEX. En primer lugar, tomando como referencia los datos extraídos de la empresa Analysis Mason [46], se conoce que el coste de operación de una tecnología consiste principalmente en:

- **Energía:** Los costes de la energía necesaria para suministrar la necesaria potencia de transmisión a la antena.
- **Mantenimiento y operaciones:** Todos los costes asociados a la revisión de equipos, cambio cuando sea necesario y optimización.

Todos estos costes están directamente relacionados con el CAPEX, ya que cuanto mayor sea el número de equipos y más complejos sean, más caro será el mantenimiento y operación de los equipos y más coste en electricidad y energía será necesario para alimentarlos. Para el cálculo del OPEX, simplemente se aplicará la fórmula anterior en la que el OPEX a los 10 años supone el 70% del coste mientras que el CAPEX sería el 30%. Para calcular este valor, se parte de los valores de la tabla anterior, se dividen por 0,3, el resultado se multiplica por 0,7 y se divide entre 10.

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Ancho de banda</i>	<i>OPEX (k€)</i>
5G	700 MHz	20 MHz	10,5 - 15

4G	800 MHz	20 MHz	7,5 – 11
3G	900 MHz	20 - 30 MHz	2,5 – 3,5
4G	1800 MHz	15 - 20 MHz	4,5 – 8
3G	2100 MHz	20 MHz	2,5 – 3,5
4G	2600 MHz	20 - 50 MHz	7 – 9,5
5G	3500 MHz	80 - 110 MHz	9 – 11,5
5G	26 GHz (mmWave)	400 MHz – 1GHz	6 - 8

Tabla 10. OPEX asociado a cada una de las tecnologías y frecuencias. Fuente: Elaboración Propia

Se puede comprobar que estos datos son coherentes, ya que considerando que una torre de 5G a 700 MHz consume 120 kW/h [55], y valorando que el precio de la electricidad es de 200€/MW/h, se obtendría un total de 8760€ al año. Por lo tanto, simplemente con tener 2000€ al año de mantenimiento se obtendría el valor estimado en la tabla anterior. Para los nodos 3G sí que se establece una estimación del OPEX ya que, en los primeros años del modelo, habrá nodos 3G y si se establece un OPEX muy alto el resultado no sería realista. Para ello, se estima, basándonos en [46], que un nodo 3G consume unas 3 veces menos que uno 4G. Finalmente, el coste de desmantelamiento, de la misma manera que para un emplazamiento, se estima que es cuatro veces menor que el de construcción.

Por último, según los datos de [56], se estima que el tiempo de vida o de cambio de los elementos de un nodo de telecomunicaciones es de 7 años y este será el tiempo que se tendrá en cuenta para el modelo.

Capítulo 6. IMPACTO SOCIAL

Una vez explicado el funcionamiento del modelo y los datos de entrada, en este capítulo se explica de qué manera se tiene en cuenta el impacto social del modelo sobre una localidad rural utilizando como referencia el trabajo de [7].

El trabajo comienza discutiendo la situación actual en España y la diferencia entre el entorno rural y el urbano. En este contexto diferencia entre tres tipos de zonas rurales:

- Zonas rurales a revitalizar: Lugares que se encuentran bastante aislados, con escasa densidad de población y donde la mayoría del empleo se centra en el sector primario.
- Zonas rurales intermedias: Lugares alejados de grandes ciudades pero que tienen una densidad de población media y un empleo repartido entre primario, secundario y terciario.
- Zonas rurales periurbanas: Situadas cerca de grandes núcleos urbanos, con una población creciente y predominio del trabajo en el sector servicios.

En este trabajo se introduce la noción de las zonas blancas y grises. Una zona blanca es aquella donde no existe infraestructura de banda ancha NG (Next Generation) y no es probable que sean construidas en un plazo de tres años por inversores privados. Una zona gris es aquella donde solo existe o se va a desplegar en los próximos tres años una red NG y ningún otro operador tenga previsto desplegar otra en los próximos tres años. Además, existen datos públicos del gobierno de España de la localización de estas zonas en [57]. El mapa de zonas grises y blancas se puede ver en la Figura 8, donde las zonas moradas indican los lugares con mayor número de viviendas que son o una zona blanca o zona gris.

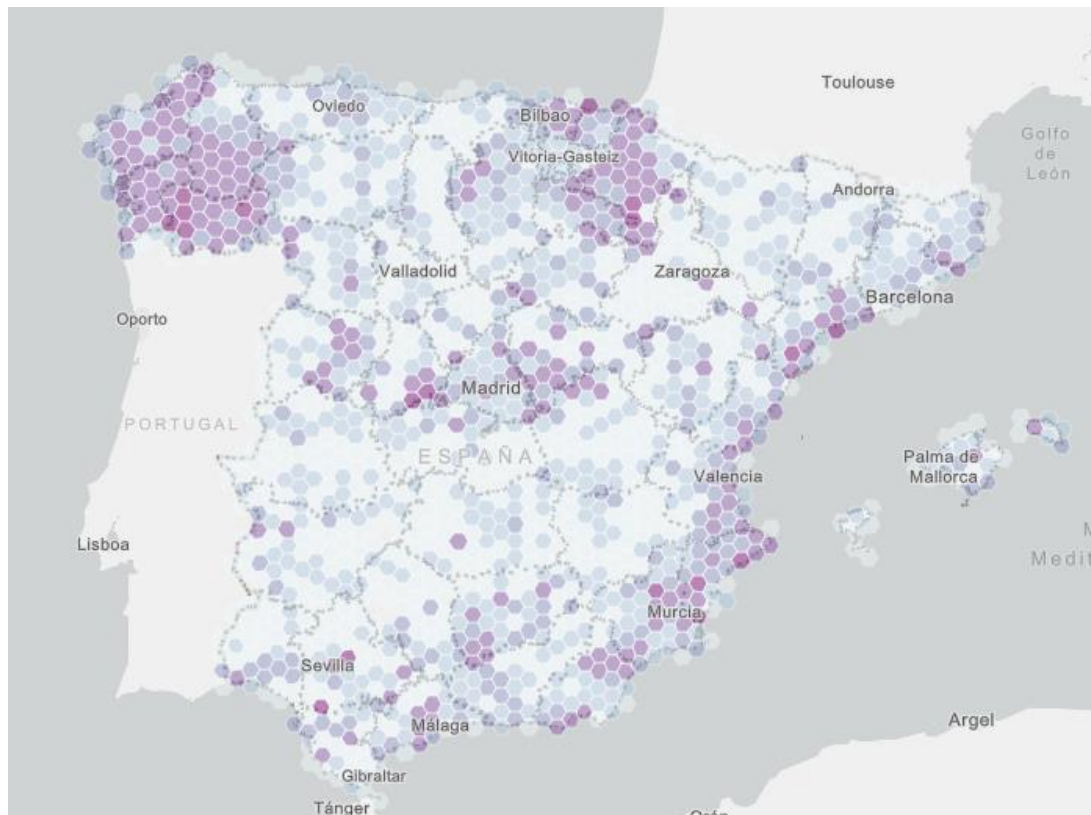


Figura 8. Zonas blancas y grises en España. Fuente: [57]

En este trabajo, como en muchos otros ([58], [59] o [60]), se contempla el problema socioeconómico que sufre el entorno rural así como la necesidad de conectividades de alta velocidad para resolverlo y la urgencia en encontrar una solución para que no sea irreversible. La rapidez con la que avanza la tecnología provoca que aquellos que no tienen acceso a ella se queden atrás y puedan sufrir graves problemas en un mundo en el que los servicios básicos como educación y sanidad se digitalizan. No solo esto, sino que también en cualquier puesto de trabajo se demanda actualmente un manejo de la tecnología y la informática.

En el trabajo analizado en este capítulo, partiendo de una situación de brecha digital entre el mundo rural y el urbano, se analiza si al aumentar velocidad de red a 30 Mbps o 100 Mbps en entornos rurales, aumenta su calidad de vida midiéndolo respecto a 4 indicadores socioeconómicos que son:

- Aumento de la población
- Tasa de paro
- Renta per cápita
- Afiliaciones a la seguridad social.

Además de estas variables, que son las que miden el impacto socioeconómico del despliegue, se valoran otras variables que afectan al impacto que pueden llegar a tener las primeras. Estas recibirán el nombre de variables dependientes y son:

- Comunidad Autónoma.
- Distancia a municipios de más de 10.000 habitantes.
- Distancia a centros educativos (educación infantil, educación primaria o educación secundaria).
- Distancia al hospital más cercano.
- Distancia a la estación de tren más cercana.

Tras realizar el estudio, se obtienen los siguientes datos:

<i>Variable</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Antes</i>	<i>Después</i>	<i>ATE</i>	<i>L.inf</i>	<i>LimSup</i>
Renta Media Disponible	100 Mbps	2	2	1,4%	-0,1%	2,9%
Renta Media Disponible	30 Mbps	2	2	0,7%	-1,0%	2,4%
Población Total	100 Mbps	2	2	1,9%	0,2%	3,6%
Población Total	30 Mbps	2	2	1,4%	-0,2%	3,0%
Tasa de Paro	100 Mbps	2	2	-0,7%	-1,3%	-0,1%
Tasa de Paro	30 Mbps	2	2	0,2%	-0,5%	0,9%

Afiliación Seguridad Social	100 Mbps	2	2	3,1%	0,0%	6,2%
Afiliación Seguridad Social	30 Mbps	2	2	0,7%	-1,2%	2,6%

Tabla 11. Impacto Social de las velocidades de 30 y 100 Mbps en entornos rurales. Fuente: [7]

La conclusión que se obtiene del estudio realizado por José Antonio López Muñoz es que para generar un impacto diferencial en entornos rurales es necesario que la conectividad sea mayor a 100 Mbps. Esta afirmación es en la que nos basaremos a la hora de realizar los casos de estudio con el objetivo de generar un despliegue para que estas zonas puedan contar con velocidades superiores a 100 Mbps.

Capítulo 7. IMPLEMENTACIÓN EN CÓDIGO

Este trabajo no es únicamente el desarrollo del modelo sino su correspondiente implementación en código para comprobar que el modelo genera los resultados esperados. Por ello, previo al análisis de resultados y casos de estudio que llevaremos a cabo en el siguiente capítulo, se hará una breve explicación del código realizado en Python. En este capítulo se comentará el flujo de la aplicación sin entrar en las funciones, sus parámetros y variables. Si se tiene interés en visualizar el código detallado se encuentra en el ANEXO II. La parte del código relevante a la visualización ha sido realizada en colaboración con Javier del Águila Martos.

7.1 INICIALIZACIÓN DEL MODELO Y DE LOS DATOS A REPRESENTAR

Para ejecutar la aplicación únicamente es necesario ejecutar el archivo `main.py` que es el principal del proyecto, a raíz de éste se irán ejecutando el resto de los archivos `.py` en función de las funciones utilizadas. Para inicializar la aplicación se establecen las coordenadas del lugar donde se va a realizar el análisis además del tamaño del lado de las parcelas en metros en las que vamos a dividir el mapa. Con estos datos se genera la división del espacio en cuadrados iguales formando una cuadrícula de parcelas.

Una vez dividido el mapa en parcelas del mismo tamaño, se inicializan los emplazamientos de la manera explicada en el apartado 5.1 de este trabajo. Tras esto, tendremos una serie de emplazamientos contruidos con alguna tecnología y frecuencia y una serie de emplazamientos disponibles, como se puede apreciar en la Figura 9. Tras esto, se inicializan los años en el rango que se desee, empezando desde años negativos. El valor de los años negativos debe ser al menos tan grande como el tiempo de vida establecido para los nodos del modelo. Esto es para que al aplicar la ecuación E. 10, no se encuentren problemas de incompatibilidad en el modelo.



Figura 9. Representación de emplazamientos construidos (en verde) y disponibles (en azul). Fuente: Elaboración propia

Una vez establecidos los años, se realiza la estimación de demanda explicada en el apartado 5.4 y se obtiene un mapa como el de la Figura 10. En este caso, la demanda ha sido distribuida de manera aleatoria, siendo las zonas más oscuras las de mayor demanda.

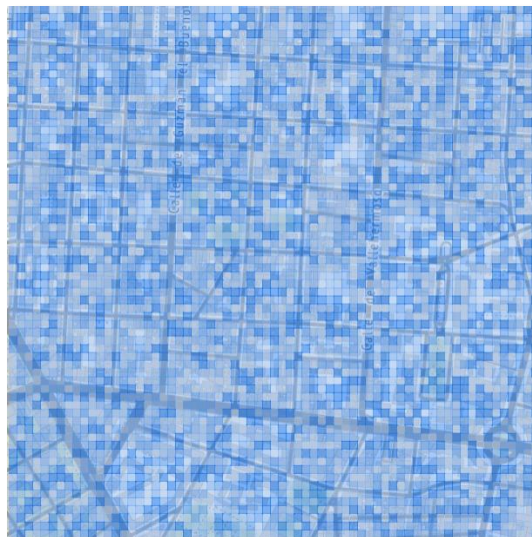


Figura 10. Representación de la demanda por parcelas. Fuente: Elaboración Propia

Por último, se realiza un cálculo de la cobertura de cada torre aplicando los conceptos explicados en el apartado 5.2 y de esta manera obtenemos una matriz para cada torre que indica si cubre o no cubre cada una de las parcelas. Esta representación se muestra en un caso inventado en la Figura 11. Una vez, se tienen todos los datos inicializados y representados, se puede comenzar con la optimización que se realizará en pyomo.

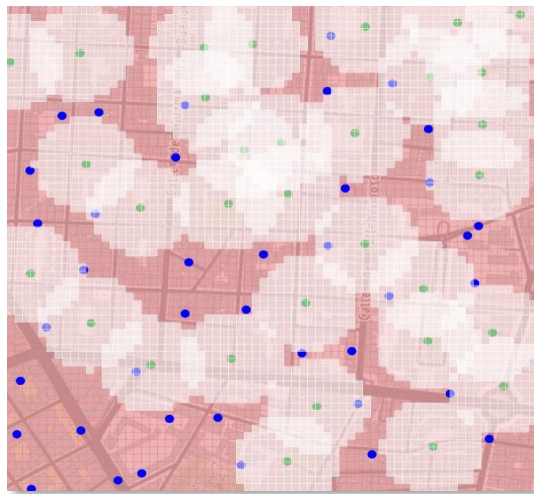


Figura 11. Representación de la cobertura inicial de las torres. Fuente: Elaboración propia

7.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN CÓDIGO

En este apartado se va a comentar la implementación del modelo explicado en el Capítulo 4. en Python a través de la librería pyomo. El código del modelo se puede encontrar en el ANEXO II, el archivo de modelo.py.

Para comenzar, se inicializan los cuatro sets del modelo. El set de site (emplazamiento) se inicializa con el número de emplazamientos que haya y se llama a cada uno con el nombre “s+nº de emplazamiento”. Para las parcelas es lo mismo, siendo la primera la parcela de abajo a la izquierda y el orden es primero la primera columna de abajo a arriba, después la segunda de abajo a arriba y así sucesivamente. Los años y las tecnologías se inicializan con los valores establecidos al inicializar datos en el apartado anterior.

Para inicializar los parámetros, lo único que hay que hacer es establecer los sets que van a utilizar para cada parámetro e inicializar con un valor que será de n dimensiones, siendo n el número de sets que tenga ese parámetro. Por ejemplo, si los emplazamientos iniciales dependen del set de emplazamientos y del de años, el valor con el que se inicializa tendrá 2 dimensiones. Será una matriz de tamaño $S \times Y$, siendo S el número de emplazamientos e Y el número de años.

Para los emplazamientos y los nodos, se inicializan con valores de 0 si no están construidos o 1 si sí lo están. Lo mismo para la cobertura en función de si un nodo cubre (1) o no cubre (0). Para la demanda se inicializan los valores para todos los años del modelo estableciendo un crecimiento visto en el apartado 5.4. Para la capacidad, establecemos los valores según lo tratado en el apartado 5.3. Además, se asignan los costes iniciales según los vistos en el apartado 5.5 y se establece una depreciación anual. Por último, se establecen valores para el porcentaje de demanda que se quiere cubrir, para el tiempo de vida y para la tasa de descuento a utilizar (que para tecnologías de telecomunicación suele estar en torno a un 7%).

Una vez inicializados los parámetros se inicializan las variables que, a diferencia de los primeros, no es necesario que se les asigne ningún valor de inicio ya que será el modelo el que seleccione sus valores. Sin embargo, antes de ejecutar el modelo, para que el tiempo de conversión sea algo menor, se establecerá un preproceso para fijar algunas variables. Este preproceso es el siguiente:

- Si un elemento (emplazamiento o nodo) estaba construido inicialmente, se fijan sus valores de la variable α para años negativos a 1 y el valor de b se pone a 1 en uno de los años negativos para indicar que se construyó ese año.
- Si un elemento (emplazamiento o nodo) no estaba construido inicialmente, se fijan sus valores de la variable α para años negativos a 0.
- Se establece como límite superior de las variables de demanda (v_z y v_u) la demanda máxima de una parcela en ese instante de tiempo.

Para concluir la programación del modelo, se escribe tanto la función objetivo como las restricciones sin tener en cuenta los valores para años negativos. Se ejecuta el modelo con el

optimizador de Gurobi y se guardan los resultados en un csv. Además, los resultados se muestran en un mapa como el de la Figura 12, en el que los nuevos emplazamientos aparecen en amarillo.

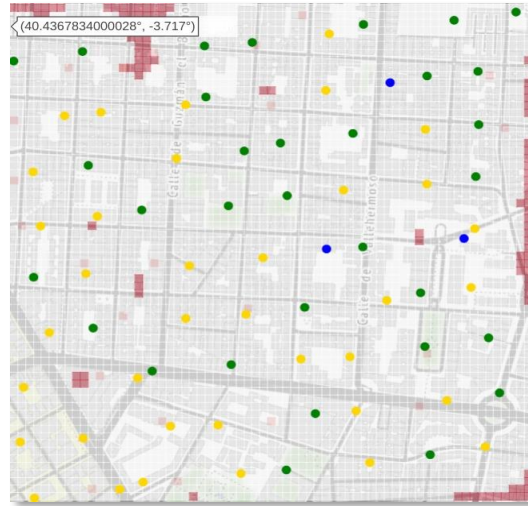


Figura 12. Representación de los resultados del modelo. Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CASOS DE ESTUDIO

Para analizar el modelo desarrollado en este trabajo, se van a realizar varios casos de estudio sobre dos zonas rurales con el objetivo de suministrar conectividades de más de 100 Mbps y analizar el impacto socioeconómico del despliegue.

8.1 IMPACTO SOCIOECONÓMICO EN ZONAS RURALES

El modelo desarrollado en este trabajo, aunque es escalable a otros ámbitos, tiene como objetivo generar una situación socioeconómicamente rentable para el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones de alta velocidad en un entorno rural. Para ello, este análisis se basa en el trabajo realizado por José Antonio López Muñoz [7], en el que recoge el impacto de la agenda digital en la España rural a través de un análisis detallado del impacto de la infraestructura de telecomunicaciones en poblaciones entre 100 y 2000 habitantes.

El objetivo de este caso de estudio será realizar un análisis en una zona gris o blanca o un conjunto de ambas aplicando el modelo de optimización de este trabajo para conocer la localización de las torres y la tecnología que usarían. A partir de los resultados del modelo, se estudiará basándose en los datos recogidos en [7], el impacto social que supone esta instalación.

En este apartado se busca llevar conectividad de alrededor de 100 Mbps al entorno rural. Para ello, se va a tener en cuenta que la demanda y la velocidad de red están estrechamente conectados. Esta afirmación se basa en el razonamiento de que cuánta más capacidad y más velocidad se tiene para conectarse, más se usa por dos motivos. El primer motivo es meramente matemático: si la información tarda menos tiempo en cargarse y en aparecer en tu pantalla, la latencia de consumo de información se acorta, necesariamente, con lo que se

puede consumir información en el mismo periodo de tiempo. En segundo lugar, haciendo un breve análisis lógico, si la conectividad de red de una persona es mayor y funciona más rápido, no va a tener problemas en consumir contenido o crear contenido, por lo que va a querer seguir haciéndolo y consumiendo más contenido, por lo que demandará más datos. Sin embargo, en el caso contrario si la velocidad de conexión de una persona es peor y tarda mucho en cargar un vídeo, o se congela la pantalla cada vez que hace una videollamada, disminuirán las probabilidades de que vuelva a querer conectarse. Esto es muy común que suceda a las personas cuando van a un lugar donde la cobertura de red no es muy buena, ya que como ven que no van a poder conectarse en un tiempo rápido, deciden desistir y no conectarse.

Teniendo esto en cuenta se va a realizar un análisis de la demanda para una velocidad de 100 Mbps y como esta velocidad afecta directamente a la demanda de datos. En primer lugar, es necesario considerar el número de dispositivos que se conectarán a la red al mismo tiempo. Cada dispositivo que se conecte a Internet consumirá parte de la velocidad disponible. Si hay varios dispositivos utilizando la conexión simultáneamente, la demanda de datos aumentará. Por lo tanto, si se requiere una velocidad de 100 Mbps y se espera que varios dispositivos se conecten a la vez, la demanda de datos necesaria será mayor para satisfacer el uso de todos los dispositivos [61].

Además, es importante considerar cómo se utilizará la conexión a Internet. Actividades como la transmisión de videos en alta definición, la descarga de archivos grandes o el juego en línea consumirán más datos y, por lo tanto, requerirán una mayor demanda de datos para aprovechar al máximo la velocidad de 100 Mbps. Si la intención es realizar tareas que requieren una gran cantidad de datos, es posible que sea necesario un mayor rendimiento para satisfacer la demanda [62].

Por lo tanto, a raíz de la información previa se concluye que, para tener una velocidad de 100 Mbps, lo que se necesita es que en un momento determinado se tenga la suficiente capacidad del canal para poder recibir 100 Mbps. Para convertir la afirmación previa a datos de demanda, vamos a hacer una estimación cogiendo como referencia los datos analizados

en el capítulo 5.4, referente a la demanda. En este capítulo, se ha estimado que la demanda media de datos móviles por usuario en España es de 2,73 kB. Inicialmente, se va a tomar este valor multiplicado por 2 como demanda pico en la zona a analizar, porque sabiendo que es una zona rural y que la conectividad no es tan alta, la demanda pico no será tan alta. Sin embargo, como son zonas que ya tienen conectividad de 30 Mbps, tampoco será tan baja como para asumir que la demanda pico es la media de España.

Este análisis, se va a dividir en tres partes. En primer lugar, se hará un análisis atemporal en el que simplemente, partiendo de la situación actual, se estimará qué torres y de qué frecuencia se deben instalar para satisfacer una demanda de 100 Mbps si queremos que esta tecnología se alcance hoy. En segundo lugar, se analizará un escenario temporal en el que la demanda crecerá año a año, lo que supondrá la mayor instalación de torres. Este escenario contempla una forma progresiva de adopción de las altas velocidades. Por último, tomando como referencia los datos comentados en el Capítulo 6, se hará un pequeño análisis de los resultados obtenidos.

8.1.1 ESCENARIO ATEMPORAL

Para analizar cuál sería el coste de llevar conectividades superiores a 100 Mbps a entornos rurales, se va a ejecutar el modelo sin tener en cuenta la componente temporal, para conocer cuál sería la inversión necesaria hoy mismo. Los datos en referencia a cobertura, capacidad, costes y color con el que representaremos cada una de las tecnologías y frecuencias se pueden encontrar en la Tabla 12. Es importante tener en cuenta que, para obtener conectividades de más de 100 Mbps continuas, es necesario que la capacidad sea mayor que 100 Mbps. Por ello, los nodos 3G no son considerados en este análisis. Además, al ser entorno rural, tampoco se considera la frecuencia de onda milimétrica.

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Capacidad</i> <i>(Mbps)</i>	<i>Cobertura</i> <i>(km)</i>	<i>CAPEX</i> <i>(k€)</i>	<i>Color</i>
5G	700 MHz	200	12	55	Morado

4G	800 MHz	110	10	45	Rojo
3G	900 MHz	-	-	-	Verde
4G	1800 MHz	130	3,5	33	Azul Grande
3G	2100 MHz	-	-	-	Naranja
4G	2600 MHz	250	2	35	Amarillo
5G	3500 MHz	2000	1,5	48	Rosa
Emplazamientos libres	-	-	-	-	Azul Pequeño

Tabla 12. Datos para la ejecución del primer caso de estudio atemporal. Fuente: Elaboración Propia

8.1.1.1 Villasequilla de Yepes

Para comenzar, el análisis se va a realizar sobre un pueblo que según los datos de [7], tiene cobertura de más 30 Mbps pero no de 100 Mbps, concretamente, en Villasequilla de Yepes, un municipio de Toledo de 2478 habitantes [63]. Este municipio tiene una media de edad en torno a los 43 años, por lo que resulta de gran interés el aumentar la conectividad ya que no es una media tan alta. En este caso, no tendría sentido estudiar la conectividad en el pueblo ya que hay más municipios cercanos que se pueden aprovechar de un nodo instalado en Villasequilla o viceversa. Por ello, se escoge un radio de 15km centrado en el pueblo y recortando si no se habían encontrado más municipios (en total una zona de 142 kilómetros cuadrados). Esta área se va a dividir en parcelas cuadradas de 750 metros de lado. Los 2 municipios más importantes que se encuentran cerca de Villasequilla son Yepes (con una población de 5268 habitantes) y Huerta de Valdecarábanos (con una población de 1726 habitantes).

Respecto a la demanda, se va a aplicar el dato explicado en el apartado anterior por habitante. En las zonas no habitables se establecerá una demanda pequeña pero no igual a 0 ya que también hay que considerar que puede haber situaciones en las que haya coches que necesiten cobertura en esa zona. El resultado de aplicar esta división en demanda se puede ver en la Figura 13, donde se reparte el área en cuadrados de 750 metros de lado, en azul oscuro las áreas con una demanda mayor a 40 Mbps, en azul más claro las zonas con una demanda superior a los 20 Mbps y en blanco las zonas con una demanda inferior a 10 Mbps.

Una vez se tiene asignada la demanda, se establece también la localización de las torres actuales y las frecuencias y tecnologías en las que operan cogiendo los datos reales de las fuentes vistas en el capítulo 5.1.1. Esta representación se puede ver en la Figura 14, para la que se ha utilizado los colores de la Tabla 12, que será la que se utilice para todas las representaciones posteriores.

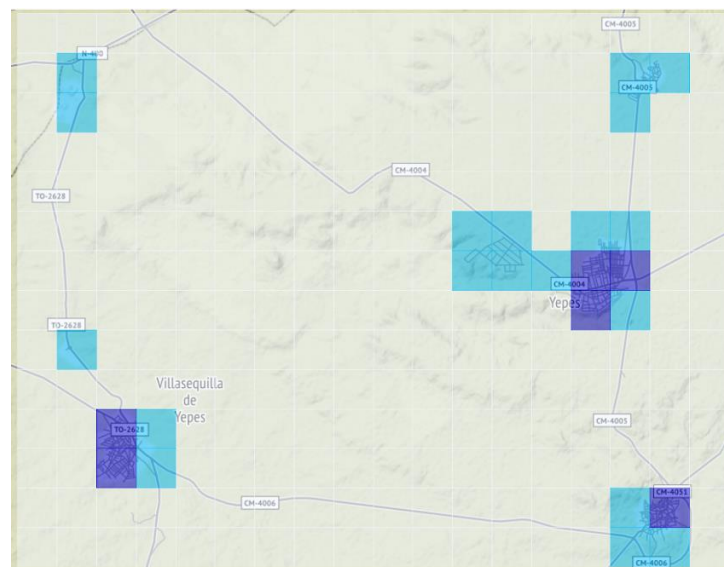


Figura 13. Distribución de la demanda alrededor de Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

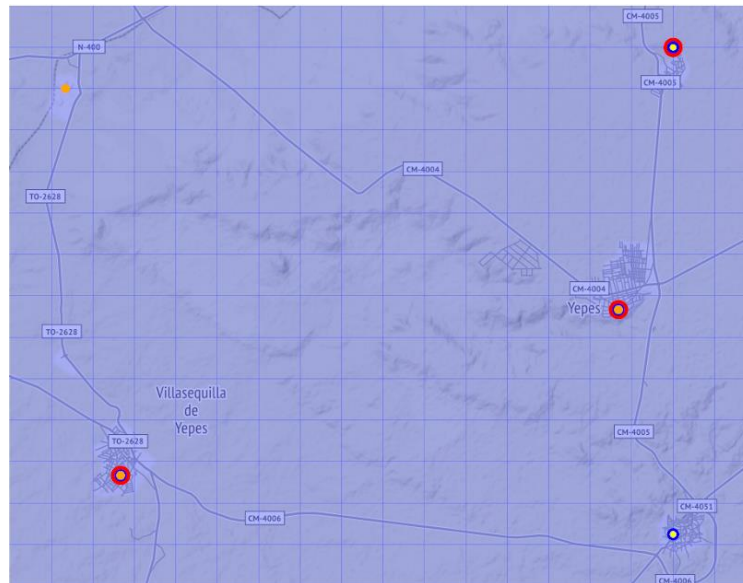


Figura 14. Localización Inicial de las torres en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

Una vez se establecida la situación de partida se van a realizar diversos casos de estudio sobre este municipio. En primer lugar, se va a realizar una comprobación de que la estimación de demanda ha sido razonablemente buena, ejecutando el modelo con los datos iniciales de demanda. Si la estimación ha sido buena, no se tendría que construir ni dismantelar ningún nodo de telecomunicaciones. Esta comprobación se puede observar en la Figura 15, donde no se representan los nodos 3G, debido a que no se tienen en cuenta para este caso. En esta figura se ve que los nodos son los mismos que los iniciales, por lo que no es necesaria ninguna inversión. Toda el área blanca quiere decir que está cubierta al 100%. Si hubiera alguna zona roja no estaría cubierta completamente.

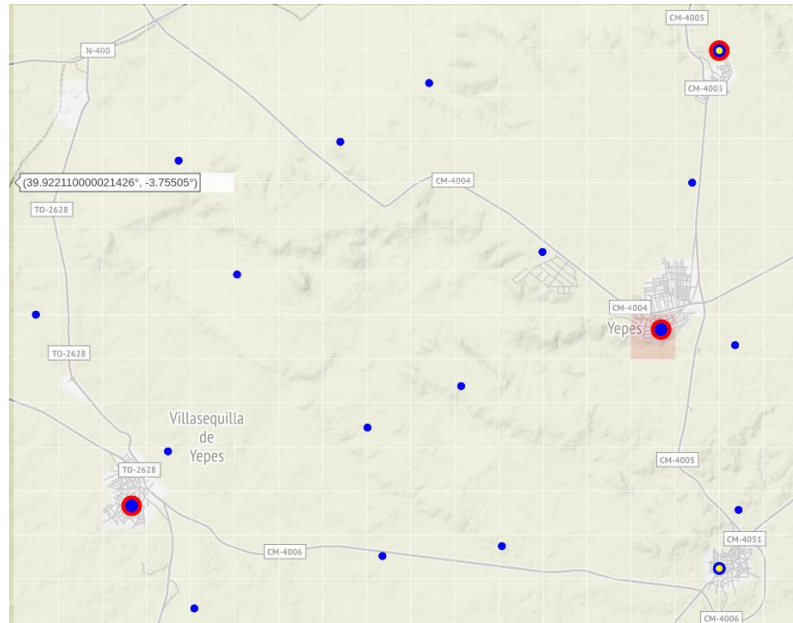


Figura 15. Comprobación demanda correcta Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración propia

Tras esta comprobación, se van a realizar casos atemporales en los que se valorará, partiendo de la situación inicial, qué torres y de qué frecuencia se deben instalar para satisfacer una demanda de 100 Mbps. Para ello, como la velocidad de conexión es de 30 Mbps y se ha visto que está estrechamente relacionada con la demanda, se verá un caso en el que aumente la demanda en un 400%, pero además se verá un caso optimista en el que la demanda aumente en un 800% y otro más pesimista en el que únicamente aumente un 200%, debido a que puede ser que la demanda en esta zona no aumente tanto como para que sea necesario 100 Mbps.

Al aumentar la demanda en un 200%, observamos las primeras instalaciones que son un nodo de 5G a 3500 MHz en el pueblo de Yepes y un nodo de 4G a 2600 MHz en el pueblo de Villasequilla de Yepes. Estas instalaciones tienen sentido ya que son los dos pueblos de la zona con más población (Yepes tiene una población en 2023 de 5268 habitantes y Villasequilla de 2563). Como Yepes es el municipio con mayor población, si la demanda aumenta en un 200%, este aumento es considerable. Para satisfacer esta nueva demanda, se necesitan altas conectividades que ofrece el 5G a frecuencias medias y sin necesidad de un

gran radio de cobertura porque este gran aumento se concentra en el pueblo. Estas instalaciones supondrían un coste de 83.000€.

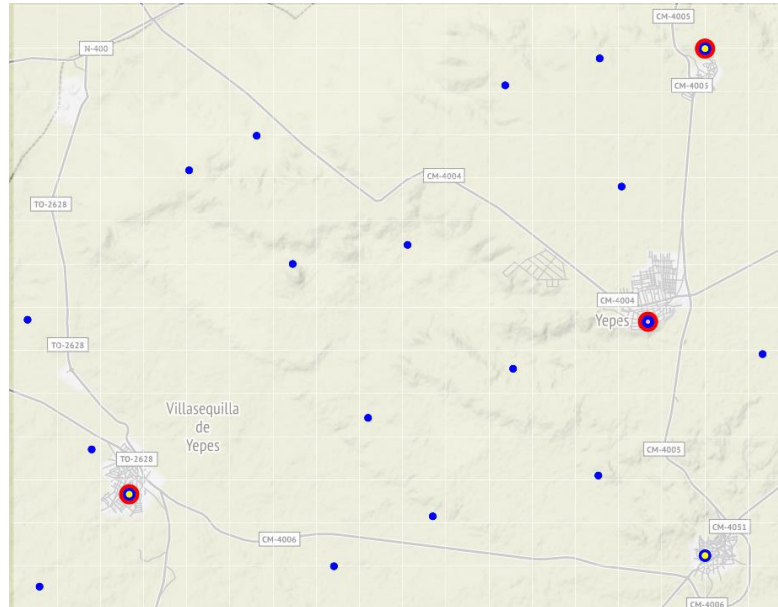


Figura 16. Aumento de la demanda en un 200% en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

Después de esto, se aumenta la demanda en un 400% respecto el valor inicial. El resultado de este aumento se puede observar en la Figura 17. Al aumentar la demanda en un 400% esto supone instalar dos nodos de 5G a 3500 MHz en las zonas más pobladas (Villasequilla de Yepes y Yepes) y un nodo de 4G a 1800 MHz en la urbanización que se encuentra arriba a la izquierda en la imagen. Por lo tanto, esto nos muestra que para aumentar la conectividad a 100 Mbps en ese área haría falta una inversión de 116.000€.

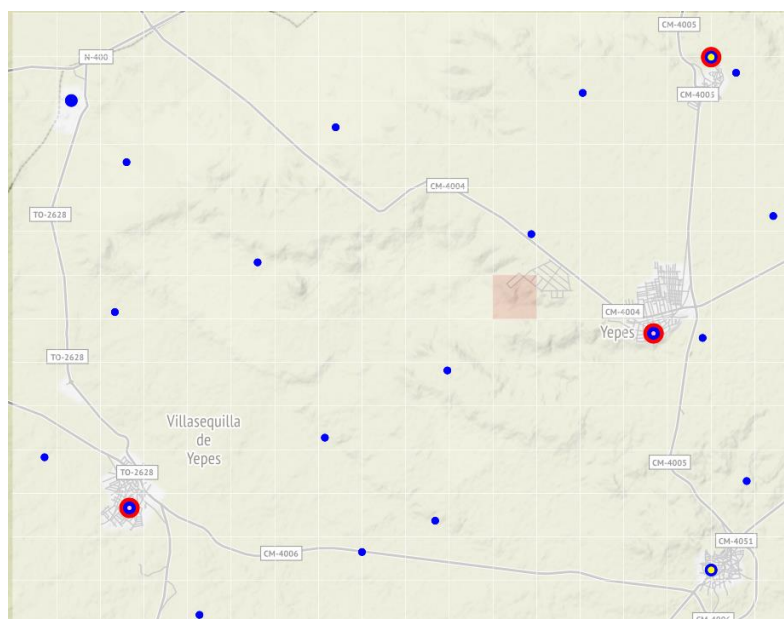


Figura 17. Aumento de la demanda en un 400% en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

Por último, se valora un caso muy optimista que es en el que la demanda crezca en un 800% respecto a la demanda inicial. Esta situación sería equivalente a que la demanda de datos consumida en esta zona rural sea equivalente a la de una zona urbana. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 18.

En este caso, se observa que tanto en Villasequilla de Yepes como en Yepes se instala un nodo de 5G a 3500 MHz, pero además en Yepes se instala uno de 4G de 2600 MHz. Además, en a la urbanización de arriba a la derecha se instala un nodo de 4G a 2600 MHz y en el pueblo de Huerta de Valdecarábanos (abajo a la derecha) se realiza una instalación de un nodo de 5G a 700 MHz. En total toda esta instalación supone un coste de 221.000€.

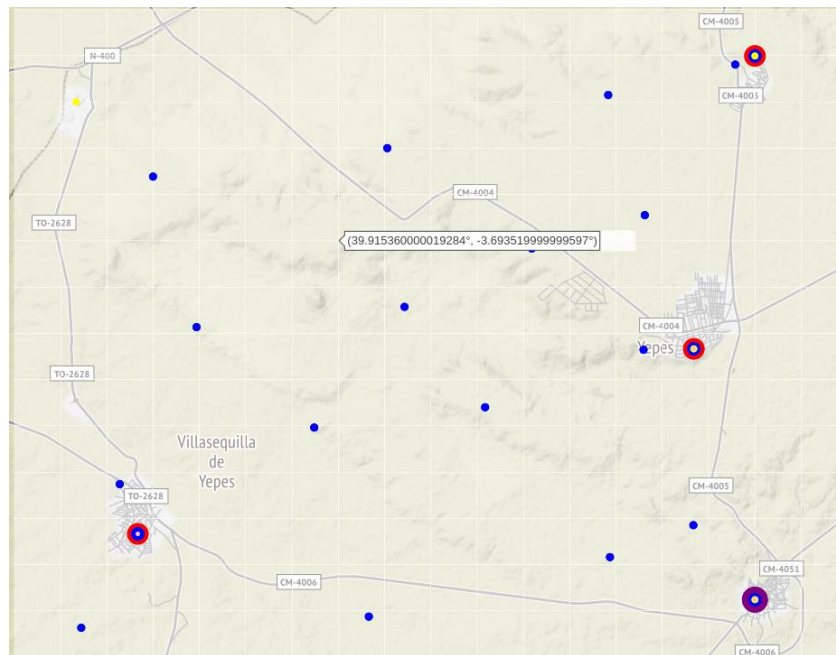


Figura 18. Aumento de la demanda en un 800% en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

Es importante destacar que, en ninguno de los tres escenarios, se construye un nuevo emplazamiento debido a que el coste es bastante alto y sale mucho más rentable aprovechar los emplazamientos existentes. El resultado de este análisis temporal se puede observar en la Tabla 13.

<i>Aumento de la demanda</i>	<i>Inversión en CAPEX (k€)</i>
Aumento del 200%	83
Aumento del 400%	116
Aumento del 800%	221

Tabla 13. Inversiones de CAPEX realizadas en función de cada aumento de demanda. Fuente: Elaboración Propia

Haciendo un breve análisis de los resultados, se llega a la conclusión de que para alcanzar una conectividad de 100 Mbps actualmente sería necesario una inversión de 116.000€, y que

la diferencia en aumentar del 200% al 400% que permitiría esa conectividad solo supondría una inversión de 30.000€. Debido a la gran diferencia entre el caso de 400% y el de 800%, se deduce que no saldría aumentar la oferta para igualar a la demanda en este tipo de contextos, en línea con lo esperado para un entorno rural.

Se debe valorar que estos datos son simplemente análisis de CAPEX y se sabe que a lo largo del tiempo el coste más caro es el de mantenimiento u OPEX por lo que, aunque estos datos resultan de interés para conocer cuál debería ser la inversión en un momento determinado, sería necesario realizar un análisis temporal como el que se verá en posteriormente, después de analizar el modelo atemporal para el caso de Chañe.

8.1.1.2 Chañe

Se va a realizar el mismo análisis que el anterior para un pueblo que tomando como referencia los datos de [7] no llega a una conectividad de 30 Mbps, aunque los pueblos de alrededor sí. Este pueblo es Chañe, un municipio de la provincia de Segovia con un total de 703 habitantes. De la misma manera que antes se va a establecer la planificación celular en toda el área que rodea a Chañe y no solo en el pueblo. En total esta área serían 250 kilómetros cuadrados que se divide en parcelas de 1 kilómetro de lado. Para establecer la demanda, es necesario conocer la población de los pueblos que rodean a Chañe: Pedrajas de San Esteban (3322), Íscar (6370), Villaverde de Íscar (621), Remondo (305), Fresneda de Cuéllar (166), Narros de Cuéllar (165), Campo de Cuéllar (212), Chatún (266), Gomezserracín (657), Arroyo de Cuéllar (371) y Sanchonuño (1000). Todo este mapa de demanda se representa en la Figura 19. En azul oscuro se dibujan las áreas con una demanda mayor a 40 Mbps, en azul claro las zonas con una demanda superior a los 20 Mbps, en azul más claro las zonas con una demanda inferior a 10 Mbps y en blanco las zonas con una demanda inferior a 5 Mbps.

Una vez se tiene asignada la demanda, se establece también la localización de las torres actuales y las frecuencias y tecnologías en las que operan cogiendo los datos reales de las fuentes vistas en el capítulo 5.1.1. Esta representación se puede ver en la Figura 20, para la que se ha utilizado los colores de la Tabla 12.

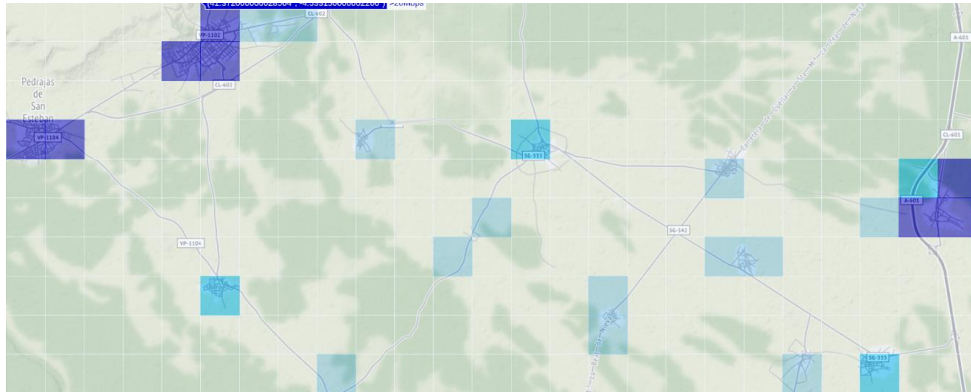


Figura 19. Distribución de la demanda alrededor de Chañe. Fuente: Elaboración Propia

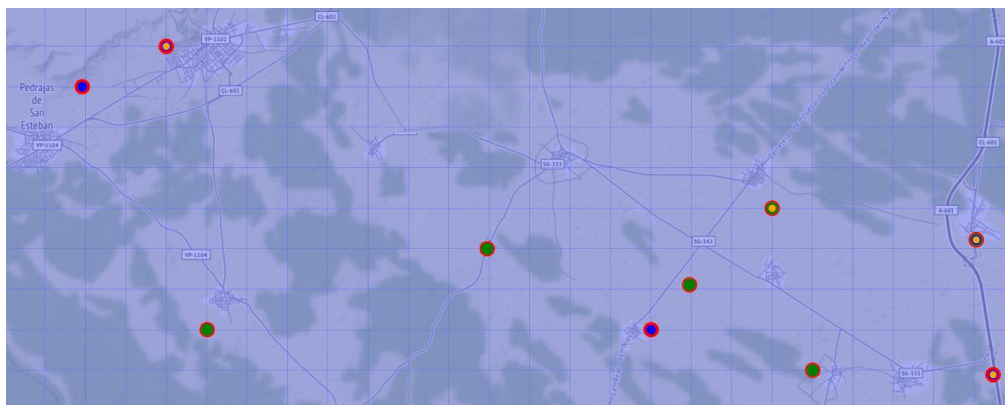


Figura 20. Localización inicial de las torres en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

Una vez se tiene esta situación inicial se van a realizar diversos casos de estudio sobre este municipio. En primer lugar, se va a realizar una comprobación de que la estimación de demanda ha sido razonablemente buena, ejecutando el modelo con los datos iniciales de demanda. Si efectivamente la estimación ha sido adecuada, no se tendría que construir ni dismantelar ningún nodo de telecomunicaciones. Esta comprobación se puede observar en la Figura 21, donde no se representan los nodos 3G, debido a que no se tienen en cuenta para este caso. En esta figura se ve que los nodos son los mismos que los iniciales, por lo que no es necesaria ninguna inversión.

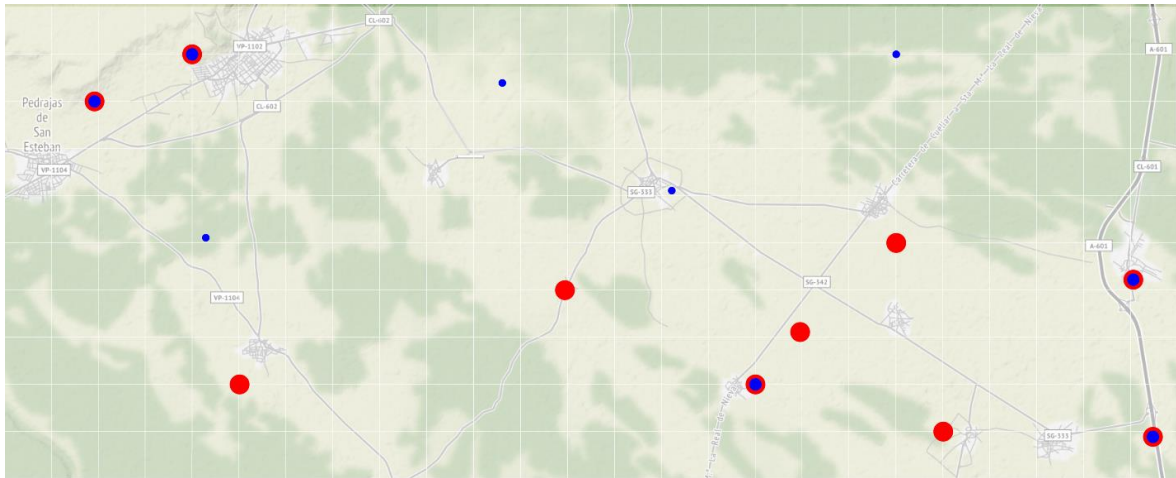


Figura 21. Comprobación demanda correcta en Chañe. Fuente: Elaboración propia

Tras esta comprobación, se analizarán varios casos atemporales en los que se valorará, partiendo de la situación actual, qué torres y de qué frecuencia se deben instalar para satisfacer una demanda de 100 Mbps. Para ello, como la velocidad de conexión es algo menor a 30 Mbps en Chañe, pero superior a 30 Mbps en otros pueblos de la zona y se ha visto que está estrechamente relacionada con la demanda, se verá un caso en el que aumente la demanda en un 400%, pero además se verá un caso optimista en el que la demanda aumente en un 800% y otro más pesimista en el que únicamente aumente 200%, debido a que la demanda puede crecer más lentamente.

Al aumentar la demanda en un 200%, se observa que las instalaciones realizadas son principalmente en los pueblos con mayor número de habitantes. En Íscar, el de mayor población, se instala un nodo 5G a 3500 MHz y uno de 4G a 2600 MHz. En Pedrajas de San Esteban, se instala un nodo de 4G a 2600 MHz. Estos dos municipios se encuentran arriba a la izquierda en la imagen. Por último, se instala un nodo de 5G a 3500 MHz en Santonuño (a la derecha de la imagen). Estos resultados son coherentes ya que son los lugares donde la demanda es mayor y crece más rápidamente en valor absoluto. El coste total sería de 166.000€.

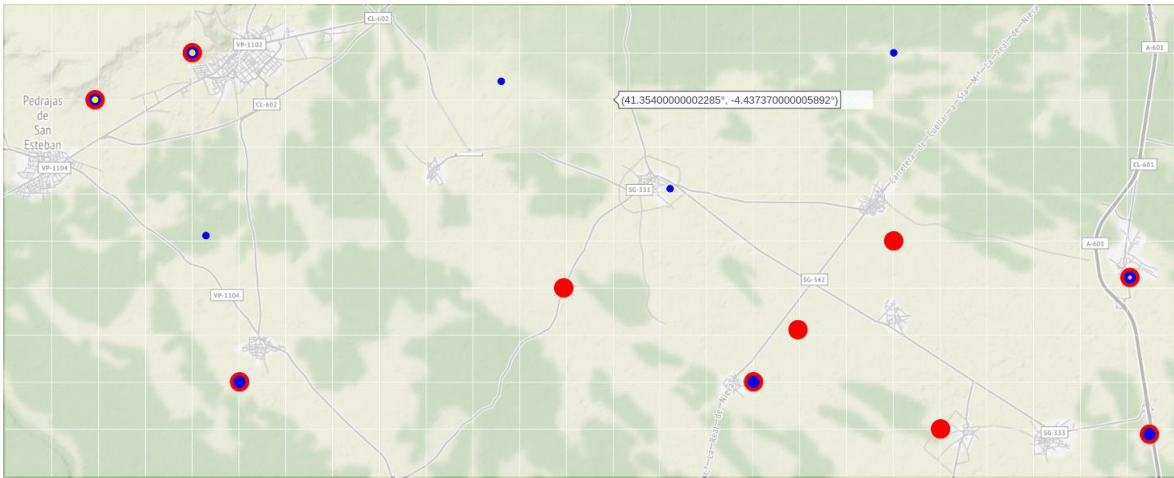


Figura 22. Aumento de la demanda en un 200% en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

Habiendo analizado el crecimiento en un 200%, se aumenta la demanda en un 400% respecto al valor inicial. El resultado de este aumento se puede observar en la Figura 23.

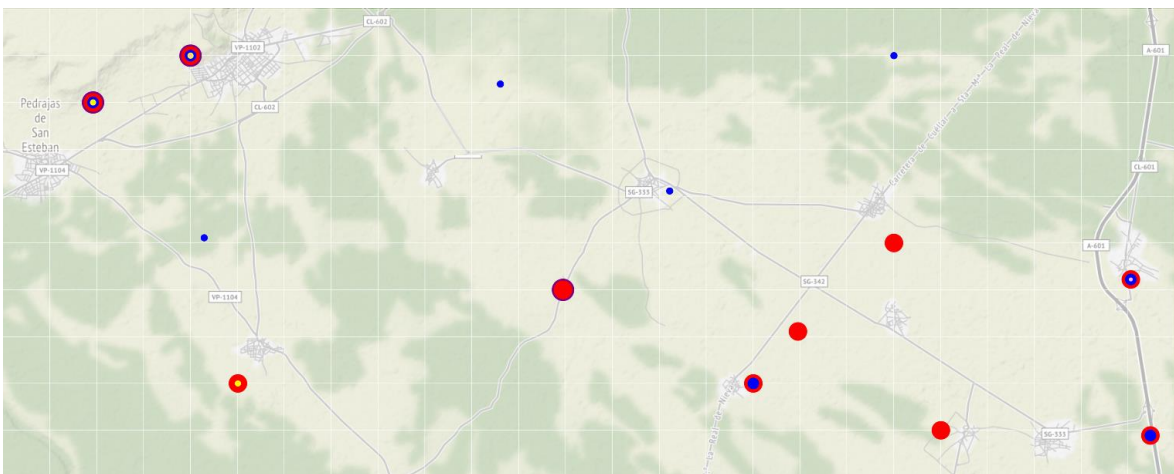


Figura 23. Aumento de la demanda en un 400% en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

Al aumentar la demanda en un 400%, por un lado se realizan las mismas instalaciones que para el aumento de 200%, lo que tiene sentido y, por otro lado, nuevas instalaciones para satisfacer la demanda creciente. Se instalan 3 nodos de 5G a 700 MHz (uno en Pedrajas de San Esteban, otro en Íscar y otro en el centro, cerca de Chañe). Estas instalaciones son coherentes ya que en una zona donde la demanda está tan distribuida, en caso de aumentar, la manera más económica sería instalando bajas frecuencias como la de 700 MHz que

además te ofrecen unas capacidades, no tan altas como las de frecuencias mayores, pero altas. Además, se instala una antena de 4G a 2600 MHz cerca de Villaverde de Íscar, el cuarto municipio más poblado, con el objetivo de satisfacer la demanda creciente en el pueblo. En total, todas estas instalaciones suponen un coste de 366.000€.

Por último, se valora un caso muy optimista que es en el que la demanda crece en un 800% respecto a la inicial. Esta situación sería equivalente a que la demanda de datos consumida en esta zona rural sea como la de una zona urbana. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 24.

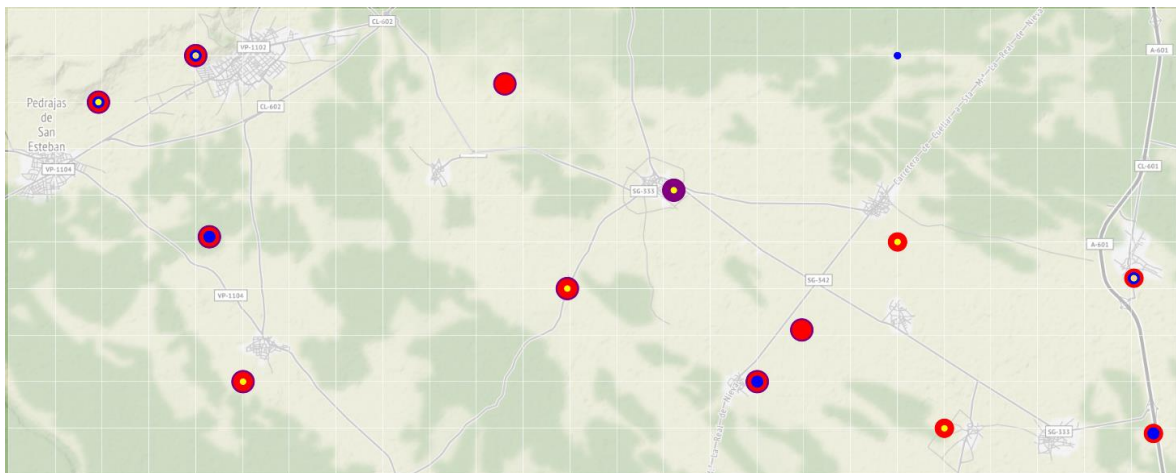


Figura 24. Aumento de la demanda en un 800% en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

En este caso, la instalación es, por un lado, la misma que la de 400% pero, además, se realiza una fuerte inversión para satisfacer esta gran demanda. Lo más destacable es que no solo se construyen nodos, sino que la demanda es tan alta que el modelo ha necesitado construir emplazamientos (que supone un coste de 130.000€ por emplazamiento). No solo esto, sino que se instalan 6 nodos de 5G a 700 MHz, todos alrededor del centro de la imagen. Si se analiza detenidamente, resulta sensato el imaginar que para satisfacer la demanda creciente de un área de tanta extensión es necesario trabajar con bajas frecuencias y más si el 5G te ofrece buenas capacidades. Siguiendo con este análisis de bajas frecuencias se instalan 2 nuevos nodos de 4G a 800 MHz, para complementar las de 700 MHz. Es interesante observar que al inicio todos los emplazamientos trabajaban con la frecuencia de 800 MHz y no había

problema, pero al aumentar la demanda y tener que construir nuevos emplazamientos se prioriza el 5G a 700 MHz pese a ser más caro. Además de estas inversiones en bajas frecuencias se invierte en 3 nuevos nodos de 4G a 2600 MHz, que se instalan cerca de municipios con bastantes habitantes como Chañe o Gomezserracín. El coste total de todas estas instalaciones es 1.320.000€

El resultado de este análisis temporal se puede observar en la Tabla 14.

<i>Aumento de la demanda</i>	<i>Inversión (k€)</i>
Aumento del 200%	166
Aumento del 400%	366
Aumento del 800%	1320

Tabla 14. Inversiones realizadas en función de cada aumento de demanda en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

Haciendo un breve análisis de los resultados, se llega a la conclusión de que para alcanzar una conectividad de 100 Mbps en toda el área presentada sería necesario una inversión de 366.000€ actualmente, y que la diferencia en aumentar del 200% al 400% que permitiría esa conectividad supondría una inversión de 200.000€, que no es tan elevada si la comparamos con el siguiente aumento. Debido a la gran diferencia entre el caso de 400% y el de 800%, se deduce que no saldría rentable aumentar a tanto nivel la capacidad de la red y menos para un entorno rural.

Es importante destacar que estos datos son simplemente análisis de CAPEX y se sabe que a lo largo del tiempo el coste más caro es el de mantenimiento. Por ello, aunque los valores obtenidos resultan de interés para conocer una inversión en un momento puntual, sería necesario realizar un análisis temporal de inversión como el que se verá en el siguiente apartado.

8.1.2 ESCENARIO TEMPORAL

El análisis anterior resulta interesante para conocer cuál sería la inversión necesaria en CAPEX para llevar conectividad de 100 Mbps. Sin embargo, generalmente esta inversión no se realiza en un momento, sino que va siendo de manera progresiva y se valora no solo el CAPEX sino también el OPEX y el coste de dismantelar algún nodo como por ejemplo los de 3G. Por ello, en este apartado se va a realizar un análisis temporal de inversión en un escenario en el que el crecimiento de la demanda sea progresivo. El tiempo en el que se analizará este escenario será de 12 años.

Inicialmente, la situación es la de partida mencionada anteriormente. Se parte de una situación en la que la demanda inicial es de unos 5 KBps por usuario. Apoyándonos en los datos de Ericsson vistos en el capítulo 5.4, donde se establece que la demanda de datos crece en torno a un 18%, establecemos que durante los 6 primeros años el crecimiento es más lento, del 12% compuesto, pero que después del año 6 ya crece a un 18%, que es el ritmo que se espera cuando ya se llega a unos niveles de conectividad medio-altos. Se escogen 6 años porque a los 6 años se dobla la demanda. La demanda final sería unas 5 veces y media mayor que la inicial. Esto supondría, después de 12 años estar en un escenario con más demanda que el de 400% pero peor al de 800%. El escenario equivalente al de un aumento de la demanda del 400% se alcanzaría en el año 10.

Esta evaluación temporal tiene que lidiar con escenarios interesantes como decidir entre si pagar el OPEX de un nodo o dismantelarlo. En este análisis no se contempla el dismantelamiento de un emplazamiento ya que aumentaba bastante el tiempo de conversión y no afectaba en gran medida a la solución porque generalmente el modelo no construye nuevos emplazamientos, sino que aprovecha los ya existentes. Además, generalmente, como se ha visto en el apartado 5.1.2, es muy complicado encontrar un lugar donde construir por motivos de licencias, negociaciones por el terreno y regulación, por lo que tiene sentido que construir un nuevo emplazamiento no sea tan fácil. Para este análisis, se establece un tiempo de reemplazo de un nodo en 7 años y una tasa de descuento del 7%, que es comúnmente utilizada para inversión en tecnologías de la telecomunicación. Además, se tendrá en cuenta

la depreciación de la tecnología, estableciendo que cada año, el valor baja en 2% respecto al año anterior. En referencia a un emplazamiento se establece un coste de instalación de 130.000€ según las estimaciones realizadas en el capítulo 5.5.1. El coste referente a los nodos y el color en el que serán representados se muestra en la Tabla 15. Para los datos, únicamente se ha cogido una media de los valores que se han analizado en el Capítulo 5.

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Capacidad</i>	<i>Cobertura</i>	<i>CAPEX</i>	<i>OPEX</i>	<i>CDEC</i>	<i>Color</i>
		<i>(Mbps)</i>	<i>(km)</i>	<i>(k€)</i>	<i>(k€)</i>	<i>(k€)</i>	
5G	700 MHz	150	11	55	14	8	Morado
4G	800 MHz	75	9	40	10	6	Rojo
3G	900 MHz	20	7	100	2,5	3	Verde
4G	1800 MHz	90	3	30	7	4,2	Azul Grande
3G	2100 MHz	30	2,5	75	2	2,5	Naranja
4G	2600 MHz	250	2	35	9	5,25	Amarillo
5G	3500 MHz	1500	1,5	45	11	6,75	Rosa

Emplazamientos libres	-	-	-	-	Azul	Pequeño
-----------------------	---	---	---	---	------	---------

Tabla 15. Datos de entrada escenario temporal. Fuente: Elaboración Propia

Una vez establecidos los datos de entrada al modelo, se va a realizar el análisis temporal para ambos municipios mencionados en el análisis atemporal. Como son 12 años en los que se realiza el análisis, las imágenes de la situación cada año, se adjuntan en el anexo III para el caso de Villasequilla (ANEXO III: Representación Temporal del Despliegue de Telecomunicaciones en la Zona de Villasequilla de Yepes) o en el anexo IV para el caso de Chañe (ANEXO IV: Representación Temporal del Despliegue de Telecomunicaciones en la Zona de Chañe). En las imágenes se pueden ver representadas las torres de telecomunicación según los colores de la Tabla 15. Además, se representa la situación de la demanda cubierta, en caso de estar blanco es que esa parcela está 100% cubierta mientras que si está algo rojo es que está más del 50% cubierta. Esto se debe a que para que el modelo llegue a una solución algo más rápido, se establece una cobertura del área del 99%. Por ello, aunque en alguna de las imágenes se vean varios cuadrados rojos, si se observa con detenimiento, son áreas donde la demanda (establecida en la Figura 13) es bastante baja, por lo que en total un 99% de la demanda queda cubierta.

8.1.2.1 Villasequilla de Yepes

Tras la ejecución del modelo para la planificación celular en Villasequilla, se muestran los costes asociados a cada año en la siguiente tabla para su posterior descripción y análisis.

Año	CAPEX torres (k€)	OPEX torres (k€)	CAPEX nodos (k€)	OPEX nodos (k€)	Desmantelar (k€)	Total (k€)	Con TD* (k€)
1	0	175	80	48	33,4	336,40	336,40
2	0	171,5	113,68	49	27,44	361,62	337,96

3	0	168,07	0	48,02	0	216,09	188,74
4	0	164,70	26,35	53,64	0	244,70	199,75
5	0	161,41	0	52,56	0	213,97	163,24
6	0	158,18	47,9	57,85	3,8	267,74	190,89
7	0	155,02	39,86	58,46	4,65	257,99	171,91
8	0	151,92	69,45	65,1	5,97	292,44	182,12
9	0	148,88	107,19	71,46	11,27	338,80	197,19
10	0	145,90	29,18	71,69	3,5	250,28	136,13
11	0	142,98	22,87	75,97	0	241,83	122,93
12	0	140,12	28,02	81,65	0	249,80	118,68
Total	0	1.883,72	564,5	733,4	90,03	3.271,66	2.345,94

Tabla 16. Costes asociados al despliegue de infraestructura en Villasequilla de Yepes durante 12 años.

Fuente: Elaboración Propia

*TD: Tasa de descuento 7%

La inversión realizada el primer año se debe a que el modelo considera que hay una mejor manera de suplir esa demanda, también teniendo en cuenta el impacto a largo plazo. En el apartado del análisis atemporal se ha visto que la situación inicial de las torres era suficiente para satisfacer la demanda, sin embargo, el modelo considera que no es una manera optimizada valorando la inversión a largo plazo. Además, esto se debe a que los datos iniciales corresponden a diferentes operadoras por lo que es normal que de manera inicial

haya más nodos de telecomunicación que en el caso de que solo haya un solo jugador, que es el estudiado en este trabajo.

En este primer año, aunque se han desinstalado 2 nodos de 800 MHz, 2 de 1800 MHz, 2 de 2600 MHz y 1 de 2100, se han instalado 1 de 2600 MHz en Villasequilla de Yepes y uno de 3500 MHz en Yepes, los dos pueblos con más demanda. Esto tiene sentido debido a que la demanda está más concentrada en estos lugares, por lo que se necesitan más altas frecuencias.

Es importante destacar que, en el año 2, el tiempo de vida de los nodos iniciales se acaba (inicializados en el año -5), por lo que el modelo está obligado a dismantelar y ya decidir si instala de nuevo los mismos o construye otros. En este caso, el único que decide volver a instalar es el de 4G a 1800 MHz en Yepes, y además instala un nodo de 5G a 700 MHz que proporciona gran cobertura para toda el área. Además, sustituye el nodo 4G a 1800 MHz en Huerta de Valdecarábanos, por uno de 4G a 2600 MHz que pese a tener menor cobertura, tiene más capacidad para satisfacer la demanda del municipio. En el año 3, la situación se mantiene igual.

En el año 4, la única diferencia es que se instala un nodo de 4G a 1800 MHz en el municipio de arriba a la derecha, debido a que el nodo de 5G a 700 MHz aunque tiene suficiente cobertura para llegar allí, no tiene suficiente capacidad para satisfacer la demanda creciente en toda el área. En el año 5 la situación se mantiene igual mientras que en el año 6, se decide dismantelar un nodo 4G a 1800 MHz en Yepes e instalar uno de 5G a 700 MHz en Villasequilla de Yepes. En este momento con los dos nodos de 5G, se cubriría gran parte del mapa sin tener en cuenta la demanda. Al tener en cuenta la demanda, se necesitarían más nodos ya que la capacidad de 5G a 700 MHz no es tan alta como para satisfacer la demanda creciente. En el año 7, el único cambio, debido al aumento de la demanda, es sustituir un nodo 4G de 2600 MHz por uno de 5G de 3500 MHz en Villasequilla de Yepes, ya que considera que se necesita mayor capacidad aunque suponga un mayor coste.

En el año 8, se pasa el tiempo de vida de los instalados en el año 1, por lo que si se desea se tienen que volver a instalar y esto es lo que se hace con el nodo de 5G a 3500 MHz de Yepes.

Además, se instala un nodo de 4G a 2600 MHz en la urbanización de arriba a la izquierda de la imagen. En el año 9, hay dos nodos (700 MHz de Yepes y 2600 MHz de Huerta de Valdecarábanos) que se desmantelan porque fueron construidos en el año 2 y no se decide volver a construirlos. Para compensar la pérdida de capacidad ofrecida por estos dos nodos desmantelados, se instala otro de 700 MHz arriba a la derecha, uno de 1800 MHz en Yepes y uno de 3500 MHz en Huerta de Valdecarábanos.

En el año 10, todo se mantiene igual con la única diferencia que se desinstala un nodo de 1800 MHz y se instala uno de 2600 MHz en su lugar. En el año 11 únicamente se instala un nodo de 1800 MHz en Villasequilla de Yepes. Finalmente, en el año 12, se realiza una instalación de un nodo 4G a 2600 MHz en Yepes.

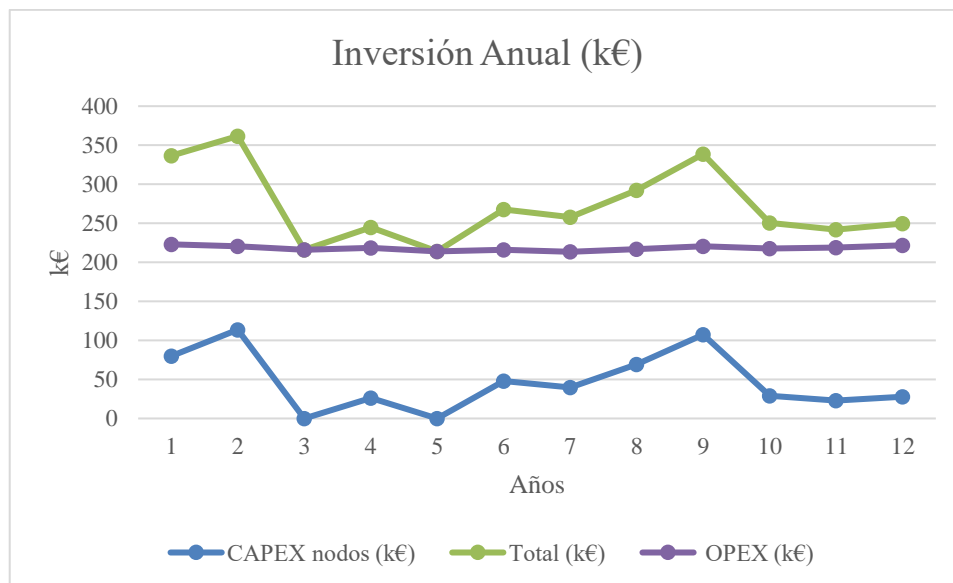


Figura 25. Representación de la variación del coste a lo largo de los 12 años en Villasequilla. Fuente: Elaboración Propia

Tras analizar los costes en este escenario temporal con una demanda creciente y teniendo en cuenta el CAPEX y el coste de desmantelamiento, se obtiene que se necesitaría una inversión de 2.345.940€ traída a presente que se reparte en varios años como se observa en la Figura 25. En el último año la demanda es unas 5 veces y media superior a la inicial, lo que supondría un aumento de la conectividad por encima de los 100 Mbps. Si se analiza la

localización de las torres, se puede observar que en el último año todos los municipios importantes de la zona (Villasequilla de Yepes, Yepes y Huerta de Valdecarábanos) tienen un nodo de 5G a 3500 ya que son los lugares donde más se concentra la demanda. También, como es lógico a medida que va aumentando la demanda mayor número de nodos de telecomunicación son necesarios. Esto se ve reflejado en el aumento del OPEX anual.

Cabe destacar que los años donde hay un mayor aumento de la inversión (principalmente en CAPEX) son en los años 1, 2 y 9. En los dos primeros años se establece cómo va a ser el esquema de construcción y desmantelamiento los siguientes. Es decir, en los primeros años se optimiza la planificación y, en los siguientes, se construye o desinstala sobre esa planificación inicial. Además, en los primeros años la tasa de descuento no reduce tanto el valor al presente por lo que la inversión también es mucho mayor cuanto más cerca del presente está. No solo esto, sino que, en el segundo año, el tiempo de vida de los nodos iniciales se acaba (establecido en el año -5 inicialmente y son 7 años de tiempo de vida). Por ello, se puede empezar prácticamente desde cero la planificación de ese año. Por estos factores, hay una gran caída entre los años 2 y 3. Por último, en el año 9 este tiempo de vida de 7 años de casi todos los nodos vuelve a pasar por lo que es donde se realiza la mayor inversión tanto de desmantelamiento como de construcción.

También es importante destacar, observando la Figura 25, que el OPEX se mantiene en torno a los 200.000€ todos los años. Esto se explica porque aunque hay un aumento de nodos año a año para satisfacer la demanda, la tecnología pierde valor todos los años, por lo que el coste total se reduce.

Para terminar, es importante destacar que el coste de OPEX de una torre es un coste fijo para todos los años ya que se plantea un escenario en el que no se desmantelan las torres. Si se tuviera en cuenta el posible desmantelamiento de una torre, el coste se reduciría porque por ejemplo en el primer año (Figura 27) hay una torre que no se está utilizando o en el segundo año (Figura 28) hay dos que no están en uso. Por este motivo, el coste total sería menor en miles de euros, pero añadir esta condición aumentaba en gran medida el tiempo de ejecución

del modelo, por lo que se decidió no tenerlo en cuenta ya que en muchas ocasiones es mejor no desmantelar una torre para volver a construirla nuevamente.

8.1.2.2 Chañe

Tras ejecutar el modelo para la planificación celular en la zona de Chañe, se muestran los costes asociados a cada año en la siguiente tabla para su posterior descripción y análisis.

Año	CAPEX torres (k€)	OPEX torres(k€)	CAPEX nodos (k€)	OPEX nodos (k€)	Desmantelar (k€)	Total (k€)	Con TD* (k€)
1	0	350	35	47	62,5	494,50	494,50
2	0	343	181,3	53,9	25	603,20	563,74
3	0	336,14	0	52,82	0	388,96	339,73
4	0	329,42	51,76	64,94	0	446,12	364,16
5	0	322,83	0	63,64	0	386,47	294,84
6	0	316,37	31,63	70,5	0	418,50	298,39
7	0	310,04	39,86	78,82	0	428,72	285,68
8	0	303,84	78,12	89,39	4,55	475,90	296,37
9	0	297,77	204,18	99,53	26,41	627,89	365,44
10	0	291,81	50,02	109,21	0	451,04	245,34
11	0	285,98	89,87	118,46	6,53	500,84	254,60

12	0	280,26	88,17	138,51	0	506,94	240,84
Total	0	3767,46	849,91	986,72	124,99	5729,08	4043,62

Tabla 17. Costes asociados al despliegue de infraestructura en Chañe durante 12 años. Fuente: Elaboración Propia

*TD: Tasa de descuento

En el primer año, se observa que se desmantelan una gran cantidad de nodos debido a lo mismo que se comentaba en el apartado anterior. Esto es que hay mucho exceso de nodos en las mismas frecuencias porque hay varios competidores y operadores en la zona. Sin embargo, como nuestro modelo únicamente contempla el caso de un decisor centralizado que es el dueño de la infraestructura y suministra servicio para cubrir toda la demanda, se optimiza el despliegue retirando nodos en este primer año. Es por esto por lo que el coste de desmantelamiento es tan alto en este primer año y el coste de construcción consta solo de una torre 4G a 2600 MHz necesaria para satisfacer la demanda del mayor municipio que es Íscar. Por último, en este año, se mantienen varios nodos 3G debido a que son los más baratos en OPEX porque tienen menor complejidad de dispositivos y para una demanda baja como la inicial funcionan correctamente.

En el segundo año, como se acaba el tiempo de vida establecido para los nodos iniciales (fueron inicializados en el año -5), hay un gran coste de desmantelamiento. Además, el coste de CAPEX es elevado porque se instalan nuevos nodos, principalmente de 5G a frecuencias bajas (700 MHz), ya que son suficientes para satisfacer la demanda en este momento inicial. También, se instala un nodo 5G a 3500 MHz en Sanchonuño que es un pueblo con 1000 habitantes, pero está un tanto a la derecha en el mapa, por lo que lo más probable es que el nodo de 5G a 700 MHz no cubra esa zona.

En el tercer año, debido a la optimización realizada en los primeros no es necesario construir ningún nodo nuevo ni desmantelar ninguno antiguo, porque con los ya instalados se cubre el aumento de demanda. Ya en el cuarto año debido a que la demanda sigue aumentando, se

instala un nuevo nodo de 5G a 700 MHz. Resulta interesante que la mayoría de las instalaciones se realizan en 5G a 700 MHz pese a ser la instalación más cara y no la que mayor capacidad tiene. Esto se debe en gran medida a que su radio de cobertura es muy grande, lo cual es óptimo para entornos rurales. En el quinto año, la situación se mantiene igual que en el cuarto.

En el sexto año de inversión, la situación se mantiene bastante similar a las anteriores con la única diferencia de que se instala un nodo 4G a 2600 MHz en la zona de arriba a la izquierda del mapa que es la que tiene a los municipios de Íscar y Pedrajas de San Esteban, que suman un total de 10.000 habitantes juntos, por lo que es el lugar donde mayor inversión es necesaria. En este año la demanda ha crecido un 12% respecto al año anterior pero ya a partir del séptimo la demanda aumentará en un 18%, lo que se verá reflejado en futuras instalaciones. Al siguiente año, esta crecida se empieza a ver reflejada y se instala un nodo de 5G a 3500 MHz en Íscar, y se sigue sin desinstalar ningún nodo. En el octavo año, la crecida de demanda fuerza a que sea necesario instalar un nodo de 5G a 700 MHz en el centro del mapa. Además, en este año se cumplen 7 de la construcción del primer nodo de 4G en el año 1 por lo que debe ser desinstalado, aunque el modelo decide volver a construirlo.

En el año 9 se produce el mayor número de cambios debido a que todos los nodos instalados en el año 2 deben de ser al menos desinstalados y pueden ser reconstruidos si el modelo cree que es lo óptimo. Después de este desmantelamiento e instalación, la situación es muy parecida a la del año 8 pero con la diferencia de que se tiene un nodo más de 5G a 700 MHz. En este momento, se tendrían 5 nodos de 5G a 700 MHz demostrando que es la frecuencia y la tecnología más adecuada para llevar conectividades de alta velocidad a entornos rurales.

En el año 10, se instalan únicamente dos nodos de 4G a frecuencia de 1800 MHz para combatir la subida de la demanda en un 18% respecto al año anterior, uno arriba a la izquierda y otro abajo a la derecha. En el siguiente año, se debe tener en cuenta que se cumplen 7 años de la instalación de uno de los nodos 5G a 700 MHz, pero el modelo decide que lo óptimo es reconstruirlo y además construir otro nodo de 5G a 700 MHz. En este

momento, hay construidos 6 nodos 5G a 700 MHz, quedando claro que esta frecuencia es la óptima para entornos rurales pese a su precio más caro. Finalmente, en el último año, se construyen otros dos nodos de 5G a 700 MHz, siendo 8 en total.

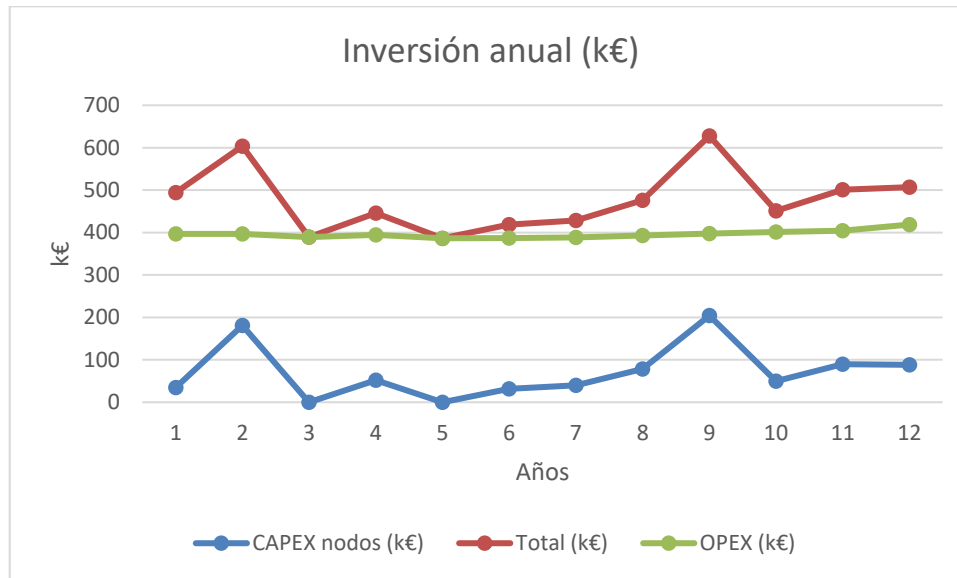


Figura 26. Representación de la variación del coste a lo largo de los 12 años en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, para un intervalo de inversión de 12 años, se obtiene un coste extraído del modelo de optimización de 4.043.620€ traídos a presente. Este coste es bastante más elevado que el obtenido para Villasequilla principalmente porque el área en el que se ha realizado el análisis es mayor que para el caso anterior y además cuenta con mayor número de habitantes, lo que supone mayor demanda. No solo por esto sino también porque en este caso se tenían más torres que estaban ya construidas desde el principio por lo que se ha tenido que pagar su OPEX durante los 12 años que supone un alto aumento en el coste teniendo en cuenta que cada OPEX son 35.000€ anuales. Además, si observamos las representaciones de la localización de las torres, hay muchos años en los que no se están utilizando algunas. Por lo tanto, si se hubiera incluido en el modelo habría habido un ahorro de costes importante. Sin embargo, por motivos de que el tiempo de ejecución era extremadamente elevado y porque el proceso de desmantelar una torre y reconstruirla es un proceso nada sencillo en la vida real, se decidió no incluirlo.

Haciendo un análisis del reparto de costes, se llegan a unas conclusiones similares a las del apartado anterior. Las mayores inversiones se hacen en los primeros años, debido a que se optimiza la situación inicial para que a partir de ahí se puedan ir tomando decisiones sobre si construir o desmantelar un nodo con el mínimo coste durante los próximos años. Los años donde más crecidas hay son el 2 y el 9 porque son los años donde se acaba el tiempo de la vida de las torres, que es 7 años, y se debe volver a construir nodos para satisfacer la demanda. Además, como la demanda crece, son necesarios más nodos, por lo que el gasto en OPEX de nodos crece cada año. Sin embargo, el OPEX total, representado en la Figura 26, se mantiene constante en torno a los 400.000€. Esto, de la misma manera que en el caso anterior, se debe a que el coste de las torres es cada vez menor debido a la depreciación anual de la tecnología asumida en el modelo. Por el otro lado, el CAPEX varía en función de si la demanda ha aumentado hasta un punto en el que con los nodos actuales no se puede cubrir y es necesario construir uno nuevo.

Por último, quitando el primer año donde se hace una eliminación de los nodos sobrantes y el segundo donde se cambia por completo la distribución de los nodos, durante el resto de los años no hay desmantelamientos, menos en el caso de que sean obligados. Esto da información de que el modelo tiene una visión temporal y organiza los nodos de una manera que se ajusten perfectamente a la demanda, sin invertir más de lo necesario en ningún momento.

8.1.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO

Una vez estudiadas las inversiones necesarias para aumentar la conectividad de los municipios evaluados, se va a hacer un análisis aplicando los datos del impacto social comentados en el Capítulo 6. Para ello, se va a analizar los dos municipios por separado, ya que cuentan con características diferentes.

8.1.3.1 Villasequilla de Yepes

Para el análisis del impacto que puede tener una conectividad de 100 Mbps, se toma como referencia inicial los datos actuales de Villasequilla recogidos en [63]. Villasequilla es un pueblo que tiene unas características propensas para crecer socioeconómicamente y ser

revitalizado. Se encuentra a únicamente 25 minutos en coche de Toledo, tiene una edad media alrededor de 43 años, más de 2000 habitantes y tiene varios centros educativos y hospitales cerca (lo cual provoca que se aproveche más el aumento de velocidad en la zona [7]). Sin embargo, la situación actual contrasta con lo que podría llegar a ser Villasequilla ya que el número de habitantes está decreciendo (30 habitantes menos que el año pasado) y tienen menos afiliados a la seguridad social que en 2022. Además, un dato sorprendente de Villasequilla es que el número de afiliados a la seguridad social es de 453 mientras que el número de declarantes es 1088. Esta diferencia se supone que es porque hay trabajadores que viven en Villasequilla, por lo que declaran en Villasequilla pero que trabajan fuera por lo que están dados de alta en la seguridad social fuera. Otro dato interesante es que el número de parados es 163, que es muy alto. Además, un poco menos de la mitad de los afiliados a la seguridad social son autónomos.

Tomando estos datos como referencia se va a realizar un análisis económico para estimar el crecimiento devenido de aumentar la conectividad. Viendo que Villasequilla es un municipio con buenas características, se asume que los porcentajes de crecimiento respecto a las variables crecimiento de población, reducción de la tasa de paro, aumento del salario y afiliaciones a la seguridad social, son un poco mayores que las medias presentadas en la Tabla 11. Para este caso se deduce que el crecimiento en renta media disponible será de un 2,5%, el crecimiento de población total será del 3%, la tasa de paro se reduce en un -1% y la afiliación a la seguridad social aumenta en un 5%.

En primer lugar, partimos del número de habitantes de Villasequilla que son 2563. Por lo tanto, si asumimos un crecimiento del 3% de la población, obtendríamos un total de 77 habitantes nuevos, que se asume que son familias de mediana edad por lo que establecemos que dos tercios son trabajadores y el otro tercio hijos, sabiendo que en España ahora el número de hijos por mujer es 1,24. Como aumenta el número de afiliados a la seguridad social en un 5%, eso quiere decir que hay 23 personas nuevas afiliadas a la seguridad social que antes no lo estaban. Además, la tasa paro disminuye en un 1%, lo que en el caso de Villasequilla pasaría de 168 a 164 pero teniendo en cuenta que aumenta el número de contribuyentes porque aumenta la población. Por último, la renta media disponible por

declarante era de 17.939€, pero al aumentar la conectividad se establece en 18.387€. Todos estos datos se reflejan en la siguiente tabla.

<i>Variable</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Antes</i>	<i>Después</i>	<i>Crecimiento</i>
Renta Media Disponible	100 Mbps	17.939 €	18.387 €	2,5%
Población Total	100 Mbps	2563	2640	3%
Tasa de Paro	100 Mbps	15,52%	14,52%	-1%
Afiliación Seguridad Social	100 Mbps	453	476	5%

Tabla 18. Datos referentes al crecimiento de Villasequilla. Fuente: Elaboración propia

Con estos datos y sabiendo que antes había 1088 declarantes podemos establecer un dato del aumento económico de la región al establecer una conectividad de 100 Mbps. Se ha pasado de un total de 1088 declarantes con una renta media disponible de 17.939€ a un total de 1139 declarantes con una renta media de 18.387€. El aumento económico por tanto es de **1.425.161€** en renta media disponible. Además, esto sería únicamente para Villasequilla de Yepes. Si extrapolamos este cálculo al resto de municipios importantes de la región en los que se ha hecho el análisis, se obtiene la siguiente tabla.

<i>Municipio</i>	<i>Renta media disponible (Antes)</i>	<i>Número de declaraciones (Antes)</i>	<i>Renta media disponible (Después)</i>	<i>Número de declaraciones (Después)</i>	<i>Crecimiento Económico</i>
Villasequilla de Yepes	17.939€	1088	18.387€	1139	1.425.161€
Yepes	16.908€	2294	17.330€	2400	2.805.048€

Huerta de Valdecarábanos	15.904€	724	16.301€	758	841.662€
Total					5.071.871€

Tabla 19. Crecimiento económico de la región de Yepes. Fuente: Elaboración propia

En resumidas cuentas, y de forma simplificada, una cota inferior de los beneficios socioeconómicos (BS) anuales asociados al despliegue de infraestructura TIC, de acuerdo con [7] podría calcularse según:

$$(DEC_{fin} * Renta_{fin}^{prom}) - (DEC_{ini} * Renta_{ini}^{prom}) = BS$$

Por clarificar, esa cantidad es un "beneficio de oportunidad", esto es, el nivel de impacto social positivo devenido de la inversión en infraestructura tras alcanzar un nivel de conectividad de 100 Mbps, frente al caso en el que dicha inversión no se acometiese. De acuerdo con [7], dicho nivel de beneficio se consigue aproximadamente dos años después de alcanzarse la velocidad de 100 Mbps, esto es, que existe un cierto desfase temporal desde que se alcanza la medida hasta que se produce la repotenciación de la región.

De acuerdo con el modelo planteado, dicho momento ocurre en el año 10, con lo que los beneficios asociados se producen de forma súbita al final del horizonte de ejecución, esto es, en el año 12 y sin considerar crecimientos progresivos en el nivel de renta promedio, o en el de la tasa de declarantes. Con el ánimo de considerar un escenario conservador en términos de beneficio social se puede considerar que dicha cantidad se mantiene constante desde ese momento en adelante.

De manera análoga, tras el horizonte de estudio, existen unos "costes de oportunidad" asociados a la inversión acometida, que se pueden representar de manera simplificada por el OPEX requerido por la infraestructura TIC al final del horizonte de ejecución.

$$OPEX_{y=12} = C$$

Tomando las cantidades BS y C como constantes desde el final del horizonte en adelante, se puede estimar el “beneficio neto de oportunidad ($BNO = BNO_y = BS_y - C_y$)”, obtenido de estudiar el flujo de caja durante periodo de longitud “vida útil” de los activos tras el fin del horizonte de ejecución del modelo, esto es, de los años 12 a 19 (momento a partir del cual se tendrían que reemplazar “necesariamente” los equipos). Dicho flujo de caja, el beneficio neto total (BNT) toma como valor la resta de “perpetuidades” en los años 13 y 19, esto es:

$$BNT = \frac{BNO_y}{r} * \left(\frac{1}{(1+r)^{12}} - \frac{1}{(1+r)^{18}} \right)$$

Siendo r la tasa de descuento considerada.

Así, BNT toma el valor de 10.264.757 €, muy superior a los del coste total de 2.345.940€ del despliegue y operación del sistema durante el horizonte bajo estudio. Al tratarse de un VNP cercano a 8M€, resulta socioeconómicamente rentable invertir en aumentar la conectividad a 100 Mbps. Por lo tanto, la diferencia entre el coste de inversión y el beneficio social es suficientemente grande para considerar rentable invertir en aumentar la conectividad en la zona de Villasequilla, ya que el impacto socioeconómico es claro.

8.1.3.2 Chañe

En este apartado se hará el mismo análisis que el anterior, pero para el municipio de Chañe. Para el análisis del impacto que puede tener una conectividad de 100 Mbps, se toma como referencia inicial los datos actuales de Chañe recogidos en [64]. Chañe, a diferencia de Villasequilla, no tiene las mejores condiciones para que la velocidad de 100 Mbps suponga un impacto tan diferencial como el anterior, pero tampoco tiene unas malas condiciones ya que la distancia a Segovia y a Valladolid es de 40 minutos en coche que no son los 25 de antes pero tampoco está mal. Además, su edad media es 45 años, lo que no está tan mal para un pueblo de únicamente 700 habitantes y tiene pueblos cerca como Íscar a solo 10 minutos en coche que tienen centros educativos. Además, como Chañe inicialmente es un municipio que no llega a ni a 30 Mbps de conectividad, se puede conseguir un gran aumento económico si se alcanzan velocidades de 100 Mbps.

La situación actual de Chañe es bastante desfavorable ya que desde 2010 su población no ha dejado de decrecer desde los 950 habitantes registrados en ese año y los afiliados a la seguridad social han caído en un 27% desde el año anterior. El paro en Chañe es muy bajo, solo de 8 personas.

Tomando estos datos como referencia se va a realizar un análisis económico para estimar el crecimiento devenido de aumentar la conectividad. Aunque Chañe no tiene las mejores características que afecten al desarrollo socioeconómico, sí que tiene mucha proyección de crecimiento debido a que no tiene velocidades de más de 30 Mbps. Por ello, se asume que los porcentajes de crecimiento respecto a las variables crecimiento de población, reducción del paro, aumento del salario y afiliaciones a la seguridad social, están alrededor de las medias presentadas en la Tabla 11. Para este caso se deduce que el crecimiento en renta media disponible será de un 1,4%, el crecimiento de población total será del 1,9%, la tasa de paro se reduce en un -0.7% y la afiliación a la seguridad social aumenta en un 3%.

En primer lugar, partimos del número de habitantes de Chañe que son 703. Por lo tanto, si asumimos un crecimiento del 1.9% de la población, obtendríamos un total de 14 habitantes nuevos, que se asume que son familias de mediana edad por lo que establecemos que dos tercios son trabajadores y el otro tercio hijos, sabiendo que en España ahora el número de hijos por mujer es 1,24. Como aumenta el número de afiliados a la seguridad social en un 3%, eso quiere decir que hay 11 personas nuevas afiliadas a la seguridad social que antes no lo estaban. Además, la tasa paro disminuye en un 0,7%, lo que en el caso de Chañe se pasaría de 8 a 6 personas, pero teniendo en cuenta que aumenta el número de contribuyentes porque aumenta la población. Por último, la renta media disponible por declarante era de 18.374 €, pero al aumentar la conectividad se establece en 18.632€. Todos estos datos se reflejan en la siguiente tabla.

<i>Variable</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Antes</i>	<i>Después</i>	<i>Crecimiento</i>
Renta Media Disponible	100 Mbps	18.374 €	18.632 €	1,4%

Población Total	100 Mbps	703	717	1.9%
Tasa de Paro	100 Mbps	2,45%	1,75%	-0.7%
Afiliación Seguridad Social	100 Mbps	355	366	3%

Tabla 20. Datos referentes al crecimiento de Chañe. Fuente: Elaboración propia

Con estos datos y sabiendo que antes había 355 declarantes podemos establecer un dato del aumento económico de la región al establecer una conectividad de 100 Mbps. Se ha pasado de un total de 355 declarantes con una renta media disponible de 18.374€ a un total de 366 declarantes con una renta media de 18.632€. El aumento económico por tanto es de **296.542€** en renta media disponible. Además, esto sería únicamente para Chañe, que es el cuarto pueblo más grande de la zona. Si tenemos en cuenta el crecimiento de Chañe y los otros 5 municipios más grandes de la zona analizada asumiendo que los municipios más grandes tienen un mayor crecimiento de población al aumentar la conectividad, se obtiene la siguiente tabla.

<i>Municipio</i>	<i>Renta media disponible (Antes)</i>	<i>Número de declaraciones (Antes)</i>	<i>Renta media disponible (Después)</i>	<i>Número de declaraciones (Después)</i>	<i>Crecimiento Económico</i>
Íscar	18.028€	2956	18.388€	3060	2.976.512€
Pedrajas de San Esteban	16.129€	1547	16.451€	1602	1.402.939€
Sanchonuño	18.679€	734	19.052€	763	826.290€
Chañe	18.374€	355	18.632€	366	296.542€

Gomezserracín	18.462€	294	18.720€	303	244.332€
Villaverde de Íscar	16.546€	237	16.777€	245	188.963€
Total					5.109.288€

Tabla 21. Crecimiento económico de la región de Chañe. Fuente: Elaboración propia

La situación de la región de Chañe, que se encuentra lejos de algunos lugares clave como estaciones de tren o ciudades grandes como Segovia o Valladolid, hacen que el impacto económico sea similar al de Villasequilla, siendo la zona de Chañe más grande y con más habitantes. Por esto último la inversión en infraestructura de telecomunicaciones para obtener velocidades de 100 Mbps en toda la región es más grande que para Villasequilla, 4.043.620€. De todas maneras, el impacto económico en la región sigue siendo elevado, llegando hasta los 5.109.288€. Sin embargo, aunque el impacto económico supere a la inversión realizada durante los últimos 12 años, la diferencia no es tan grande para asegurar que sea rentable el despliegue de redes de 100 Mbps en la región de Chañe. Es cierto que los resultados son positivos, pero las estimaciones y el modelo, aunque buscan acercarse lo más posible a la realidad, no son representaciones iguales al mundo real ya que en este aparecen muchas más complicaciones que las estimadas inicialmente. Por ello es por lo que se considera que, aunque tendría resultados extremadamente positivos la inversión en infraestructura en esta zona, no se puede asegurar al 100% que el aumento económico en la región sea mayor que la inversión realizada.

Siguiendo el procedimiento explicado en el caso estudio anterior para calcular el BNT y el VNP, esta última cantidad toma un valor de 5.9M€, con lo que el análisis de coste beneficio social sigue siendo favorable a la inversión en infraestructura TIC para generar un desarrollo socioeconómico positivo en la región.

Capítulo 9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto se ha propuesto un modelo matemático financiero que busca minimizar los costes de un despliegue celular en entornos rurales con el fin último de repotenciar socioeconómicamente estas regiones. El modelo tiene en cuenta factores de índole i) técnica (como el plan de red o la cobertura y capacidad aportada por cada tecnología y frecuencia de radiación), ii) financiera (como el CAPEX y el OPEX de los puntos de servicio), e iii) sociales (como el tráfico de datos de la región), y propone un despliegue de torres de telecomunicación en un escenario temporal para cubrir unas necesidades de cobertura y capacidad con mínimo coste. Este trabajo considera una inversión multianual en diferentes tecnologías y bandas de frecuencia, además de hacer una valoración del impacto social, siendo una aportación novedosa a la literatura relacionada.

Se ha llevado a cabo el proceso de modelado de manera transparente, tanto en su formulación como en su metodología de manejo de los datos de entrada. Esto se ha hecho con el propósito de hacer más accesibles las investigaciones futuras relacionadas con el problema en cuestión. La función objetivo del modelo propuesto consiste en la minimización de la suma de los costes de construcción, operación y desmantelamiento tanto de torres como de los nodos que permiten operar a una frecuencia y tecnología desde una perspectiva de un único jugador. Por tanto, las inversiones son las que realizaría un operador centralizado que conoce las necesidades individuales de demanda de datos móviles de los usuarios y realiza inversiones para satisfacerla eficazmente.

Además de esta minimización del coste de instalación obtenida del modelo, este proyecto analiza el impacto social en un entorno rural al obtener una cierta velocidad de conexión. Para ello, se ha realizado un análisis ad-hoc de dos municipios españoles con conectividades menores a 100 Mbps. El objetivo de estos estudios es, mediante el modelo, encontrar la solución que conlleve el mínimo coste tanto de construcción y operación y, además, evaluar el crecimiento económico de la región devenido del aumento de la conectividad a 100 Mbps. En esta línea, el modelo propuesto tiene cierto potencial en la evaluación del impacto social

ante la imposición de políticas regulatorias orientada a combatir la brecha digital entre entornos urbanos y rurales.

Tras evaluar el modelo mediante estos dos casos de estudio ad hoc, en el que se calculan los costes totales del modelo de inversión en TIC para los próximos años valorando el impacto social en una zona rural, se pueden desprender las siguientes conclusiones:

- Para lograr el objetivo de llevar conectividad de alta velocidad a entornos rurales donde la demanda está bastante dispersa, la inversión se debe centrar principalmente en bajas frecuencias, ya que son las que ofrecen mayores radios de cobertura. Puede resultar sorprendente que se escojan las bajas frecuencias siendo estas más caras debido al tamaño de los equipos y ofreciendo menor capacidad que las altas. Sin embargo, en entornos rurales se prioriza un mayor radio de cobertura sobre altas capacidades debido a que el número de habitantes es menor que en un entorno urbano y la demanda no está tan concentrada.
- Dentro de las bajas frecuencias, se ha llegado a la conclusión de que la banda que liderará la transición hacia mayores velocidades en entornos rurales es la de 700 MHz. Esto es debido a que en esta banda en España se opera 5G, que permite obtener mayores capacidades que el 4G que opera en la banda de 800 MHz. Como es lógico, si la banda de 700 MHz ofrece mayores capacidades y mayor cobertura que la de 800 MHz, tendrá un mayor coste asociado. De todas maneras, el modelo considera que compensa pagar más a largo plazo e invertir en la banda de 5G a 700 MHz.
- En municipios más poblados (alrededor de más de 1000 habitantes) será necesario invertir en bandas de frecuencia superiores ya que, en estos lugares, la demanda está más concentrada y no es tan rentable apoyarse en bajas frecuencias. Para estos casos, y con el objetivo de alcanzar velocidades superiores a 100 Mbps, el modelo decide que las mejores opciones son o bien la banda de 4G a 2600 MHz o bien la de 5G a 3500 MHz. En función del número de habitantes y el nivel de demanda, será óptimo elegir una o la otra, siendo la de 5G a 3500 MHz la que mayor capacidad ofrece a costa de tener menor radio de cobertura.

- El coste de despliegue de infraestructura necesaria para alcanzar velocidades de 100 Mbps depende de la localización de los municipios y de cómo esté distribuida la demanda. Por ello es importante tener en cuenta la representación topográfica del terreno.
- Para realizar una estimación del coste del despliegue es necesario valorar un escenario multianual en el que no solo se tiene en cuenta el CAPEX sino también el OPEX anual y los desmantelamientos después de que termine el tiempo de vida. Este coste puede llegar a ser elevado y más si los análisis se realizan en zonas de más de 140 kilómetros cuadrados, como las de los casos de estudio de este trabajo. Además, generalmente este coste no puede ser asumido únicamente por los operadores porque no existe rentabilidad, por lo que sería necesario una coinversión pública y privada.
- Pese a que el coste puede llegar a ser elevado el impacto económico también. Es necesario valorar el crecimiento económico de la región después del despliegue realizado, ya que se ha mostrado que en diversas ocasiones las cifras del crecimiento socioeconómico de la población son superior a la inversión realizada. Por lo tanto, aunque desde el punto de vista del operador no es rentable invertir, se considera que a nivel socioeconómico sí lo es porque se va a generar más riqueza de la invertida. Por ello, es necesario que existan iniciativas que fomenten la inversión.
- Por último, es importante tener en consideración que hay casos como el de Villasequilla de Yepes que son más propensos a que, por las características de la localización, el impacto socioeconómico sea mayor. Por lo tanto, aunque generalmente el impacto socioeconómico es bastante grande, es importante realizar un análisis detallado de cada caso.

Futuros trabajos de desarrollo se orientarán a:

1. Considerar más jugadores en el escenario de inversión. En este caso, existirán nuevas variables de salidas como la compra de un emplazamiento o la posibilidad de compartir emplazamiento con otros operadores. En este caso, se considerará también que la demanda está fraccionada.

2. Inclusión de un modelo de fibra. En este trabajo se ha considerado únicamente la localización de las torres de telecomunicación y se ha tenido en cuenta el coste de la fibra, pero sin tener en cuenta la topología de la red ni de qué manera se podría optimizar. Sería muy interesante establecer un modelo para el backbone de fibra de las torres de telecomunicación. Además, se podría desarrollar un modelo FTTH (Fiber To The Home) para llevar fibra óptica a los hogares y compararlo con el planteado en este trabajo para llegar a la conclusión de cuál ofrece mayores velocidades y cuál es más rentable.
3. Uso de técnicas heurísticas para reducir la complejidad del modelo. El modelo planteado en este trabajo, debido al gran número de variables binarias resulta muy complejo si se añaden cada vez más salidas. Por ello, sería interesante estudiar diferentes técnicas heurísticas que permitan alcanzar soluciones aproximadas para que el modelo converja antes y que se pueda expandir a geografías de mayor extensión.
4. Modelo de predicción de demanda. La demanda establecida para este trabajo ha sido extraída de análisis y se han realizado una serie de estimaciones. Sin embargo, se podría desarrollar un modelo de machine learning que tenga como objetivo predecir la demanda de datos en un área para los próximos años.
5. Desarrollo de una aplicación en la nube. Sería muy práctico que esta herramienta se pudiera usar como un SaaS (Software as a Service) en la nube donde cada cliente introduce las coordenadas de dónde le gustaría que se realizara el despliegue y devolviera el resultado.

Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ‘Latest Work-at-Home/Telecommuting/Remote Work Statistics’, *Global Workplace Analytics*. <https://globalworkplaceanalytics.com/telecommuting-statistics> (accessed May 19, 2023).
- [2] A. Eira, ‘54 Basic Video and Web Conferencing Statistics: 2021 Analysis of Data & Market Share’, *Financesonline.com*, Sep. 06, 2019. <https://financesonline.com/video-web-conferencing-statistics/> (accessed May 19, 2023).
- [3] ‘Netflix - Financials - Quarterly Earnings’. <https://ir.netflix.net/financials/quarterly-earnings/default.aspx> (accessed May 19, 2023).
- [4] A. Rey-Alvite and J. M. Fernandez-Crehuet, ‘Smart Rural: current status of the intelligent, technological, social and sustainable rural development in the European Union’, *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, vol. 34, no. 2, pp. 136–158, Apr. 2021, doi: 10.1080/13511610.2020.1760798.
- [5] ‘Cellnex explora alternativas para las zonas blancas y grises en Europa’, Apr. 08, 2022. <https://www.larazon.es/medio-ambiente/20220408/tnolghnqrem5pihcp4mewe4pa.html> (accessed May 29, 2023).
- [6] ‘La Moncloa. Actividad [Presidente/Actividad]’. <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Paginas/index.aspx> (accessed May 19, 2023).
- [7] J. A. López Muñoz, ‘El impacto de la agenda digital en la España Rural’, 2021, Accessed: Dec. 16, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/66167>
- [8] S. Kamarudin, S. Z. Omar, J. Bolong, M. N. Osman, and M. Mahamed, ‘ICT Development of Community in Rural Areas’, *IJARBSS*, vol. 9, no. 9, p. Pages 118-126, Sep. 2019, doi: 10.6007/IJARBSS/v9-i9/6273.
- [9] A. Mathur and D. Ambani, ‘ICT and rural societies: Opportunities for growth’, *International Information & Library Review*, vol. 37, no. 4, pp. 345–351, Dec. 2005, doi: 10.1080/10572317.2005.10762692.
- [10] N. R. Jere, M. Thinyane, T. Boikhutso, and N. Ndlovu, ‘An assessment of ICT challenges in rural areas: ICT experts vs rural users views: a case of the Siyakhula Living Lab’, in *Proceedings of the South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists Conference*, East London South Africa: ACM, Oct. 2013, pp. 233–241. doi: 10.1145/2513456.2513496.
- [11] ‘Conectividad | Configurar el futuro digital de Europa’. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policias/connectivity> (accessed May 19, 2023).
- [12] M. C. Ovando Chico, ‘Aplicación del análisis tecno-económico al despliegue de LTE en zonas rurales de España en la banda de 800MHz’, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2015. doi: 10.20868/UPM.thesis.33727.
- [13] Z. Frías Barroso, ‘Análisis prospectivo del despliegue de redes de comunicaciones móviles LTE en nuevas bandas de frecuencia mediante el desarrollo de modelos

- tecnoeconómicos’, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2016. doi: 10.20868/UPM.thesis.40157.
- [14] Z. Fluhr and E. Nussbaum, ‘Switching Plan for a Cellular Mobile Telephone System’, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 21, no. 11, pp. 1281–1286, Nov. 1973, doi: 10.1109/TCOM.1973.1091569.
- [15] S. T. S. Chia, ‘Design and optimisation for cellular access network’, *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 8, no. 6, pp. 269–277, Dec. 1996, doi: 10.1049/ecej:19960603.
- [16] A. Taufique, M. Jaber, A. Imran, Z. Dawy, and E. Yacoub, ‘Planning Wireless Cellular Networks of Future: Outlook, Challenges and Opportunities’, *IEEE Access*, vol. 5, pp. 4821–4845, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2680318.
- [17] E. Amaldi, A. Capone, F. Malucelli, and C. Mannino, ‘Optimization Problems and Models for Planning Cellular Networks’, in *Handbook of Optimization in Telecommunications*, M. G. C. Resende and P. M. Pardalos, Eds., Boston, MA: Springer US, 2006, pp. 917–939. doi: 10.1007/978-0-387-30165-5_32.
- [18] L. Hu, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, O. Klein, and W. Stormer, ‘Optimal New Site Deployment Algorithm for Heterogeneous Cellular Networks’, in *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, San Francisco, CA, USA: IEEE, Sep. 2011, pp. 1–5. doi: 10.1109/VETEFCF.2011.6092846.
- [19] F. Gu, H. Liu, and M. Li, ‘Evolutionary Algorithm for the Radio Planning and Coverage Optimization of 3G Cellular Networks’, in *2009 International Conference on Computational Intelligence and Security*, Beijing, China: IEEE, 2009, pp. 109–113. doi: 10.1109/CIS.2009.240.
- [20] R. K. Taplin, D. M. Ryan, S. M. Allen, S. Hurley, and N. J. Thomas, ‘Algorithms for the Automatic Design of WiMAX networks’, in *The 2007 International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST 2007)*, Cardiff, UK: IEEE, Sep. 2007, pp. 322–327. doi: 10.1109/NGMAST.2007.4343440.
- [21] baobab, ‘Webinar: Planificación eficiente de red celular móvil.’, *baobab soluciones*, Feb. 07, 2020. <https://baobabsoluciones.es/blog/2020/02/07/webinar-planificacion-eficiente-de-red-celular-movil/> (accessed Dec. 16, 2022).
- [22] L. Chiaraviglio, C. Di Paolo, and N. Blefari-Melazzi, ‘5G Network Planning under Service and EMF Constraints: Formulation and Solutions’, 2020, doi: 10.48550/ARXIV.2007.16073.
- [23] O. Bondarenko, D. Ageyev, and O. Mohammed, ‘Optimization Model for 5G Network Planning’, in *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine: IEEE, Feb. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/CADSM.2019.8779298.
- [24] A. M. C. A. Koster, M. Kutschka, and C. Raack, ‘Towards robust network design using integer linear programming techniques’, in *6th EURO-NGI Conference on Next Generation Internet*, Paris, France: IEEE, Jun. 2010, pp. 1–8. doi: 10.1109/NGI.2010.5534462.
- [25] J. Gandhi and Z. Narmawala, ‘Coverage, Capacity and Cost Analysis of 4G-LTE and 5G Networks: A Case Study of Ahmedabad and Gandhinagar’, in *Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies*, P. K. Singh, S. T. Wierchoń, J. K. Chhabra,

- and S. Tanwar, Eds., in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 936. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 25–38. doi: 10.1007/978-981-19-5037-7_3.
- [26] ‘Standard Pricing – AMPL’. <https://ampl.com/standard-pricing/> (accessed Jun. 04, 2023).
- [27] ‘Comparar todos los planes de Microsoft 365 | Microsoft’. <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/business/compare-all-microsoft-365-business-products> (accessed Jun. 04, 2023).
- [28] ‘Cómo gestionar los activos de telecomunicaciones’, *Minsait*, Apr. 21, 2021. <https://www.minsait.com/es/actualidad/insights/como-gestionar-los-activos-de-telecomunicaciones> (accessed May 19, 2023).
- [29] ‘AntenasGSM.com’, *AntenasGSM.com*. <https://antenasgsm.com/> (accessed May 25, 2023).
- [30] ‘Niveles de Exposición’. <https://geoportal.minetur.gob.es/VCTEL/vcne.do> (accessed May 25, 2023).
- [31] ‘BOE-A-2022-10757 Ley 11/2022, de 28 de junio, General de Telecomunicaciones.’ <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-10757> (accessed May 25, 2023).
- [32] ‘COMPARTIR INFRAESTRUCTURAS’. <https://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2008&issue=02&ipage=sharingInfrastructure-mobile> (accessed May 25, 2023).
- [33] ‘Curso: Radiación y Propagación [DEA-GITT-314] (2021-2022)’. <https://sifo.comillas.edu/course/view.php?id=34858#section-2> (accessed May 25, 2023).
- [34] ‘¿Qué es dBm y por qué es importante para tu señal móvil?’ <https://www.myamplifiers.com/es/articles/que-es-dbm-344/> (accessed May 25, 2023).
- [35] ‘Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital - Digitalización e Inteligencia Artificial - Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales’. <https://avancedigital.mineco.gob.es/es-es/Paginas/index.aspx> (accessed May 25, 2023).
- [36] ‘Vision 2030: Low-Band Spectrum for 5G’, *Spectrum*. <https://www.gsma.com/spectrum/resources/5g-low-band-spectrum/> (accessed May 28, 2023).
- [37] A. Simmons, ‘Cell Tower Range: How Far Do They Reach?’, *Dgtl Infra*, Oct. 06, 2022. <https://dgtlinfra.com/cell-tower-range-how-far-reach/> (accessed May 25, 2023).
- [38] ‘Curso: Teoría de la Comunicación [DEA-GITT-225] (2020-2021)’. <https://sifo.comillas.edu/course/view.php?id=31716#section-4> (accessed May 26, 2023).
- [39] ‘Curso: Conmutación y Transmisión [DTC-GITT-411]’. <https://sifo.comillas.edu/course/view.php?id=39727#section-3> (accessed May 26, 2023).
- [40] ‘Frecuencias y bandas 2G, 3G, 4G y 5G en España - operadores móviles’, *ADSLZone*. <https://www.adslzone.net/operadores/en-detalle/frecuencias-moviles-espana/> (accessed May 26, 2023).
- [41] C. Blog, ‘El tráfico de datos móviles creció más de un 40% el año pasado’, *CNMC Blog*, Aug. 30, 2022. <https://blog.cnmc.es/2022/08/30/el-trafico-de-datos-moviles-crecio-mas-de-un-40-el-ano-pasado/> (accessed May 26, 2023).

- [42] ‘Mobile data traffic forecast – Mobility Report’. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast> (accessed May 26, 2023).
- [43] ‘How Much Does it Cost to Build a Cell Tower? - Dgtl Infra’. <https://dgtlinfra.com/how-much-does-it-cost-to-build-a-cell-tower/> (accessed May 29, 2023).
- [44] ‘España, entre los países más baratos para vivir de Europa’, *Expansión.com*, Apr. 01, 2017. <https://www.expansion.com/economia/2017/04/01/58d8f3dee5fdea2c668b456b.html> (accessed May 29, 2023).
- [45] ‘Cell Tower Lease Rates In 2023 - Steel In The Air’. <https://www.steelintheair.com/cell-tower-lease-rates/> (accessed May 29, 2023).
- [46] ‘What are key considerations for 5G sites?’, *Analysys Mason*, Oct. 02, 2019. <https://www.analysismason.com/research/content/perspectives/5g-key-considerations-rma18/> (accessed May 29, 2023).
- [47] ‘(14) Tower Companies, 5G and OPEX | LinkedIn’. <https://www.linkedin.com/pulse/tower-companies-5g-opex-osvaldo-coelho/> (accessed May 29, 2023).
- [48] D. Wisely, N. Wang, and R. Tafazolli, ‘Capacity and costs for 5G networks in dense urban areas’, *IET Communications*, vol. 12, no. 19, pp. 2502–2510, Dec. 2018, doi: 10.1049/iet-com.2018.5505.
- [49] N. A. M. DANO, E. Director, 5G, and M. Strategies 4/28/2021, ‘Here’s how much a 5G wireless network really costs’, *Light Reading*. <https://www.lightreading.com/open-ran/heres-how-much-5g-wireless-network-really-costs/d/d-id/769114> (accessed May 30, 2023).
- [50] V. Nikolikj and T. Janevski, ‘A Cost Modeling of High-capacity LTE-advanced and IEEE 802.11ac based Heterogeneous Networks, Deployed in the 700MHz, 2.6GHz and 5GHz Bands’, *Procedia Computer Science*, vol. 40, pp. 49–56, 2014, doi: 10.1016/j.procs.2014.10.030.
- [51] Z. Frias and J. Pérez, ‘Techno-economic analysis of femtocell deployment in long-term evolution networks’, *J Wireless Com Network*, vol. 2012, no. 1, p. 288, Dec. 2012, doi: 10.1186/1687-1499-2012-288.
- [52] ‘Indosat plans capex cut after 3G shutdown - MWC Barcelona 2023 Dailies’. <https://mobileinsights.mobileworldlive.com/mwc-barcelona-2023-dailies/indosat-plans-capex-cut-after-3g-shutdown> (accessed May 30, 2023).
- [53] ‘3G networks are shutting down next year. Here’s what you should know.’, *Washington Post*, Sep. 30, 2021. <https://www.washingtonpost.com/technology/2021/09/30/3g-networks-ending/> (accessed May 30, 2023).
- [54] ‘Plan Ahead for Phase Out of 3G Cellular Networks and Service | Federal Communications Commission’. <https://www.fcc.gov/consumers/guides/plan-ahead-phase-out-3g-cellular-networks-and-service> (accessed May 30, 2023).
- [55] ‘Cell Site Power Consumption – WirelessMoves’, Aug. 14, 2019. <https://blog.wirelessmoves.com/2019/08/cell-site-power-consumption.html> (accessed May 29, 2023).

- [56] ‘5G is Not the Answer For Rural Broadband’. <https://www.bbcmag.com/rural-broadband/5g-is-not-the-answer-for-rural-broadband> (accessed May 29, 2023).
- [57] ‘Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital - 2022’. <https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/zonas-blancas-NGA/Paginas/2022.aspx> (accessed May 27, 2023).
- [58] L. Townsend, A. Sathiaseelan, G. Fairhurst, and C. Wallace, ‘Enhanced broadband access as a solution to the social and economic problems of the rural digital divide’, *Local Economy*, vol. 28, no. 6, pp. 580–595, Sep. 2013, doi: 10.1177/0269094213496974.
- [59] V. Krizanovic Cik, D. Zagar, and K. Grgic, ‘A framework for optimal techno-economic assessment of broadband access solutions and digital inclusion of rural population in global information society’, *Univ Access Inf Soc*, vol. 17, no. 3, pp. 517–540, Aug. 2018, doi: 10.1007/s10209-017-0560-x.
- [60] R. Gamon and R. Conde, ‘El desarraigo cultural, efecto de la despoblación en Castilla-La Mancha’, *Monograma Revista Iberoamericana de Cultura y Pensamiento*, pp. 219–229, Mar. 2020, doi: 10.36008/monograma.201.06.1722.
- [61] ‘¿Cuál sería una buena velocidad de Internet? Clasificaciones de velocidades de Internet’, *verizon.com*. <https://espanol.verizon.com/articles/internet-speed-classifications/> (accessed Jun. 01, 2023).
- [62] ‘Mbps: ¿qué es y cuántos necesito para conectarme a Internet?’, *Kelisto*. <https://www.kelisto.es/internet/consejos-y-analisis/mbps-que-es-y-cuantos-necesito-para-conectarme-a-internet> (accessed Jun. 01, 2023).
- [63] ‘Habitantes Villasequilla 1900-2022’. <https://www.foro-ciudad.com/toledo/villasequilla/habitantes.html> (accessed Jun. 02, 2023).
- [64] ‘Habitantes Chañe 1900-2022’. <https://www.foro-ciudad.com/segovia/chane/habitantes.html> (accessed Jun. 02, 2023).

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

Este proyecto se puede emplear para analizar políticas regulatorias como las propuestas en el marco de la Agenda Digital Europea e integrar en estudios intersectoriales, como el de la energía, lo que supone una contribución relevante a los ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y 11 (Ciudades y Comunidades Sostenible).

En el marco del ODS 7, existen diferentes ámbitos en los que las telecomunicaciones juegan un papel clave en la explotación de sinergias con la infraestructura de generación y consumo de energía. Algunas de estas aplicaciones aparecen en la convergencia entre las telecomunicaciones y el sector de la energía como pueden ser las Smart Grids o las comunidades de energía. En estas aplicaciones, la infraestructura de las TIC puede proporcionar una vía acelerada para el despliegue generalizado, distribuido e intermitente de los sistemas de energía renovable, al tiempo que proporciona señales para mejorar la eficiencia energética (a través de información en tiempo real sobre el precio o la congestión de la red).

En el marco del ODS 9, las telecomunicaciones y más concretamente el 5G juega un papel fundamental en aplicaciones dentro de la tecnología IoT. Actualmente, es habitual encontrar el prefijo “Smart” delante de muchos ecosistemas (Smart roads, Smart Factories, Smart Cities, etc.). Este prefijo “Smart”, hace referencia a sistemas inteligentes en los que cada una de sus partes están comunicadas entre ellas. Por ejemplo, si en una fábrica falla una máquina, automáticamente se informa al resto de máquinas para que redirijan el proceso de fabricación evitando pasar por la que acaba de romperse y se envía un mensaje al técnico para que vaya a revisarla. Todo esto es posible porque tienen sensores (IoT) que recogen información del

estado de cada una de las partes del sistema y se envía dicha información entre sistemas o al exterior a través de redes de telecomunicación de alta velocidad.

Por último, en referencia al ODS 11, uno de los objetivos de este trabajo es contribuir a cerrar la brecha digital entre los entornos rurales y los entornos urbanos. Esto supondrá, que un mayor número de personas considere permanecer en (o incluso migrar a) contextos rurales, lo que podría contribuir a mitigar la despoblación rural en muchas regiones del territorio nacional español (así como en otras geografías). Además, con la mejora de las telecomunicaciones, el nivel de vida será mayor y podría llegar a lograrse cierta repotenciación socioeconómica de la región.

ANEXO II: CÓDIGO DEL MODELO

El código del modelo se puede poner a disposición de cualquier lector interesado en emplearlo con motivos académicos, esto es, siempre que no sea para realizar usos comerciales.

Para recibir un enlace de acceso a la carpeta del repositorio del proyecto en GitHub, póngase en contacto con Pablo Menéndez a través del correo pablomenendez@idestadvisory.com.

ANEXO III: REPRESENTACIÓN TEMPORAL DEL DESPLIEGUE DE TELECOMUNICACIONES EN LA ZONA DE VILLASEQUILLA DE YEPES

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Color</i>
5G	700 MHz	Morado
4G	800 MHz	Rojo
3G	900 MHz	Verde
4G	1800 MHz	Azul Grande
3G	2100 MHz	Naranja
4G	2600 MHz	Amarillo
5G	3500 MHz	Rosa
Emplazamientos libres	-	Azul Pequeño
Cubierto al 100%	Parcela	Blanca
Cubierto más del 50%	Parcela	Roja

Tabla 22. Colores utilizados para la representación. Fuente: Elaboración Propia

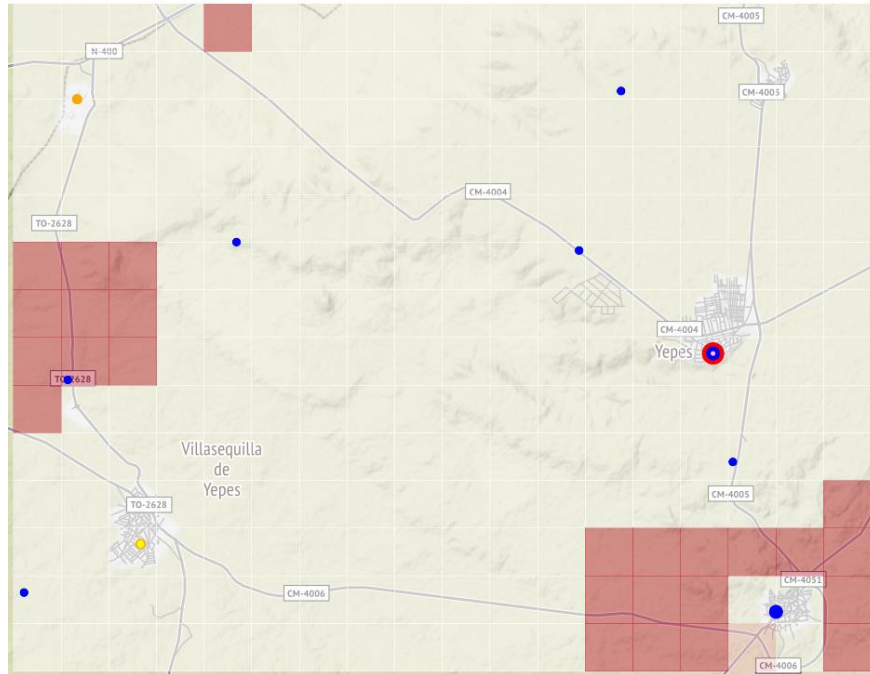


Figura 27. Año 1 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

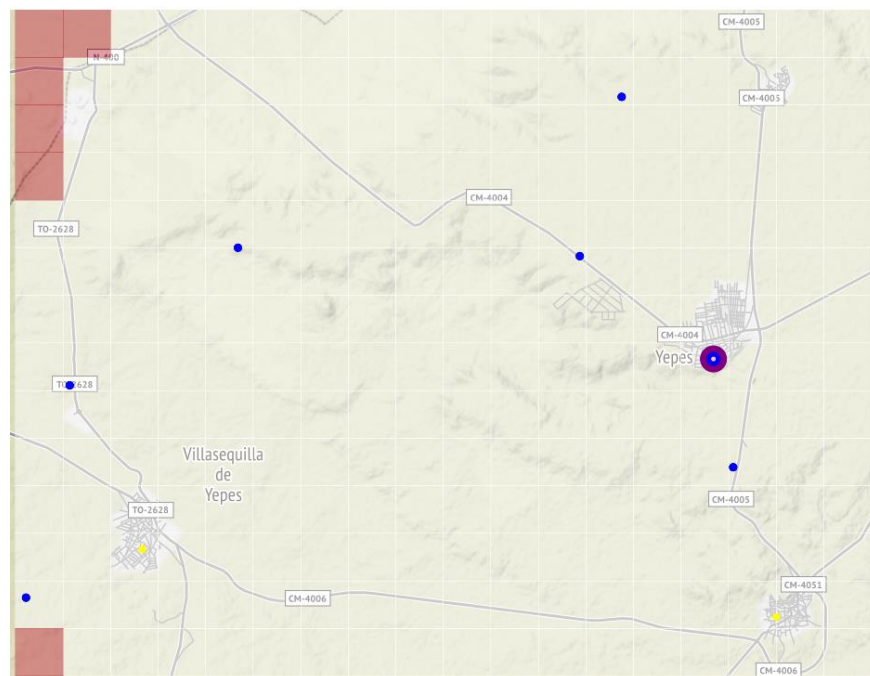


Figura 28. Año 2 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

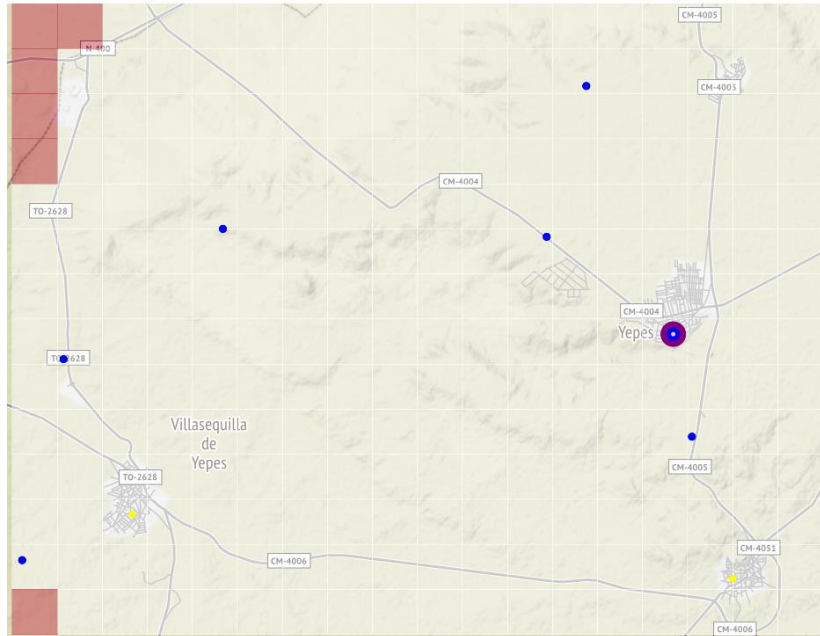


Figura 29. Año 3 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

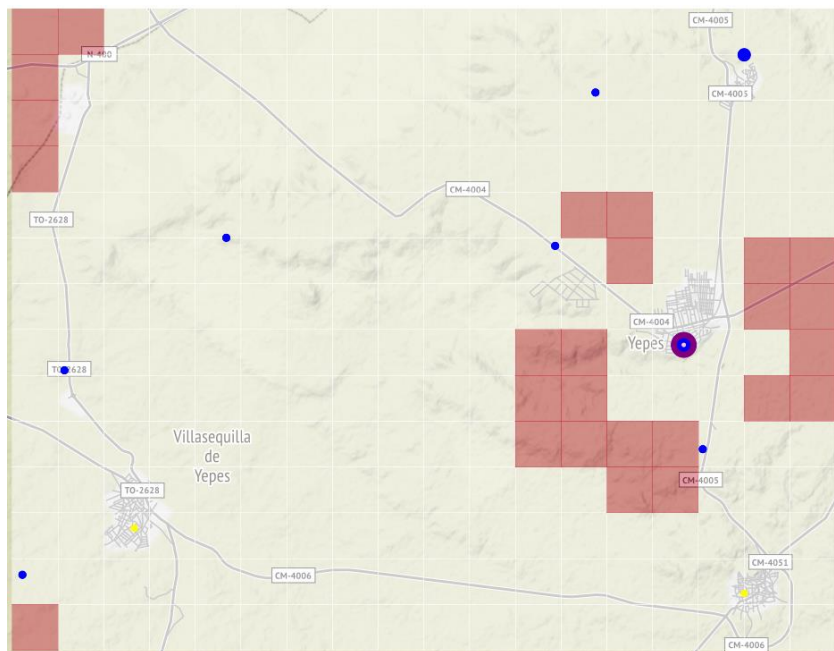


Figura 30. Año 4 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

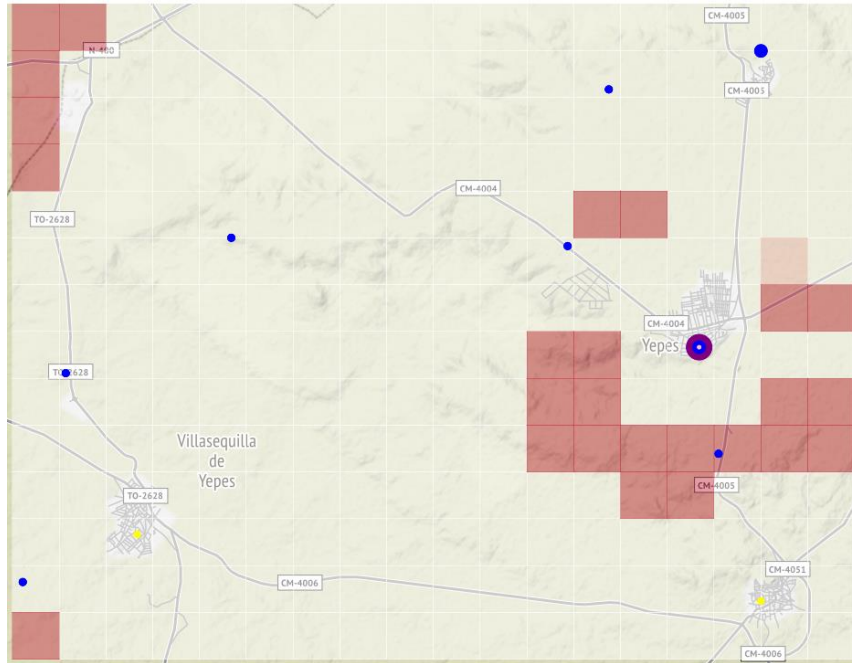


Figura 31. Año 5 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

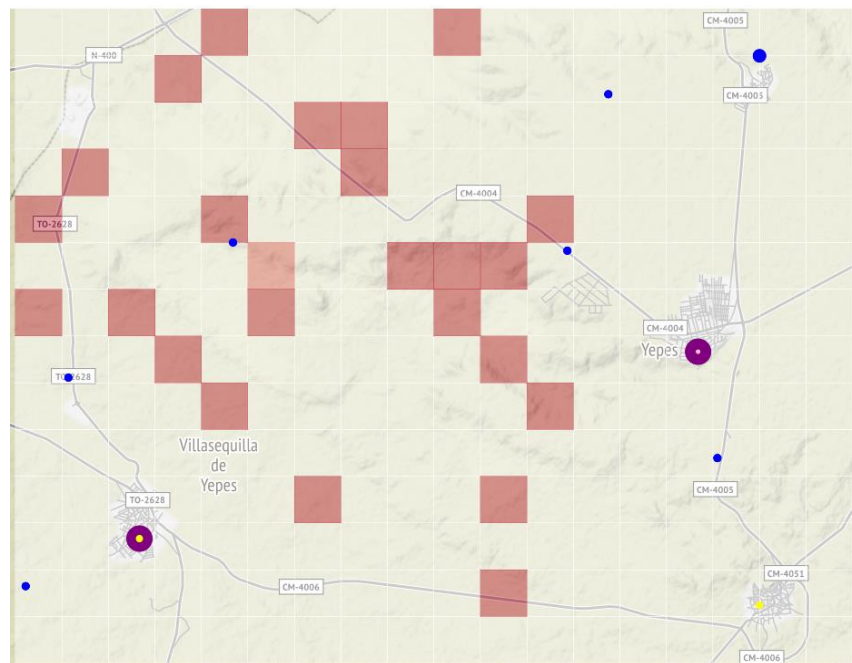


Figura 32. Año 6 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

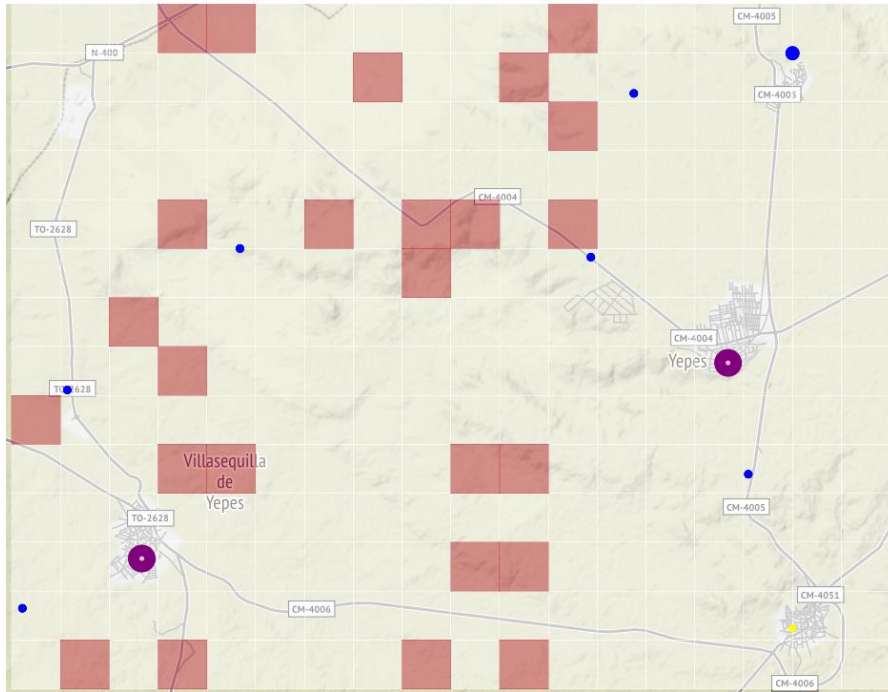


Figura 33. Año 7 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

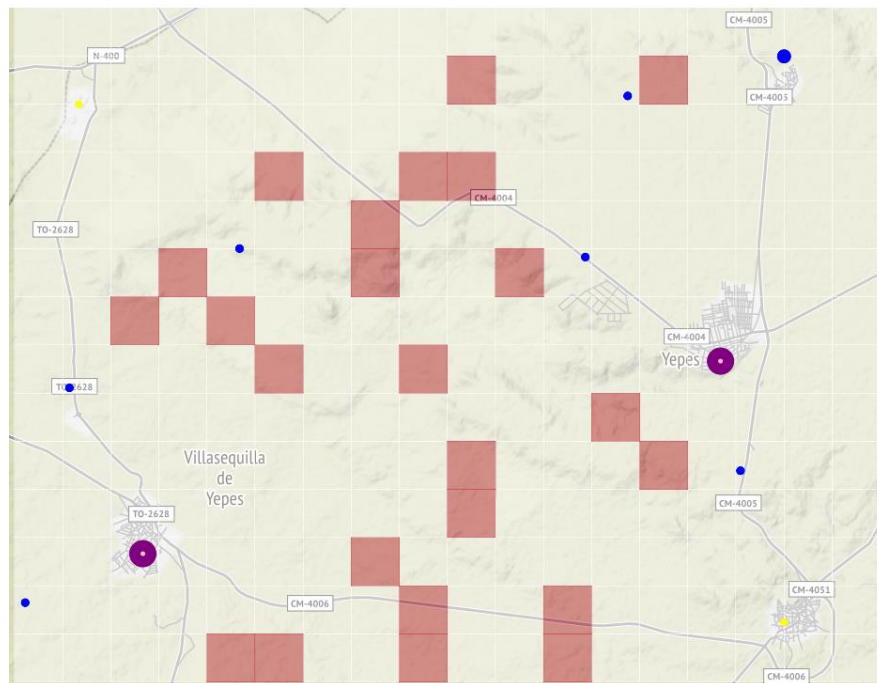


Figura 34. Año 8 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

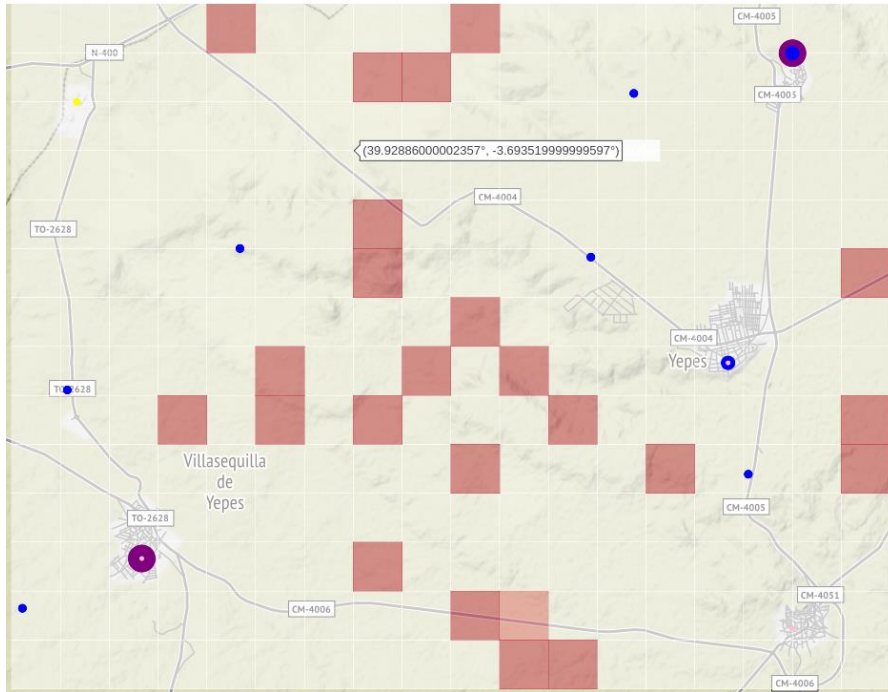


Figura 35. Año 9 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

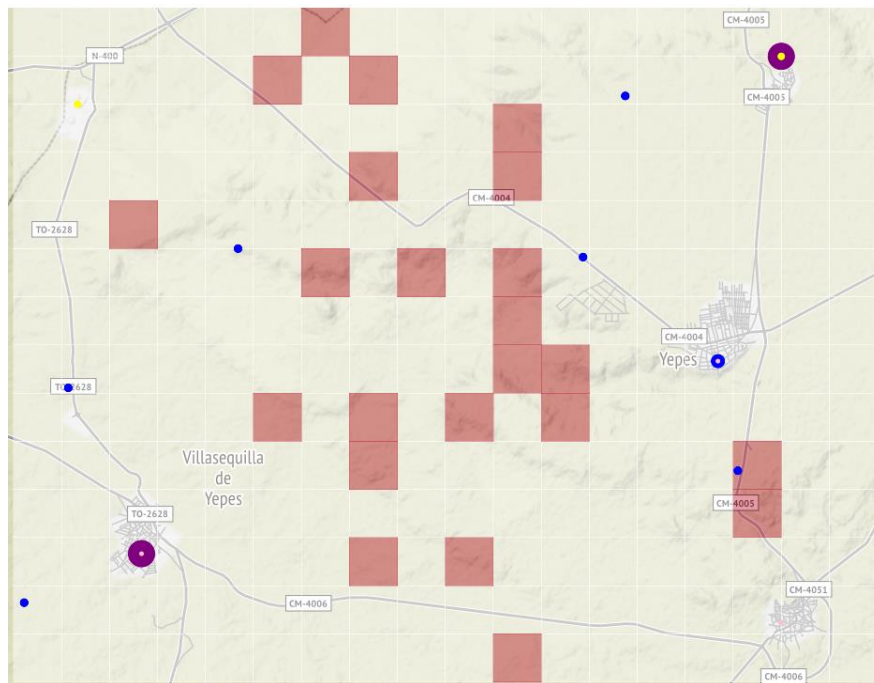


Figura 36. Año 10 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

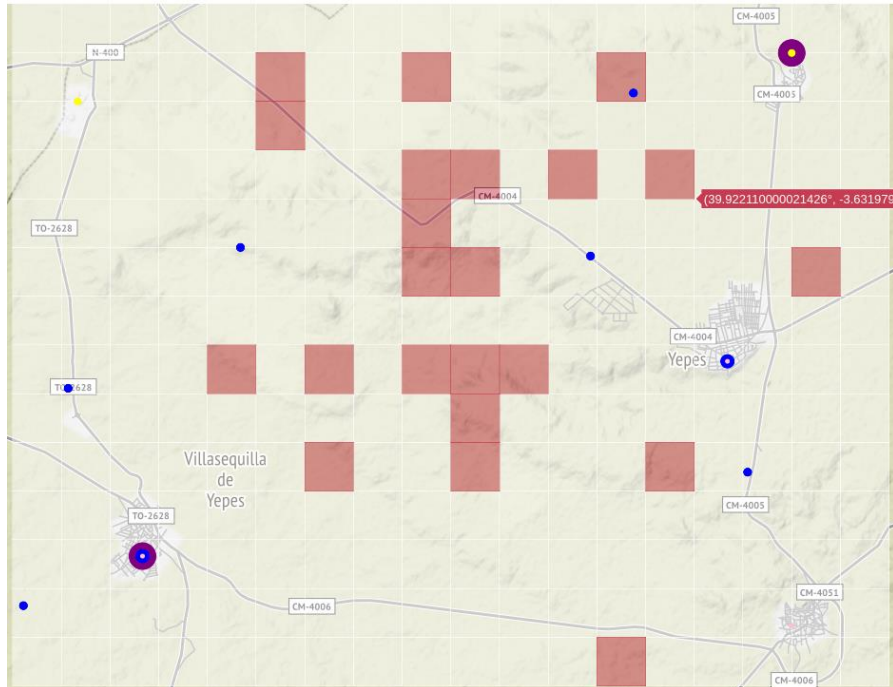


Figura 37. Año 11 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

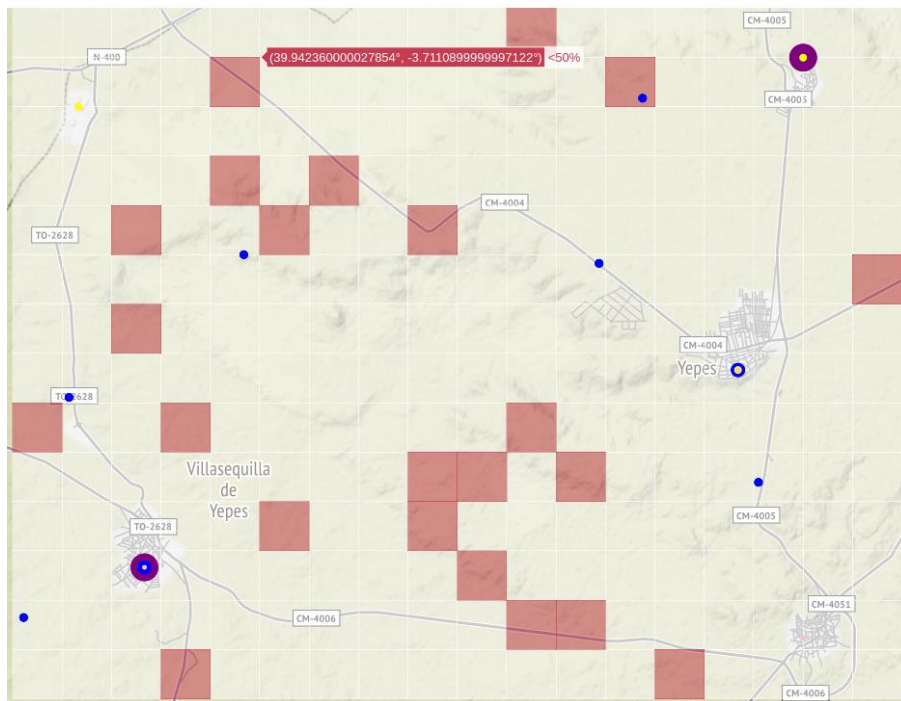


Figura 38. Año 12 del despliegue en Villasequilla de Yepes. Fuente: Elaboración Propia

ANEXO IV: REPRESENTACIÓN TEMPORAL DEL DESPLIEGUE DE TELECOMUNICACIONES EN LA ZONA DE CHAÑE

<i>Tecnología</i>	<i>Banda</i>	<i>Color</i>
5G	700 MHz	Morado
4G	800 MHz	Rojo
3G	900 MHz	Verde
4G	1800 MHz	Azul Grande
3G	2100 MHz	Naranja
4G	2600 MHz	Amarillo
5G	3500 MHz	Rosa
Emplazamientos libres	-	Azul Pequeño
Cubierto al 100%	Parcela	Blanca
Cubierto más del 50%	Parcela	Roja

Tabla 23. Colores utilizados para la representación. Fuente: Elaboración Propia

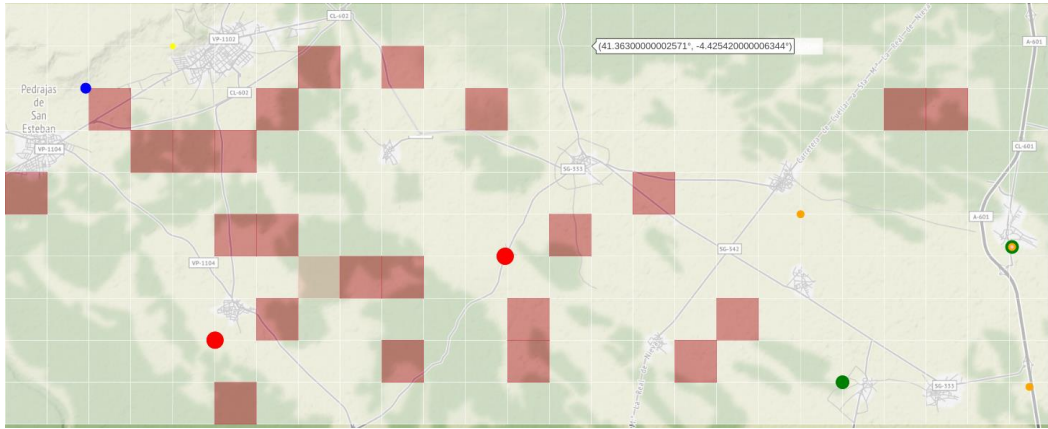


Figura 39. Año 1 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

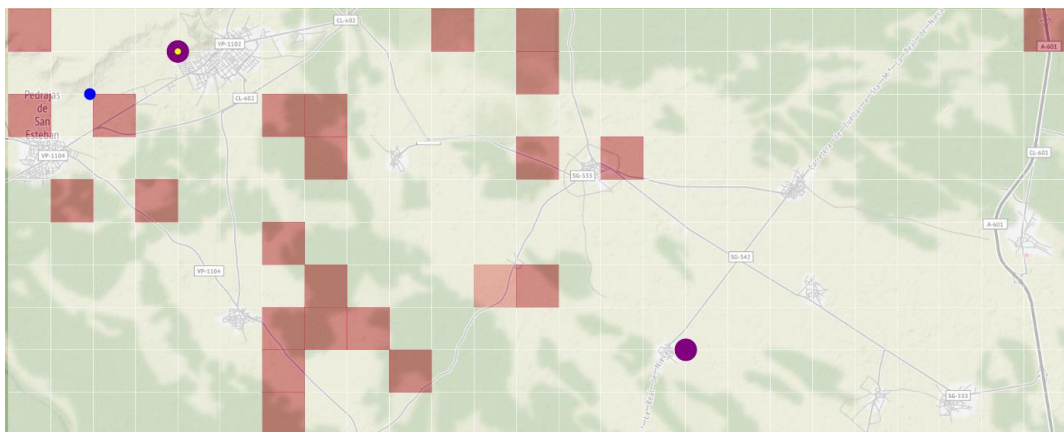


Figura 40. Año 2 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

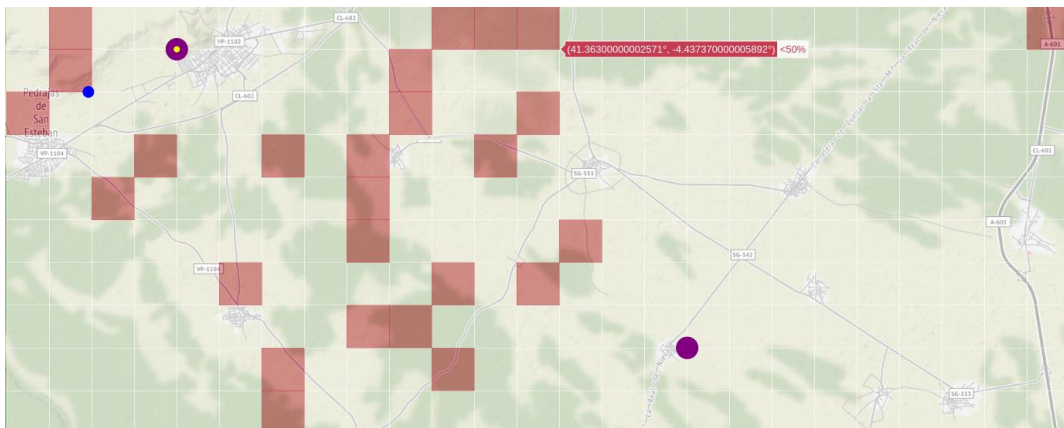


Figura 41. Año 3 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

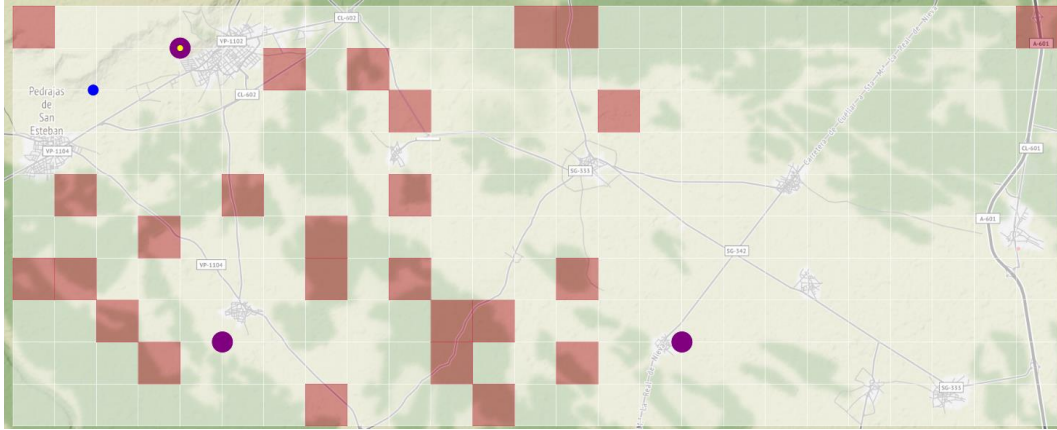


Figura 42. Año 4 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

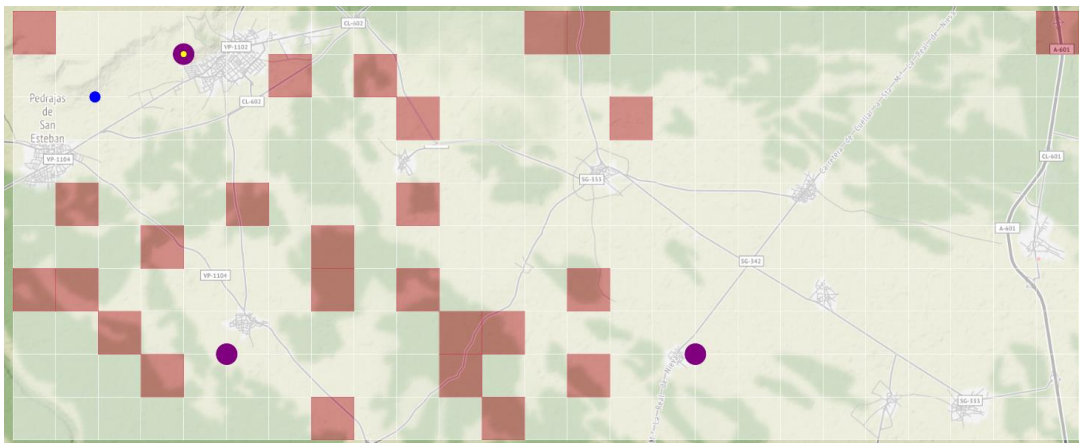


Figura 43. Año 5 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

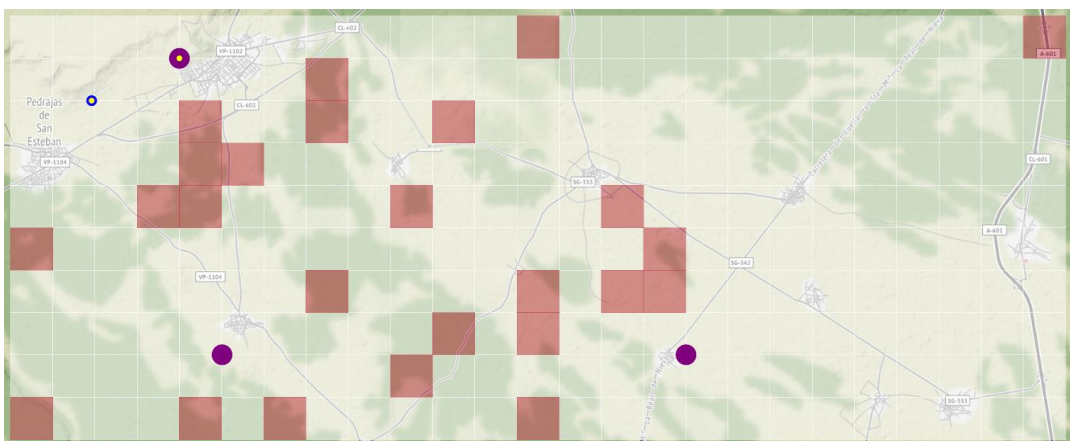


Figura 44. Año 6 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

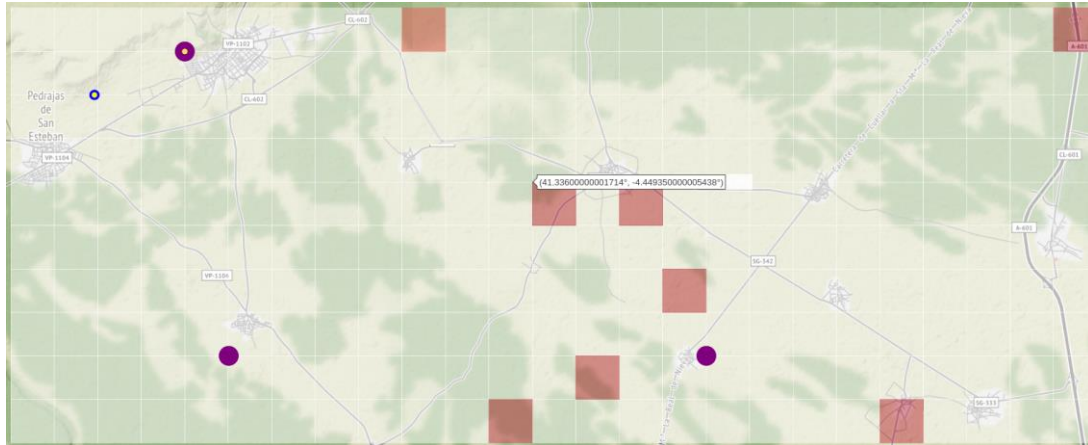


Figura 45. Año 7 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

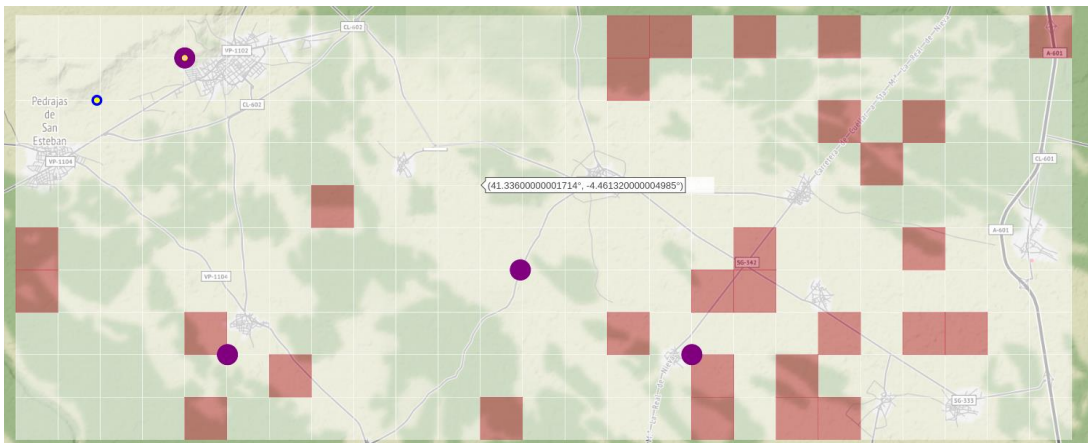


Figura 46. Año 8 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

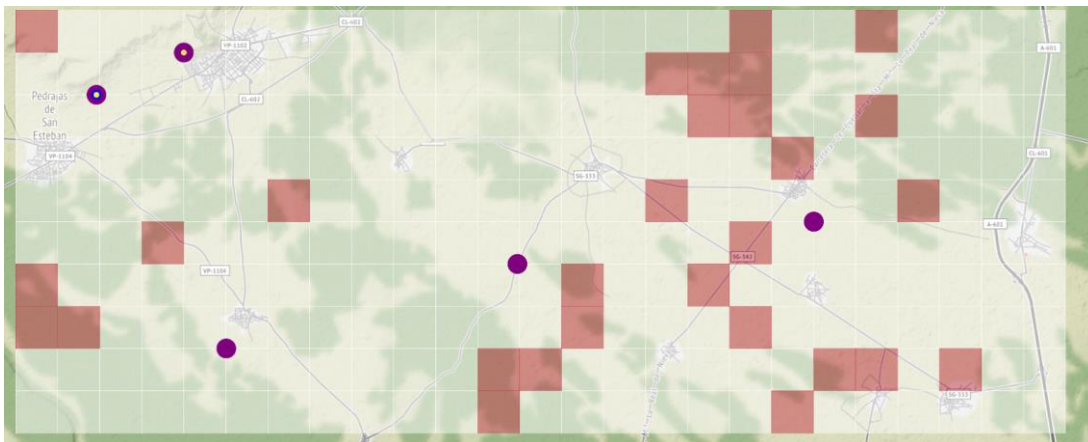


Figura 47. Año 9 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

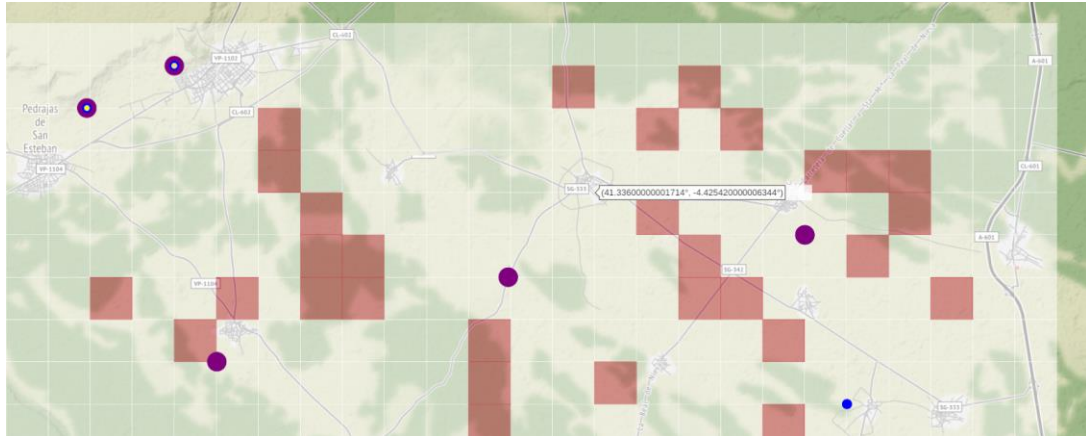


Figura 48. Año 10 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

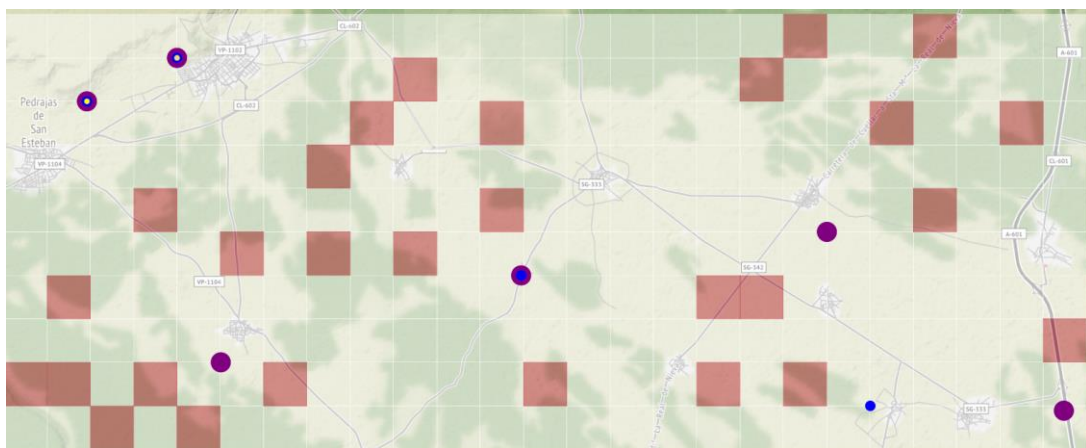


Figura 49. Año 11 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia

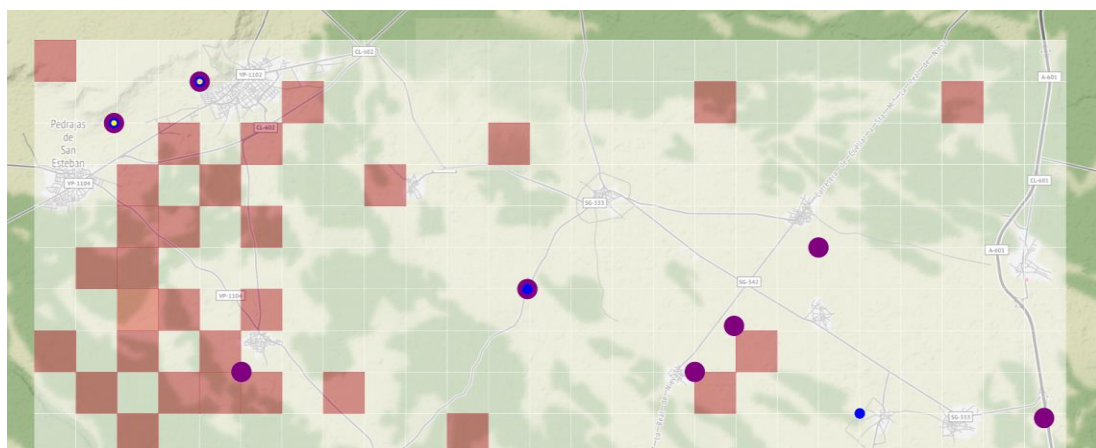


Figura 50. Año 12 del despliegue en Chañe. Fuente: Elaboración Propia