



Departamento de  
Ingeniería Industrial  
**Universidad de Concepción**

**APLICACIÓN Y COMPARACIÓN DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE  
INSTALACIONES PARA MITIGACIÓN DE DAÑOS POR INCENDIOS  
FORESTALES**

POR

**Felipe Ignacio Godoy Ortega**

Memoria de Título Presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción  
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial.

Profesores Guía

Dra. Magdalena Jensen Castillo

Dra. Lorena Pradenas Rojas

Septiembre 2025

Concepción (Chile)

©2025 Felipe Ignacio Godoy Ortega

©2025 Felipe Ignacio Godoy Ortega

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **Agradecimientos**

A mis padres, Nemesio y María, por su amor y apoyo incondicional en mi formación como persona y profesional, por su esfuerzo cada día para lograr un mejor mañana para su familia; y por ser el ejemplo de esfuerzo y dedicación que me motiva a mejorar.

A mi hermano Nemesio, por su cariño, apoyo y ayuda en todo momento que he necesitado.

A todos los profesores que me han formado para la vida profesional en estos años de universidad. Especialmente a la Dra. Magdalena Jensen y Dra. Lorena Pradenas, por su guía y comprensión ofrecida en la realización de este estudio.

A Héctor y José, cuya amistad sincera nos ha unido durante tantos años y nos hace compartir momentos únicos gracias a la pasión por la música.

A Carlos, Franco, Gustavo, Martín y Matías, cuya compañía y amistad, nacida en el campus de la universidad, nos hizo compartir gratos momentos tanto dentro o fuera de las aulas de clase.

A todo mi círculo cercano de familiares y amigos, quienes apoyaron mi formación con cariño y motivación por verme lograr mis metas.

Y finalmente a la Universidad de Concepción, por la formación y enriquecimiento intelectual, espiritual y valórico en el camino hacia el mundo laboral.

## Sumario

Los incendios forestales en Chile han generado un impacto significativo en comunidades rurales, creando la necesidad de estrategias preventivas. Este estudio tiene como objetivo analizar la funcionalidad y el rendimiento de un modelo de programación matemática para la localización de reservorios de agua en pequeñas comunidades, como medida de mitigación ante estos eventos. Para ello, se revisa literatura relacionada a Logística Humanitaria, se define un modelo de localización tipo *Capacitated Facility Location Problem* (CFLP) y se generan datos representativos de demanda a partir del método de centro de gravedad ponderado, en base a la distribución habitacional de 11 comunidades de las regiones del Biobío y Maule.

La metodología incluye una primera aproximación mediante el método heurístico de centro de gravedad, seguido por la aplicación del modelo de CFLP para integrar restricciones de capacidad, cobertura y asignación óptima. Los resultados evidencian que la mayoría de las ubicaciones óptimas de reservorios no coinciden con las propuestas iniciales, sino que corresponden a variaciones generadas en el análisis iterativo. Esto reafirma la utilidad de combinar enfoques heurísticos y exactos para mejorar la calidad de las soluciones.

El modelo propuesto demuestra ser replicable, adaptable a distintos territorios rurales y una herramienta útil para la planificación preventiva frente a incendios. Se concluye que la integración de análisis geográfico con programación matemática permite abordar problemas territoriales complejos incluso en contextos con limitación de datos, considerando una implementación aplicable a la realidad para la localización de instalaciones.

## Summary

Wildfires in Chile have had a significant impact on rural communities, creating the need for preventive strategies. This study aims to analyze the functionality and performance of a mathematical programming model for locating water reservoirs in small communities as a mitigation measure against such events. To this end, literature related to humanitarian logistics is reviewed, a location model based on the *Capacitated Facility Location Problem* (CFLP) is defined, and representative demand data are generated using the weighted center of gravity method, based on the housing distribution of 11 communities in the Biobío and Maule regions.

The methodology includes an initial heuristic approach using the center of gravity method, followed by the application of the CFLP model to integrate capacity, coverage, and optimal assignment constraints. The results show that most of the optimal reservoir locations do not coincide with the initial proposals, but rather correspond to variations generated during the iterative analysis. This confirms the usefulness of combining heuristic and exact approaches to improve solution quality.

The proposed model proves to be replicable, adaptable to different rural territories, and a useful tool for preventive wildfire planning. It is concluded that the integration of geographic analysis with mathematical programming makes it possible to address complex territorial problems even in contexts with limited data, considering an implementation applicable to real-world facility location.

## Tabla de Contenidos

1.	Introducción .....	1
1.1	Justificación de tema .....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos .....	3
2.	Revisión de literatura .....	4
2.1	Antecedentes de incendios forestales en Chile.....	4
2.2	Revisión de costos involucrados en incendios forestales .....	6
2.3	Industria forestal por región en Chile .....	7
2.4	Problema de Localización de Instalaciones.....	10
2.5	Localización de instalaciones en logística humanitaria.....	10
2.6	Comunidades como entidad de población en Chile.....	12
3.	Metodología .....	14
3.1	Enfoque General .....	14
3.2	Caracterización del Problema.....	14
3.3	Generación y definición de instancias .....	15
3.3.1	Metodología de aproximación de datos.....	16
3.3.2	Aproximación de nodos en instancias por Centro de Gravedad.....	18
3.3.3	Resumen de comunidades en instancias generadas por región .....	24
3.4	Modelo Propuesto.....	24
3.5	Implementación .....	28
3.5.1	Centro de gravedad y variaciones por instancia .....	28
3.5.2	Localización de Instalaciones con Capacidad .....	31
4.	Resultados .....	34
4.1	Resultados teóricos mediante centro de gravedad.....	34
4.2	Resultados Implementación <i>CFLP</i> .....	43
5.	Discusión y Conclusiones .....	56
5.1	Discusión .....	56
5.2	Conclusiones.....	59
5.3	Limitaciones del estudio y propuestas futuras.....	60

6. Referencias .....	62
7. Anexos.....	65

## Lista de Tablas

Tabla 1: Clúster Nodo 1 Aldea El Pino.....	18
Tabla 2: Coordenadas de nodos Instancia 1 (generada en 3.3).....	20
Tabla 3: Coordenadas de nodos instancia 2 (generada en 3.3).....	21
Tabla 4: Coordenadas de nodos instancia 3 (generada en 3.3).....	21
Tabla 5: Coordenadas de nodos instancia 4 (generada en 3.3).....	21
Tabla 6: Coordenadas de nodos instancia 5 (generada en 3.3).....	21
Tabla 7: Coordenadas de nodos instancia 6 (generada en 3.3).....	22
Tabla 8: Coordenadas de nodos instancia 7 (generada en 3.3).....	22
Tabla 9: Coordenadas de nodos instancia 8 (generada en 3.3).....	22
Tabla 10: Coordenadas de nodos instancia 9 (generada en 3.3).....	23
Tabla 11: Coordenadas de nodos instancia 10 (generada en 3.3).....	23
Tabla 12: Coordenadas de nodos instancia 11 (generada en 3.3).....	23
Tabla 13: Resumen de comunidades como instancias.....	24
Tabla 14: Centros de gravedad, La Paz. ....	34
Tabla 15: Centros de gravedad, El Pino. ....	35
Tabla 16: Centros de gravedad, Lotato. ....	36
Tabla 17: Centros de gravedad, P. Esperanza. ....	36
Tabla 18: Centros de gravedad, Llico. ....	37
Tabla 19: Centros de gravedad, Los Martínez. ....	37
Tabla 20: Centros de gravedad, Los Canelos. ....	38
Tabla 21: Centros de gravedad, Corinto. ....	39
Tabla 22: Centros de gravedad, Batuco. ....	40
Tabla 23: Centros de gravedad, Calpún. ....	41
Tabla 24: Centros de gravedad, Gualleco. ....	42
Tabla 25: Resumen de resultados CFLP, localización de reservorios por instancia.....	55

## Lista de Figuras

Figura 1: Ocurrencias de incendios forestales en Chile 2014-2024. ....	5
Figura 2: Total de superficie afectada (ha) por incendios forestales. ....	5
Figura 3: Participación de PIB Forestal en Chile .....	8
Figura 4: Proporción de superficie forestal plantada por regiones 2022. ....	9
Figura 5: Aldeas registradas en Chile al año 2017 .....	13
Figura 6: Caseríos registrados en Chile al año 2017 .....	13
Figura 7: Localización de Marcadores Aldea El Pino .....	17
Figura 8: Centro de gravedad inicial, La Paz. ....	34
Figura 9: Centro de gravedad inicial, El Pino. ....	35
Figura 10: Centro de gravedad inicial, Lotato. ....	36
Figura 11: Centro de gravedad inicial, P. Esperanza. ....	36
Figura 12: Centro de gravedad inicial, Llico. ....	37
Figura 13: Centro de gravedad inicial, Los Martínez. ....	37
Figura 14: Centro de gravedad inicial, Los Canelos. ....	38
Figura 15: Centro de gravedad inicial, Corinto. ....	39
Figura 16: Centro de gravedad inicial, Batuco. ....	40
Figura 17: Centro de gravedad inicial, Calpún. ....	41
Figura 18: Centro de gravedad inicial, Gualleco. ....	42
Figura 19: Resultados CFLP, La Paz. ....	44
Figura 20: Resultados CFLP, El Pino. ....	45
Figura 21: Resultados CFLP, Lotato. ....	46
Figura 22: Resultados CFLP, Población Esperanza. ....	47
Figura 23: Resultados CFLP, Llico. ....	48
Figura 24: Resultados CFLP, Los Martínez. ....	49
Figura 25: Resultados CFLP, Los Canelos. ....	50
Figura 26: Resultados CFLP, Corinto. ....	51
Figura 27: Resultados CFLP, Batuco. ....	52
Figura 28: Resultados CFLP, Calpún. ....	53
Figura 29: Resultados CFLP, Gualleco. ....	54

## Lista de Anexos

Anexo 1: Datos totales para formulación de nodos.....	65
Anexo 2: Marcadores para nodos instancia 1 “Caserío La Paz” .....	69
Anexo 3: Marcadores para nodos instancia 2 “Aldea El Pino” .....	70
Anexo 4: Marcadores para nodos instancia 3 “Caserío Lotato”.....	70
Anexo 5: Marcadores para nodos instancia 4 “Caserío Población Esperanza”.....	71
Anexo 6: Marcadores para nodos instancia 5 “Aldea Llico” .....	71
Anexo 7: Marcadores para nodos instancia 6 “Caserío Los Maitenes” .....	72
Anexo 8: Marcadores para nodos instancia 7 “Caserío Los Canelos” .....	72
Anexo 9: Marcadores para nodos instancia 8 “Aldea Corinto”.....	73
Anexo 10: Marcadores para nodos instancia 9 “Conjunto de caseríos Batuco” .....	73
Anexo 11: Marcadores para nodos instancia 10 “Caserío Calpún”.....	74
Anexo 12: Marcadores para nodos instancia 11 “Aldea Gualleco” .....	75
Anexo 13: Código de obtención de Nodo individual .....	76
Anexo 14: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 1. ....	77
Anexo 15: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 2. ....	79
Anexo 16: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 3. ....	81
Anexo 17: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 4. ....	82
Anexo 18: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 5 .....	84
Anexo 19: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 6. ....	85
Anexo 20: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 7. ....	87
Anexo 21: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 8. ....	88
Anexo 22: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 9. ....	91
Anexo 23: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 10. ....	92
Anexo 24: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 11.....	94
Anexo 25: Código de modelo CFLP para localización de reservorios de agua. ....	95
Anexo 26: Tabla de Resultados CFLP Instancia 1 .....	97
Anexo 27: Tabla de Resultados CFLP Instancia 2 .....	97
Anexo 28: Tabla de Resultados CFLP Instancia 3 .....	98
Anexo 29: Tabla de Resultados CFLP Instancia 4 .....	98
Anexo 30: Tabla de Resultados CFLP Instancia 5 .....	98
Anexo 31: Tabla de Resultados CFLP Instancia 6 .....	98
Anexo 32: Tabla de Resultados CFLP Instancia 7 .....	99
Anexo 33: Tabla de Resultados CFLP Instancia 8 .....	99
Anexo 34: Tabla de Resultados CFLP Instancia 9 .....	99
Anexo 35: Tabla de Resultados CFLP Instancia 10 .....	99
Anexo 36: Tabla de Resultados CFLP Instancia 11.....	100

## 1. Introducción

Los incendios forestales en Chile son una realidad, con un promedio de ocurrencia de más de 6.000 desastres en cada temporada según los registros de los últimos 10 años (CONAF, 2024). Estas catástrofes, según cifras de CONAF, han afectado a más de 1 millón de hectáreas de superficie nacional desde el año 2014 a la actualidad, y han repercutido tanto en daños en la industria forestal del país como también en pérdidas económicas y materiales en comunidades, generando un impacto monetario, ecológico y humano en los sectores afectados. Así, evaluaciones de costos por impacto de los incendios forestales, como en el periodo 2023, muestran costos fiscales cercanos a US\$140 millones en el área productiva y alrededor de US\$290 millones para la recuperación de zonas afectadas, abordando ejes tales como: prevención, mitigación, combate, reconstrucción, etc. (Ministerio de Hacienda, 2023). Los costos, en su mayoría son enfocados en las categorías de combate de incendios y reconstrucción, invirtiéndose para el periodo antes mencionado alrededor de US\$170 millones exclusivamente para la reconstrucción del sector de vivienda y urbanismo.

Este estudio considera la problemática de incendios forestales, la localización de reservorios de agua en comunidades para la mitigación de daños producidos por estos, y el uso de modelos de programación matemática basados en el Problema de Localización de Instalaciones, con el enfoque de Logística Humanitaria. Además, se trabaja la generación de datos basados en localidades reales para el funcionamiento del modelo, abordando su definición y comparando sus resultados con otros métodos propuestos de localización de instalaciones. Así, este estudio se enfoca en la instalación de reservorios de agua en pequeñas comunidades, pertenecientes a las regiones del Bio Bío y Maule, identificando factores de riesgo de incendio forestal y la falta de recursos para la mitigación de daños en las localidades.

## 1.1 Justificación de tema

En el ámbito de la investigación de operaciones, las problemáticas asociadas a la localización de instalaciones suelen centrarse en casos de la industria, con el propósito de reducir costos mediante la identificación de ubicaciones y nodos óptimos para instalar una o más infraestructuras que incrementen la productividad de una organización o empresa. A partir de esta línea, se han desarrollado diversas variantes de dicha problemática, las cuales resultan útiles como base algorítmica para abordar otros contextos y enfoques.

La aplicación de modelos de investigación de operaciones a la localización de reservorios de agua con fines de mitigación frente a incendios forestales constituye una herramienta valiosa para enfrentar y reducir los daños que afectan a comunidades pequeñas expuestas a este riesgo. Desde la teoría, estos modelos ofrecen una propuesta que respalda su implementación en escenarios reales, considerando las principales características presentes en estos.

En este trabajo se plantea el desarrollo de un modelo de programación matemática orientado a la localización de instalaciones, con el objetivo de abastecer viviendas con recursos hídricos y, de este modo, contribuir a la mitigación de los daños ocasionados por incendios forestales en comunidades de riesgo.

## **1.2 Objetivos**

El presente capítulo expone el objetivo general y los objetivos específicos que guían el desarrollo de este estudio.

### **1.2.1 Objetivo General**

Analizar la funcionalidad y el rendimiento de un modelo de programación matemática de localización de instalaciones, para instalar reservorios de agua en pequeñas comunidades y así mitigar daños causados por incendios forestales.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Revisar la literatura relacionada a la localización de instalaciones.
- Analizar literatura sobre el impacto y daños producidos en comunidades por incendios forestales ocurridos en Chile.
- Proponer, comparar y definir un modelo de programación matemática.
- Proponer y generar información de entrada para el modelo de localización de instalaciones, considerando pequeñas comunidades para la implementación.
- Implementar el modelo propuesto a través de lenguaje Python.
- Validar y analizar los resultados generados por el modelo propuesto.

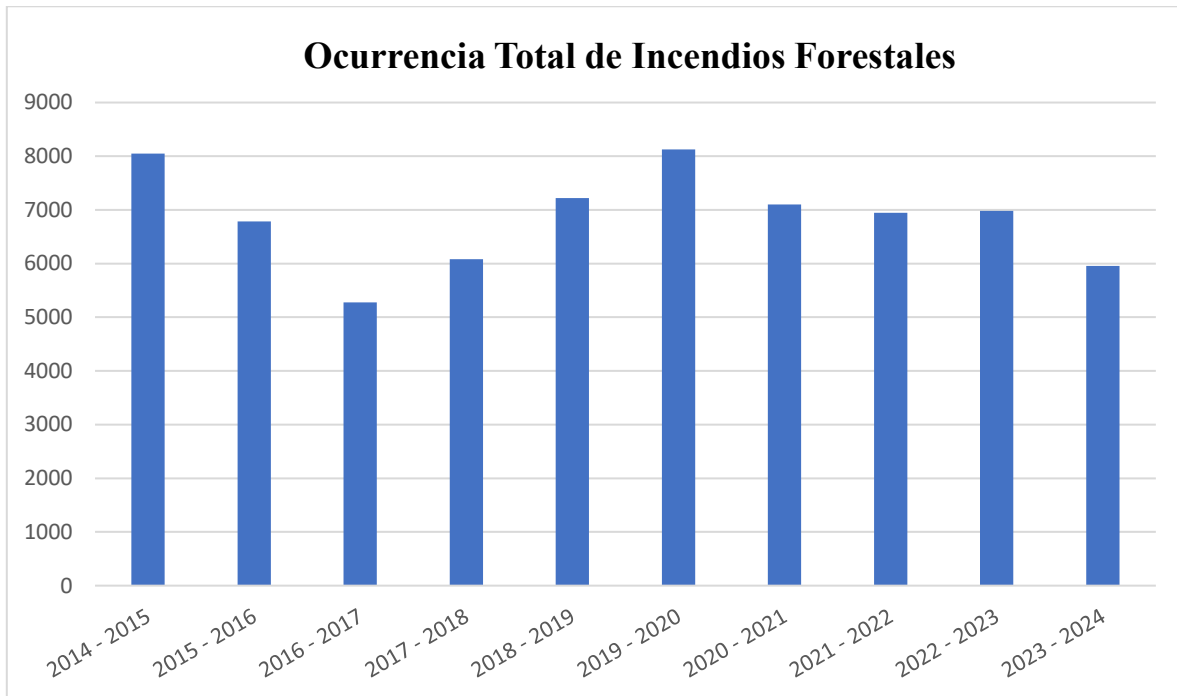
## 2. Revisión de literatura

El presente capítulo aborda la revisión de documentación vinculada a los incendios forestales en Chile durante los últimos años, así como investigaciones relacionadas con el problema de localización de instalaciones y su aplicación en medidas de mitigación de daños en desastres.

### 2.1 Antecedentes de incendios forestales en Chile

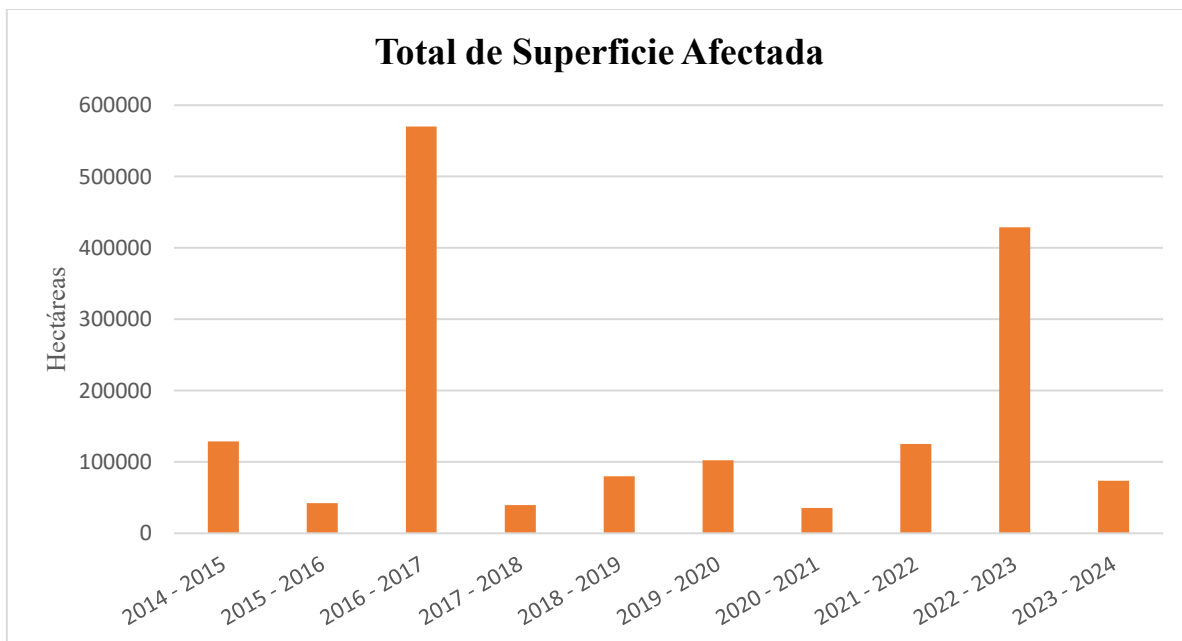
Durante los últimos 10 años en Chile, según datos registrados en “Hectáreas por Incendio Nacional por Incendios Forestales Por Región” entre 1977-2024 (CONAF, 2024), los incendios forestales han tenido una ocurrencia en promedio de 6.852 siniestros en cada temporada. Para el decenio entre 2014 y 2024, como se muestra en la **Figura 1**, la cantidad total de incendios forestales varía en el tiempo, con valores máximos para los periodos finalizado en los años 2015 y 2020, con ocurrencias de 8.048 y 8.127 registros respectivamente, siendo las mayores cantidades de incendios forestales en un periodo en el país. Estas cifras de ocurrencia de incendios forestales, superiores a los 5.000 en cada año, han ocasionado un impacto total de 1.626.753,9 hectáreas afectadas (ha) en la superficie del territorio nacional, registrándose las mayores pérdidas en los periodos 2017 y 2023, como se muestra en la **Figura 2**.

**Figura 1: Ocurrencias de incendios forestales en Chile 2014-2024.**



Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos desde CONAF.

**Figura 2: Total de superficie afectada (ha) por incendios forestales.**



Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos desde CONAF.

## 2.2 Revisión de costos involucrados en incendios forestales

Los costos generados por incendios forestales en Chile, conducen a un análisis que comprende diversas perspectivas tanto en lo económico y fiscal, con datos recopilados en el “Reporte de la estimación de costos fiscales y económicos de la emergencia por incendios forestales” (Ministerio de Hacienda, 2023), para la temporada 2022 – 2023 y con información proporcionada por: el Ministerio de Hacienda, la Dirección de Presupuestos (DIPRES), la Corporación Nacional Forestal (CONAF), el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SERNAPRED), el Ministerio de Agricultura, Ministerio de Medio Ambiente y Comisión para el Mercado Financiero (CMF). Este informe recopila información respectiva al catastro de desastres por incendios forestales en las regiones de: Maule, Ñuble, Biobío, la Araucanía y los Ríos, y estima las pérdidas tanto, en actividad productiva (forestal y agropecuaria) como también en infraestructura productiva y social para la caracterización de pérdidas en capital económico. Así, el registro para 2023, muestra la evaluación de pérdida de stock de capital económico en \$706.888 millones de pesos, considerando pérdidas en la actividad forestal en la superficie afectada de plantaciones forestales (concentradas principalmente en las regiones de Biobío y la Araucanía), superficies de cultivos en el área agrícola, mortalidad en especies del sector pecuario (ganado y apícola) y también pérdidas de infraestructura y maquinaria productiva.

La definición de gastos respecto a infraestructura social afectada por incendios forestales considera: viviendas, establecimientos educacionales y centros de salud dañados o destruidos en desastres. Este catastro entregado por SERNAPRED, reportó un total de **4.078 viviendas afectadas** con un costo económico total de \$128.420 millones de pesos, que corresponde al 65% del total del stock de capital de infraestructura social perdido en la temporada 2023 (SERNAPRED, 2023).

Para comprender la realidad local de estimaciones de costos de recuperación ante catástrofes generadas en la región del Biobío, se analizó el “Plan de Reconstrucción Post Incendios 2023”, propuesto en la LEY N°20.444 y en el Fondo Nacional de la Reconstrucción para disponer de iniciativas y recursos (por medio de donaciones y fondos) y proporcionar seguridad, dignidad y esperanza a personas y comunidades afectadas por incendios, además

de restaurar la actividad productiva y desarrollo de territorios. En este plan se entienden las distintas áreas de acción en la recuperación de catástrofes por incendios forestales, proponiendo medidas en los ejes: Habitabilidad, para asegurar a cada hogar afectado una vivienda adecuada; Apoyo Psicosocial, para fortalecer las capacidades comunitarias y reducir la vulnerabilidad psicosocial de las personas afectadas; Reactivación Productiva, para recuperar la actividad económica y productiva a través de la protección de ingresos, empleos y la capacidad productiva de distintos sectores; Infraestructura Habilitante, para recuperar la infraestructura dañada e impulsar un plan de desarrollo e inversión destinado a reducir las brechas existentes; y Territorio y Sustentabilidad, centrado en aumentar los niveles de resiliencia y adaptación de los territorios afectados (Gobierno de Chile, 2023).

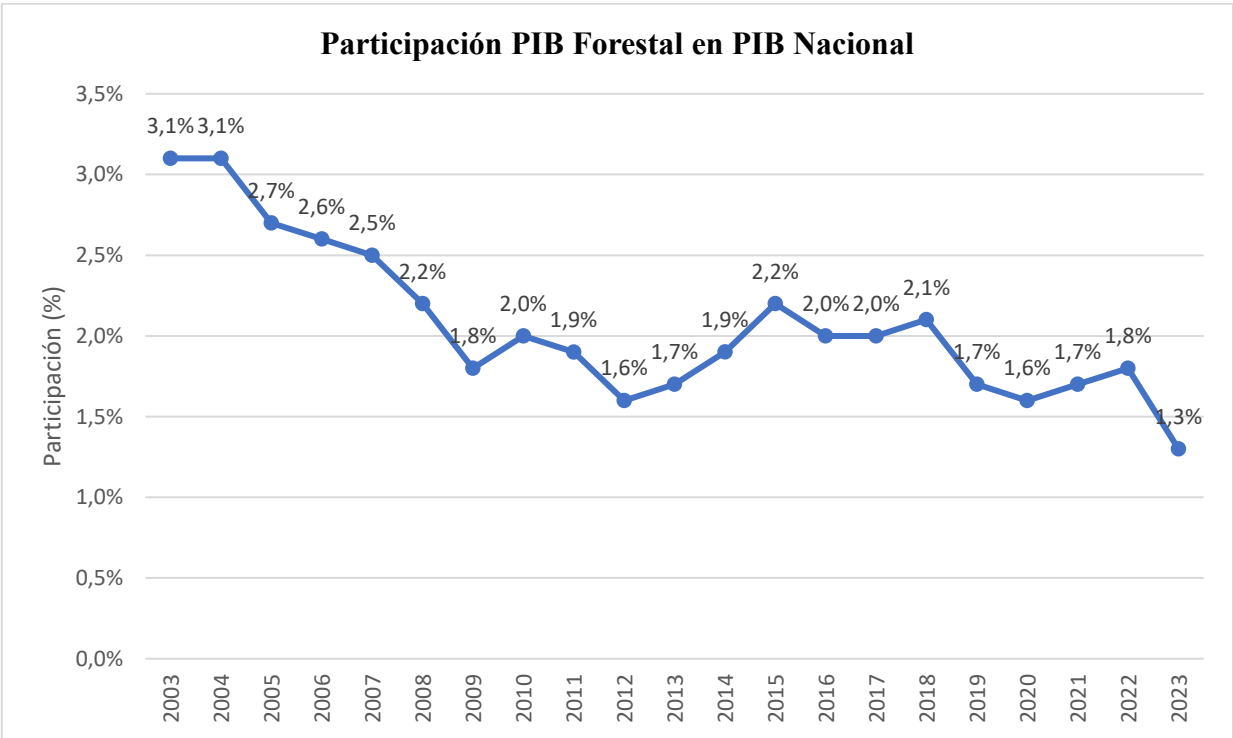
Las medidas de recuperación por el impacto de incendios forestales consideran el costo en diversas áreas que afectan a la comunidad tanto en temas monetarios como también en inversión de esfuerzos logísticos para la recuperación de recursos, abordando también las consecuencias en el medio ambiente y para las personas. En el eje habitacional, el “Plan de Reconstrucción Post Incendios 2023” propone un subsidio de hasta 1.400 UF para las viviendas destruidas o con daños irreparables producto de la catástrofe en sectores urbanos, y de hasta 1.600 UF para estas mismas en zonas rurales. Esto plantea un desembolso entre cincuenta y sesenta millones de pesos para reposición por vivienda afectada en un universo estimado de **1.022 viviendas** a construirse en la región, aumentando significativamente el costo de recuperación habitacional total. Sin embargo, también se reconocen otros tipos de costos relacionados a costos sociales en áreas tales como contaminación y capital natural afectado por la ocurrencia de incendios forestales, y determinados por un análisis más cualitativo de impacto en las personas y comunidades.

### **2.3 Industria forestal por región en Chile**

La industria forestal en Chile es uno de los sectores económicos que aporta directamente al Producto Interno Bruto (PIB) nacional a través del conjunto de actividades económicas de esta, tales como: Celulosa, papel e imprentas; Maderas y muebles; y Silvicultura. Según lo establecido en el Anuario Forestal 2024, “la evolución del PIB real forestal en los últimos años muestra tasas de crecimiento anual a la baja” y para el año 2023

“una participación del PIB forestal de 1.3% con respecto al PIB nacional, siendo la participación más baja desde que se lleva registro” (P. Poblete Hernández et al., 2024). Esta tendencia se evidencia en las variaciones comerciales que han afectado a la industria forestal, generándose contracción en silvicultura, madera y muebles, una baja en exportaciones en pulpas químicas y reducción de la participación de la madera como material de construcción de obras en el periodo 2022 a 2023. Sin embargo, la relevancia de la industria forestal sigue presente en las medidas productivas, que en los últimos veinte años han mostrado una participación del 3.1% del PIB nacional, y de un 2.2% en el último decenio, como se muestra en la **Figura 3**.

**Figura 3: Participación de PIB Forestal en Chile**

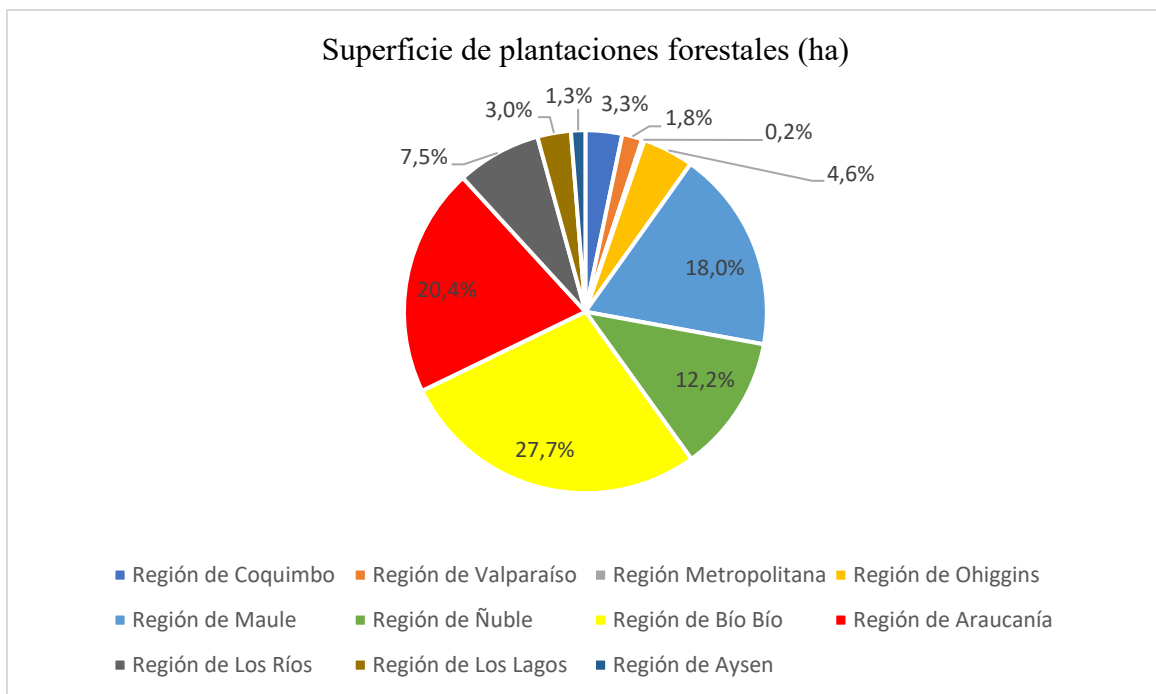


Fuente: Banco Central de Chile

Para el año 2023, el catastro de recursos vegetacionales nativos de Chile, indica que las plantaciones forestales cubren una superficie de 3.121.969 hectáreas, equivalentes al 17,37% del total de bosques en Chile (CONAF, 2023). Así también, los registros de forestación y reforestación realizados por cada región indican un total de 94.166,87 hectáreas plantadas, con la mayor concentración de superficie plantada en la región del Biobío

(44.02%), seguido de las regiones de Ñuble (16,32%) y de La Araucanía (14,47%) (Cabaña, 2024). Por otro lado, la proporción de superficie forestal total por regiones a nivel país indica, para la temporada 2022, una mayor participación en las regiones de Biobío con 27,7%, Araucanía con 20,4%, Maule con 18,0% y Ñuble con un 12,2% de hectáreas forestales a nivel nacional (R. Sagardía Parga et al., 2022). Así, las regiones de Biobío, Maule, Araucanía y Ñuble comprenden la mayor proporción de plantaciones forestales a nivel nacional, considerando forestación, reforestación y superficie plantada total, como se muestra en la **Figura 4**.

**Figura 4: Proporción de superficie forestal plantada por regiones 2022.**



Fuente: “*Los Recursos Forestales en Chile*” (R. Sagardía Parga et al., 2022).

## 2.4 Problema de Localización de Instalaciones

El Problema de Localización de Instalaciones es uno de los problemas clásicos que se estudia en Investigación de Operaciones, utilizado en múltiples áreas de investigación y que presenta diversas técnicas de solución, tales como heurísticas y algoritmos que permiten la implementación con bajos tiempos computacionales y resultados satisfactorios. Entre las características definidas en la literatura que identifican al Problema de Localización de Instalaciones, se encuentra la disposición de centros disponibles para una localización y centros de demanda figurados como nodos con flujos entre sí (*Flow Network*), y se interconectan pudiendo ser representados como un grafo bipartito, donde uno o más posibles centros de localización puede abastecer a uno o más centros de demanda (Vindra Ahuja et al., 1993).

## 2.5 Localización de instalaciones en logística humanitaria

En el tiempo, la implementación de localización de instalaciones ha respondido a necesidades que surgen en situaciones de desastres. En estos casos y durante años recientes, se estudia la localización de instalaciones en **logística humanitaria** como un problema crucial que demanda una capacidad de respuesta, eficiencia de distribución y rendimiento en operaciones de ayuda (Daza-Moscoso et al., 2024). Esta revisión de literatura y consideraciones para futuras investigaciones aborda la investigación de trabajos publicados entre 2020 y 2022, enfocando el problema de localización de instalaciones como respuesta en la fase de mitigación en la etapa de preparación (pre-desastre) en el manejo de desastres.

En logística humanitaria, la localización de instalaciones considera situaciones de desastres naturales de diversos tipos (como ciclones, terremotos, incendios, inundaciones, etc.), y plantea el desarrollo de modelos multiobjetivo que resuelvan las distintas necesidades abordadas en problemas reales. Así, la localización de instalaciones es fundamental para la pronta capacidad de respuesta ante desastres, ya que la localización óptima de una instalación permite reducir costos, garantizar una cercanía a sectores afectados y una eficiente disposición de servicios a las personas (Maharjan & Hanaoka, 2020).

El trabajo realizado por Ming et al. (2021) emplea la localización de instalaciones para ubicar o reubicar estaciones (cooperativas) de bomberos con el propósito de mejorar la respuesta ante incendios utilizando sistemas de ubicación geográfica. Este caso propone un enfoque completo relacionado a la respuesta de un modelo implementado en un ambiente urbano, donde se abordan múltiples factores a través de un modelo de programación lineal entera mixta con dos métricas de cobertura: la primera de cobertura vehicular y la segunda de cobertura temporal. Esta investigación se desarrolla bajo una mirada integral donde un modelo responde tanto para localizar instalaciones como distribuir y asignar recursos, propone los mejores emplazamientos para estaciones de bomberos, y determina el tipo y número de vehículos por asignar en la implementación en localidades de características urbanas.

Otro tipo de investigación analiza el uso de modelos híbridos en la localización de instalaciones, como el planteado por Mohri et al. (2020), que combina el análisis envolvente de datos con el problema de localización de cobertura máxima para ubicar nuevas instalaciones de emergencia y así mejorar la atención de accidentes de tránsito en una ciudad. Este estudio, orientado a incrementar la eficiencia de los centros de emergencia en distritos urbanos, propone instalar la menor cantidad posible de infraestructuras para responder a la demanda generada en situaciones críticas. Para ello, considera la demanda asociada a la densidad de población y al número de accidentes ocurridos en un distrito, definiendo la cobertura de un centro según el alcance de ambulancias en una red vial durante horarios de alto tráfico vehicular. En conjunto, esta investigación destaca la relevancia de maximizar la eficiencia de las instalaciones mediante una adecuada definición de los criterios de formulación del problema, incorporando datos para planificar la demanda y evaluar la cobertura en la localización como resultado de la implementación del modelo.

En la revisión de literatura de localización de instalaciones para centros de personas mayores propuesto por Lee & Jeong (2025), se plantea el desarrollo de un algoritmo genético para determinar las ubicaciones óptimas de los centros, como también abordar la solución del problema a través del FLP (“*Facilities Location Problem*”). El objetivo es minimizar las distancias de viaje de las personas mayores y comparar los resultados de ambos métodos, considerando restricciones como limitaciones de movilidad y la distribución actual de los

centros existentes. Finalmente, abordan el uso de datos de población y geografía de Seúl para estimar demandas en diferentes ubicaciones e implementar la solución cercana a la realidad.

El uso de un algoritmo genético se fundamenta en su efectividad de buscar simultáneamente múltiples soluciones obteniendo un óptimo global, resultando útil en la resolución de problemas de alta complejidad computacional. El algoritmo genético genera combinaciones de ubicaciones candidatas e identifica las mejores para localizar instalaciones. El algoritmo se implementa con la función (*Fitness Function*) de minimizar distancias totales entre centros y nodos de demanda.

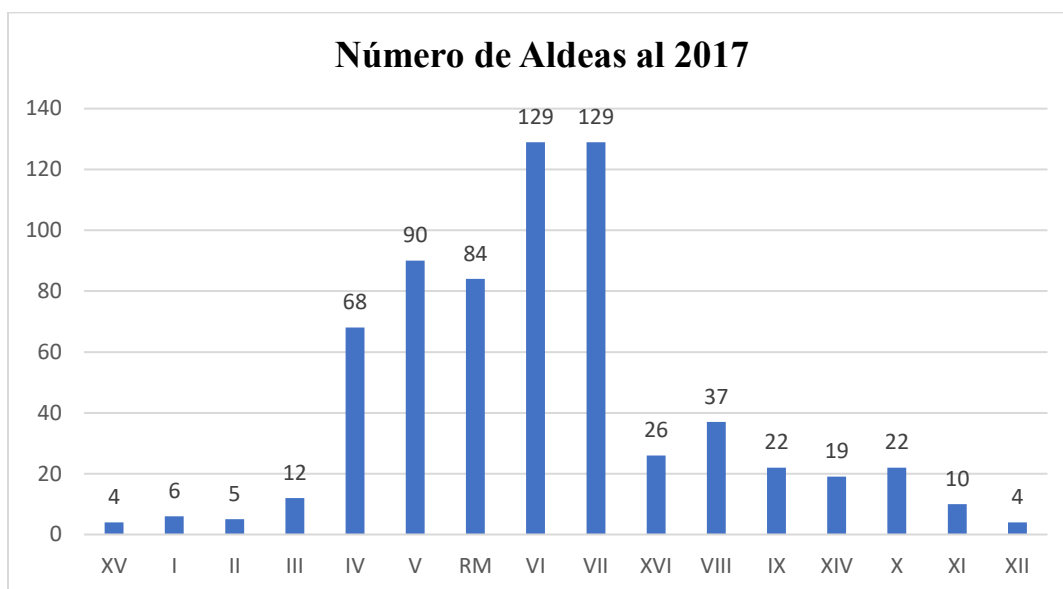
Esto plantea la posibilidad de implementar la metodología trabajada en otros casos, evaluando la localización de instalaciones mediante un algoritmo y un modelo de programación lineal (FLP), abordando problemáticas reales mediante formulación teórica.

## 2.6 Comunidades como entidad de población en Chile

Para la implementación de localización de reservorios de agua en comunidades, se entiende el concepto de “**comunidad**” o “**pequeña comunidad**”, como relativo a las definiciones pertenecientes a la categoría de entidad rural de “**aldea**” y “**caseríos**” presentes en el informe “Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos” realizado por el INE en el año 2019. En este informe, la denominación “aldea” se comprende como: “*entidad rural, cuya población fluctúa entre 301 y 2.000 habitantes, o entre 1.001 o 2.000 habitantes, con más del 50% de su población dedicada a actividades primarias. Presenta generalmente amanzanamiento y/o continuidad de viviendas en torno a una vía de comunicación estructurante*”, y “caserío” queda definido como: “*entidad rural con nombre propio que posee tres viviendas o más, cercanas entre sí, con menos de 301 habitantes y que no forma parte de otra entidad*” (Instituto Nacional de Estadísticas, 2019). Con estas definiciones, y de acuerdo con el registro estadístico en el portal de INE, las comunidades representan aquellas localidades pertenecientes a ambos tipos de sectores de manera aditiva, siendo los caseríos aquellas comunidades más simples y pequeñas, y las aldeas aquellas más estructuradas.

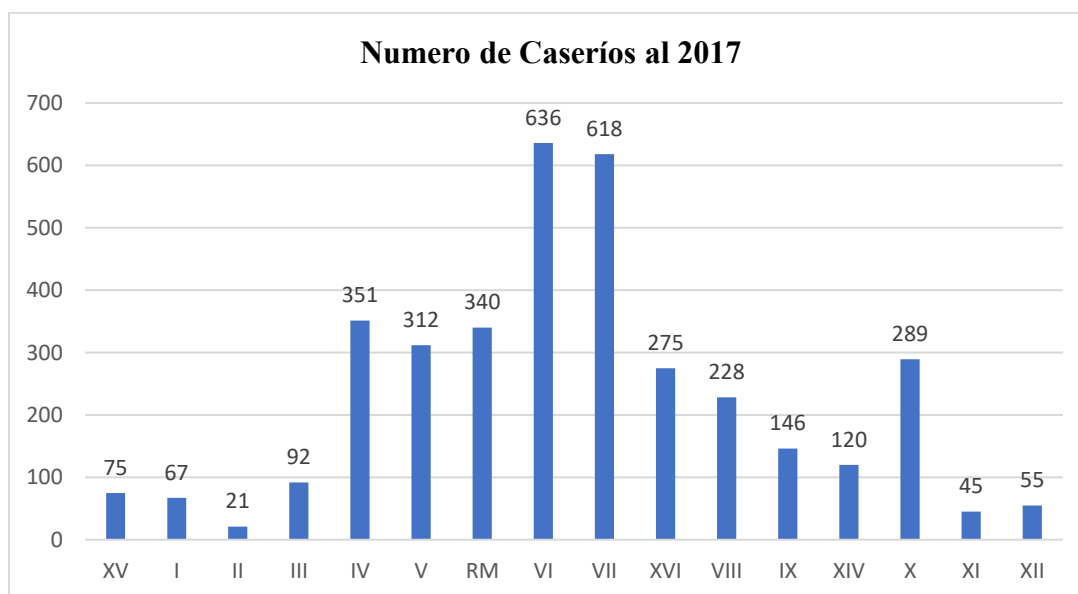
A partir de los datos del portal del INE, en la consulta de comunidades pertenecientes a la región del Biobío, se identifican un total de 37 aldeas y 228 caseríos que conforman el universo de comunidades registradas en la región, como se muestran en la **Figura 5**, y en la **Figura 6**.

**Figura 5: Aldeas registradas en Chile al año 2017**



Fuente: Elaboración propia con información de Geodatos abiertos INE.

**Figura 6: Caseríos registrados en Chile al año 2017**



Fuente: Elaboración propia con información de Geodatos abiertos INE.

### **3. Metodología**

La localización de reservorios de agua en comunidades en el presente estudio aborda la definición de instancias de prueba, uso de métodos iniciales para localizar instalaciones y finalmente, la utilización de un modelo FLP para resolver el problema de cobertura con acercamiento aplicable en instancias reales.

#### **3.1 Enfoque General**

Para el desarrollo de este estudio se utiliza un enfoque cualitativo deductivo, basado en la implementación de un modelo de programación matemática lineal entera (Lee & Jeong, 2025), para optimizar la localización de reservorios de agua en comunidades y mitigar daños producidos por incendios forestales. De esta forma, en este proceso se consideran métodos para disponer de información necesaria para el funcionamiento del modelo matemático, evaluándose también estas alternativas en casos de localización de instalaciones como acercamiento de un método de resolución.

#### **3.2 Caracterización del Problema**

Se busca resolver la instalación al menos de un reservorio de agua dentro de una comunidad (perteneciente a entidades rurales), ubicada en las regiones de Biobío y Maule en zonas de alto riesgo de incendios forestales en Chile. Para ello, se propone un modelo de localización de instalaciones que permita identificar las mejores ubicaciones para satisfacer la demanda identificada en sectores de una comunidad y prevenir daños ocasionados por incendios.

Se considera que no existe registro de infraestructura hídrica (reservorios) disponible ni demanda real documentada en sectores dentro de comunidades. Se propone la construcción de un conjunto de datos a partir del análisis espacial de la concentración de viviendas. Este análisis permite definir nodos y demanda utilizando el método del centro de gravedad, que

aproxima la localización representativa de cada sector habitacional en la comunidad. Por ende, en cada nodo generado existe una demanda estimada según la concentración de viviendas representadas.

El modelo considera posibles ubicaciones candidatas para los reservorios, así como restricciones relacionadas con cobertura, distancias máximas y capacidades de atención. La formulación propuesta busca entregar una buena solución que, puede no ser directamente aplicable a una situación real por factores físicos, geográficos y/o sociales no modelados, pero que sugiere referencias de ubicaciones cercanas viables en una implementación real.

Así, el problema aborda el desafío metodológico de construir y validar un conjunto de datos con supuestos razonables permitiendo, evaluar preliminarmente la factibilidad del modelo propuesto y sus resultados. El enfoque propone un primer acercamiento práctico para la instalación de reservorios de agua contra incendios, como medida preventiva en comunidades expuestas a incendios forestales, incorporando criterios de: riesgo, cobertura y cercanía territorial.

### **3.3 Generación y definición de instancias**

Las instancias utilizadas se conforman tanto por localidades propuestas en la revisión de pequeñas comunidades de la región del Biobío y del Maule, como también por generación de variaciones teóricas que proponen un nuevo caso en cada instancia para localización de instalaciones. Estas instancias son delimitadas por un área de denominación común, para el caso de aquellas propuestas en la revisión de comunidades, evaluándose por identificación espacial a través de registros en *Google Earth* con la información del catastro de “*Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019*” (Instituto Nacional de Estadísticas, 2019).

Algunos supuestos utilizados para la búsqueda y definición de comunidades en este estudio son:

- a. Se utilizan entidades rurales pertenecientes a las regiones del Maule y Biobío.
- b. Las entidades rurales pertenecen a aldeas y caseríos del informe “*Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019*” (Instituto Nacional de Estadísticas, 2019).

- c. Las entidades rurales son cercanas a bosques o plantaciones forestales en sus proximidades o alrededores.
- d. Las entidades rurales no disponen de instalaciones de reservorios de agua para mitigar daños en incendios forestales.
- e. Se realiza una actualización de registros de viviendas e infraestructuras en cada comunidad, dado que existen imprecisiones del territorio geográfico y cambios relativos en el registro de comunidades en la actualidad.

### **3.3.1 Metodología de aproximación de datos**

Para el planteamiento de una comunidad como instancia, se considera tanto la inspección y formulación teórica de datos obtenidos, que se ocupan como entrada para un método y un modelo de localización de instalaciones. Primero, se establece la delimitación geográfica de cada instancia al tomar en cuenta sus características informadas en la documentación, siendo relevante: la localización de la comuna de pertenencia, su proximidad a plantaciones forestales, el número de viviendas registradas en la comunidad y límites geográficos o naturales existentes. Así, cada comunidad se identifica y registra delimitada por uno o más polígonos que responden a las características analizadas y visualizadas mediante *Google Earth*.

Al establecer la delimitación de la comunidad registrada en un mapa, se formula la generación de nodos dentro de esta a través de la implementación del método de centro de gravedad, dado que este método funciona como un buen punto de partida para determinar una localización con relación a puntos de destino, un volumen enviado y un costo asociado (Carro Paz & González Gómez, 2012). Este método se plantea también como un mecanismo de georreferenciación útil en trabajos con comunidades rurales para la obtención de datos de la población (López Vizcaíno, 2018). De esta forma, para la representación de una concentración de viviendas como un nodo en un plano bidimensional, se recopila la información de las coordenadas de latitud y longitud (puntos de destino a ser representados) en formato de grados decimales de cada posible arista en la geometría de una concentración de infraestructuras o viviendas. Así, se considera un peso por cada coordenada con un valor

igual a 1 (volumen de cada punto), dado que solo se busca el centro geográfico que pueda servir como un nodo de la instancia. Esta formulación se basa en lograr establecer un clúster de individuos similares (viviendas cercanas en este caso), que se ocupan para la representación mediante atributos de una zona geográfica al determinar su centro de gravedad (Castro et al., 2019). Finalmente, para un entorno de 11 instancias propuestas, se registra un total de 233 pares coordenados resumidos en **Anexo I** y obtenidos a través de la información proporcionadas por la localización manual de marcadores en el mapa de los sectores de concentración de viviendas y edificaciones visualizados en las comunidades como se muestra en el ejemplo de la **Figura 7 (Anexo 2 - Anexo 12)**. Esta información para cada nodo en cada instancia se registra en una planilla para ser utilizado en la definición del nodo como centro de gravedad.

**Figura 7: Localización de Marcadores Aldea El Pino**



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2 Aproximación de nodos en instancias por Centro de Gravedad.

La aproximación de la representación espacial de un clúster o conjunto de viviendas como una demanda de una comunidad, se determina a través de la ejecución del método de centro de gravedad ponderado (Carro Paz & González Gómez, 2012) considerando la información de latitud, longitud y peso de cada punto.

La información de cada clúster se registra en una planilla (**Anexo 1**) para todos los posibles nodos de una comunidad por separado, para lograr una verificación de coherencia entre los resultados y los marcadores registrados en el mapa de la instancia. El registro con el que se trabaja se obtiene desde los datos registrados para un clúster del que se crea un nodo como se muestra en la **Tabla 1**.

**Tabla 1: Clúster Nodo 1 Aldea El Pino**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso
Biobío	Concepción	EP11	-36.843266	-72.922936	Aldea El Pino	1
Biobío	Concepción	EP12	-36.844375	-72.921056	Aldea El Pino	1

La metodología del cálculo de centro gravedad, está basada en la fórmula de promedio ponderado de latitud y longitud que se trabaja como variación de la presentada para coordenadas “x” e “y” (Carro Paz & González Gómez, 2012). Así, se obtienen las fórmulas de latitud y longitud de un nodo mediante las Ecuaciones (1) y (2).

$$Latitud_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot lat_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$Longitud_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot lon_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

En las Ecuaciones (1) y (2) el subíndice  $i$  representa el Punto en la tabla de datos en que se realiza el cálculo, el superíndice  $n$  indica el número total de puntos registrados, el parámetro  $w_i$  representa el peso asociado al Punto  $i$ . Para la Ecuación (1), la latitud de cada

Punto se registra en  $lat_i$ , del mismo modo en que para la Ecuación (2), cada latitud en un punto se registra en  $lon_i$ .

El algoritmo implementado se construye a partir de una variación del algoritmo de centro de gravedad para localizar instalaciones mediante la geocodificación de ubicaciones, según lo planteado por Salazar López (2021). La base del algoritmo inicial se adapta para diferenciar el uso de datos, ya que en el caso de los nodos cada punto cuenta con una coordenada de latitud y longitud previamente registrada en un archivo de información, por lo que no se requiere el segmento de geocodificación de datos para obtener dichas coordenadas. Por otra parte, se aplican correcciones para validar los datos leídos en cada archivo y garantizar el correcto funcionamiento del algoritmo, manteniendo la visualización de resultados en un mapa de calor final, como se presenta en el **Anexo 13**.

Así, un esquema para la obtención de la información relativa a cada instancia se muestra en:

### **1. Identificación de la comunidad**

- Inspección y filtro de las comunidades en el registro INE (Instituto Nacional de Estadísticas, 2019) dada su localidad (Regional) e identificación como entidad (Aldeas y Caseríos).
- Reconocimiento de comunidades propuestas en su localización geográfica mediante *Google Earth* y verificación de su cercanía a plantación forestal.

### **2. Identificación de la información espacial de la comunidad**

- Demarcación de polígonos de área que delimitan la comunidad y almacenamiento de estos mediante un archivo en *Google Earth*.
- Localización de marcadores en cada conjunto de viviendas o edificaciones que se representen como un clúster de concentración habitacional en un área.

### **3. Almacenamiento de información.**

- Creación de una planilla con el registro de las coordenadas (en grados decimales) de cada marcador para un clúster en una comunidad y registrar un valor de peso igual o equivalente 1 para cada punto.

- Almacenar todos los archivos de clúster de una comunidad en una carpeta para la instancia.

#### 4. Creación de nodos mediante centro de gravedad.

- Aplicar el algoritmo para la determinación del centro de gravedad geográfico en *Google Colab* para cada archivo de registro de marcadores en cada clúster, considerando sus coordenadas y peso definido.
- Creación de una planilla de registro de cada centro de gravedad para los clústeres de la instancia (Archivo de nodos de la instancia), considerando los resultados de los centros de gravedad como nodos y numerarlos.
- Realizar un conteo por inspección en el mapa del número de viviendas del clúster que se representa en un nodo, y actualizar el valor de peso para el nodo (en el archivo de nodos de la instancia) por el número de viviendas visualizadas en su clúster.

### 3.3.2.1 Resultados de nodos para cada instancia generada

Los resultados del centro de gravedad para cada clúster de viviendas dentro de una comunidad definen un total de 62 nodos generados mediante el uso del algoritmo implementado, dada la información registrada de los clústeres en el mapa.

El resumen de los nodos generados en cada instancia se presenta en Tablas (**Tabla 2** a **Tabla 12**), donde se incluye el número de viviendas pertenecientes a cada nodo y la información pertinente de cada instancia.

*Tabla 2: Coordenadas de nodos Instancia 1 (generada en 3.3)*

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 1	-36.9166153	-72.75081319	Caserío La Paz	18	18	1
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 2	-36.9152566	-72.7506928	Caserío La Paz	12	12	1
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 3	-36.9149073	-72.7550625	Caserío La Paz	5	5	2
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 4	-36.9185283	-72.75278767	Caserío La Paz	3	3	3
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 5	-36.9182182	-72.7503284	Caserío La Paz	5	5	4
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 6 JV	-36.9153709	-72.75498809	Caserío La Paz	1	1	JV

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3: Coordenadas de nodos instancia 2 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 1	-36.8438205	-72.921996	Aldea El Pino	14	14	Aldea El Pino
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 2	-36.8430532	-72.922022	Aldea El Pino	26	26	Aldea El Pino
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 3	-36.842684	-72.923862	Aldea El Pino	9	9	Aldea El Pino
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 4	-36.8417158	-72.9236162	Aldea El Pino	33	33	Aldea El Pino
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 5	-36.8409685	-72.92198375	Aldea El Pino	26	26	Aldea El Pino

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4: Coordenadas de nodos instancia 3 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 1	-36.8315703	-72.910615	Lotato	11	11	Lotato2
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 2	-36.830767	-72.910516	Lotato	4	4	Lotato2
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 3	-36.8304335	-72.91141575	Lotato	20	20	Lotato
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 4	-36.8298887	-72.91122367	Lotato	11	11	Lotato3

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5: Coordenadas de nodos instancia 4 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 1	-36.921007	-72.68314325	Población Esperanza	10	10	Población Esperanza Florida
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 2	-36.920932	-72.68227967	Población Esperanza	10	10	Población Esperanza Florida
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 3	-36.919542	-72.6831932	Población Esperanza	15	15	Población Esperanza Florida
<b>Biobío</b>	Concepción	Nodo 4	-36.9192107	-72.681214	Población Esperanza	4	4	Población Esperanza Florida

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6: Coordenadas de nodos instancia 5 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 1	-37.2007775	-73.5675685	Llico	82	82	Aldea Llico, Arauco
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 2	-37.199376	-73.56382375	Llico	62	62	Aldea Llico, Arauco
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 3	-37.1988478	-73.56683625	Llico	73	73	Aldea Llico, Arauco
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 4	-37.1965578	-73.56533925	Llico	21	21	Aldea Llico, Arauco
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 5	-37.1945674	-73.5653694	Llico	37	37	Aldea Llico, Arauco
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 6	-37.1955928	-73.5632215	Llico	24	24	Aldea Llico, Arauco

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 7: Coordenadas de nodos instancia 6 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 1	-37.1949987	-73.572107	Llico	19	19	Caserío Los Martínez, Arauco
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 2	-37.195305	-73.5714995	Llico	5	5	Caserío Los Martínez, Arauco
<b>Biobío</b>	Arauco	Nodo 3	-37.19437	-73.5716885	Llico	9	9	Caserío Los Martínez, Arauco

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 8: Coordenadas de nodos instancia 7 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Biobío</b>	Biobío	Nodo 1	-37.7402757	-72.224137	Los Canelos	12	12	Caserío Los Canelos, Mulchén
<b>Biobío</b>	Biobío	Nodo 2	-37.7411092	-72.22273783	Los Canelos	19	19	Caserío Los Canelos, Mulchén
<b>Biobío</b>	Biobío	Nodo 3	-37.7428085	-72.22107425	Los Canelos	17	17	Caserío Los Canelos, Mulchén
<b>Biobío</b>	Biobío	Nodo 4	-37.740713	-72.22074133	Los Canelos	4	4	Caserío Los Canelos, Mulchén
<b>Biobío</b>	Biobío	Nodo 5	-37.739135	-72.22049867	Los Canelos	6	6	Caserío Los Canelos, Mulchén

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9: Coordenadas de nodos instancia 8 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 1	-35.443209	-71.87275225	Corinto	19	19	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 2	-35.443891	-71.873217	Corinto	8	8	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 3	-35.4426797	-71.870308	Corinto	30	30	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 4	-35.4434122	-71.87009325	Corinto	13	13	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 5	-35.4415792	-71.8675126	Corinto	42	42	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 6	-35.4426395	-71.8668025	Corinto	28	28	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 7	-35.4412925	-71.864835	Corinto	39	39	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 8	-35.4420868	-71.861223	Corinto	34	34	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 9	-35.4408788	-71.8612332	Corinto	63	63	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 10	-35.441313	-71.8581985	Corinto	4	4	Aldea Corinto, Penciahue, Talca
<b>Maule</b>	Talca	Nodo 11	-35.44001	-71.8580215	Corinto	26	26	Aldea Corinto, Penciahue, Talca

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10: Coordenadas de nodos instancia 9 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
Maule	Talca	Nodo 1	-35.319114	-71.9528515	La Aguada	33	33	Batuco, Caseríos [1:La Aguada]
Maule	Talca	Nodo 2	-35.315916	-71.958713	Los Álamos	22	22	Batuco, Caseríos [2:Los Álamos]
Maule	Talca	Nodo 3	-35.3235543	-71.92948925	Villa Batuco	38	38	Batuco, Caseríos [3:Villa Batuco]
Maule	Talca	Nodo 4	-35.3151905	-71.9612685	Villa Los Naranjos	39	39	Batuco, Caseríos [4:Los Naranjos]
Maule	Talca	Nodo 5	-35.321574	-71.95617975	Batuco Centro	40	40	Batuco, Caseríos [5:Batuco Centro]

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11: Coordenadas de nodos instancia 10 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
Maule	Talca	Nodo 1	-35.0335762	-72.0409205	Rincón de Calpún	14	14	Caserío Calpún, Curepto
Maule	Talca	Nodo 2	-35.0314237	-72.0419485	Rincón de Calpún	21	21	Caserío Calpún, Curepto
Maule	Talca	Nodo 3	-35.0308653	-72.041384	Rincón de Calpún	17	17	Caserío Calpún, Curepto
Maule	Talca	Nodo 4	-35.0278595	-72.04009	Rincón de Calpún	6	6	Caserío Calpún 2

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 12: Coordenadas de nodos instancia 11 (generada en 3.3)**

Región	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso	Cantidad Casas	Polígono
Maule	Talca	Nodo 1	-35.2468278	-71.98772875	Gualleco	46	46	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 2	-35.2460248	-71.98539775	Gualleco	23	23	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 3	-35.2466948	-71.983044	Gualleco	34	34	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 4	-35.2450353	-71.98367125	Gualleco	23	23	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 5	-35.2433942	-71.9828375	Gualleco	18	18	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 6	-35.2456498	-71.981574	Gualleco	28	28	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 7	-35.2482163	-71.984147	Gualleco	21	21	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 8	-35.248092	-71.98170725	Gualleco	39	39	Aldea Gualleco, Curepto
Maule	Talca	Nodo 9	-35.2501548	-71.98248325	Gualleco	15	15	Aldea Gualleco, Curepto

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3 Resumen de comunidades en instancias generadas por región

A partir del análisis realizado de comunidades (aldeas y caseríos) identificadas en las regiones de Biobío y Maule, se consideraron un total de 11 instancias (en 3.3.2.1) que agrupan a 16 comunidades para la localización de reservorios de agua como se muestra en la **Tabla 13**.

**Tabla 13: Resumen de comunidades como instancias**

NOMBRE REGIÓN	NOMBRE PROVINCIA	NOMBRE ENTIDAD	CATEGORÍA	Nº VIVIENDAS DETERMINADAS	Nº VIVIENDAS INE
REGIÓN DEL BIOBÍO	CONCEPCIÓN	LOTATO	Caserío	44	37
REGIÓN DEL BIOBÍO	CONCEPCIÓN	EL PINO	Aldea	108	125
REGIÓN DEL BIOBÍO	CONCEPCIÓN	POBLACIÓN ESPERANZA	Caserío	46	25
REGIÓN DEL BIOBÍO	CONCEPCIÓN	LA PAZ	Caserío	39	24
REGIÓN DEL BIOBÍO	ARAUCO	LLICO	Aldea	299	282
REGIÓN DEL BIOBÍO	ARAUCO	LOS ROJAS	Caserío	23	12
REGIÓN DEL BIOBÍO	ARAUCO	LOS MARTÍNEZ	Caserío	33	22
REGIÓN DEL BIOBÍO	BIOBÍO	LOS CANELOS	Caserío	58	34
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	CORINTO	Aldea	306	271
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	BATUCO CENTRO	Caserío	40	22
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	LA AGUADA	Caserío	33	20
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	LOS ÁLAMOS	Caserío	22	17
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	VILLA BATUCO	Caserío	38	27
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	VILLA LOS NARANJOS	Caserío	39	29
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	RINCÓN DE CALPÚN	Caserío	58	33
REGIÓN DEL MAULE	TALCA	GUALLECO	Aldea	247	209

Fuente: Resumen datos obtenidos de Instituto Nacional de Estadísticas (2019)

### 3.4 Modelo Propuesto

El modelo propuesto está basado en la definición de Lee & Jeong (2025) para la implementación de localización de instalaciones, y formulado como un modelo de programación lineal entera mixta según el *Capacitated Facility Location Problem* (CFLP) adaptado para la localización de instalaciones en instancias reales propuestas (comunidades). La adaptación del modelo contempla la diversidad de características geográficas y de densidad habitacional en comunidades, con el objetivo es minimizar la distancia entre las

viviendas (en nodos) y los reservorios instalados. La cobertura se establece mediante la evaluación de distancias de nodo a reservorio, y no considera el factor de tiempo en abastecimiento de nodos por incertidumbre de: geografía, medios disponibles para el transporte de agua y conectividad vial en las comunidades.

De esta forma, la definición del modelo y su planteamiento considera los siguientes supuestos:

- Existe un registro de instancias sobre las cuales implementar una localización de instalaciones de reservorios de agua.
- Cada instancia registra un número de nodos identificados y localizados en coordenadas de latitud y longitud, como además de un peso o demanda por cada nodo.
- La demanda de cada nodo se establece como el número de viviendas que representa en el modelo.
- Existe un conjunto de locaciones candidatas para la instalación de reservorios de agua y se establece una cantidad máxima de reservorios para instalar.
- La capacidad máxima de cada posible reservorio de abastecimiento en cada locación es conocida y no debe ser excedida.
- Un solo reservorio se asigna a un nodo, evitando sobredimensionar demanda y problemas de eficiencia y asignación (nodos que queden sin abastecer o necesidad de reservorios de gran capacidad para abastecer nodos en común).
- No se considera un costo por instalación de un reservorio en una instancia.

Se plantea el modelo de programación matemática definido como:

❖ **Conjuntos.**

- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ : conjunto de nodos de demanda en una instancia, donde cada  $d_i$  representa una agrupación de viviendas en la comunidad mediante un punto coordinado (latitud/longitud).
- $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ : conjunto de localidades candidatas para instalar reservorios, donde cada  $f_j$  representa una ubicación posible (latitud/longitud).

❖ **Índices.**

- $i \in D$ : índice de nodos de demanda de una instancia ( $i = 1, \dots, n$ ).
- $n \in \mathbb{N} = \{1,2,3, \dots\}$ : índice de número máximo de nodos en una instancia.
- $j \in F$ : índice de localidades candidatas para instalar reservorios ( $j = 1, \dots, m$ ).
- $m \in \mathbb{N} = \{1,2,3, \dots\}$ : índice de número máximo de locaciones candidatas en una instancia.

❖ **Parámetros.**

- $w_i$ : demanda en el nodo “ $d_i$ ” de una instancia, establecida como la cantidad de viviendas representadas.
- $dist(d_i, f_j)$ : distancia (geodésica) entre el nodo “ $d_i$ ” y la ubicación del reservorio “ $f_j$ ”, calculada mediante coordenadas geográficas (latitud/longitud).
- $k$ : cantidad de reservorios propuestos a establecer en una instancia.
- $C_j$ : capacidad máxima de un reservorio instalado en una ubicación “ $f_j$ ” (número máximo de viviendas que abastece).

❖ **Variables de decisión.**

- $x_{ij}$ : binaria, 1 si el nodo “ $d_i$ ” es asignado a la instalación “ $f_j$ ”, 0 en otro caso ( $x_{ij} \in \{0,1\}$ ).
- $y_j$ : binaria, 1 si una instalación (reservorio) es abierta en la ubicación candidata “ $f_j$ ”, 0 en otro caso ( $y_j \in \{0,1\}$ ).

❖ **Función Objetivo:**

$$\min \sum_{i \in D} \sum_{j \in F} w_i \cdot dist(d_i, f_j) \cdot x_{ij} \quad (3)$$

❖ **Restricciones:**

1. Asignación de cada nodo a un único reservorio instalado:

$$\sum_{j \in F} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in D \quad (4)$$

2. Asignación de nodo a un reservorio solo si fue instalado:

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i \in D, \forall j \in F \quad (5)$$

3. Capacidad máxima cubierta por cada reservorio instalado:

$$\sum_{i \in D} w_i \cdot x_{ij} \leq C_j \cdot y_j, \quad \forall j \in F \quad (6)$$

4. Cantidad máxima “ $k$ ” de reservorios a ser instalados por instancia:

$$\sum_{j \in F} y_j \leq k \quad (7)$$

5. Dominio de variables y parámetros:

$$\forall x_{ij}, y_j \in \{0,1\}; \forall w_i, dist(d_i, f_j) \in \mathbb{R}^+; \forall k, C_j \in \mathbb{N} \quad (8)$$

Este modelo tiene por función objetivo (3) minimizar las distancias (ponderadas por demanda) entre los nodos de demanda y los reservorios asignados en una instancia. La distancia ponderada por la demanda de los nodos permite una asignación de reservorios dónde se atienden los nodos de mayor peso (número de viviendas) en una menor distancia, esta ponderación plantea el criterio de abastecer eficientemente nodos de alta demanda (como prioridad) en vez de solo asignar por menores distancias. Así, el modelo asigna la instalación más cercana de un reservorio que cumpla con la capacidad de abastecer la demanda del conjunto de nodos, de acuerdo a la ponderación “distancia  $\times$  demanda” de menor valor. Considerando que existe un conjunto de nodos y un conjunto de locaciones candidatas para los reservorios, se establece una restricción de cobertura donde todos los nodos deben ser abastecidos por un reservorio (4) (dos reservorios no pueden cubrir el mismo nodo), una restricción para asignar demanda solo a reservorios instalados (debe estar instalado para cubrir nodos) (5), una restricción de capacidad máxima del reservorio a no ser superada por la demanda de nodos cubiertos (6) y finalmente una restricción de número máximo de reservorios a instalarse en cada instancia (7) (mediante un parámetro “ $k$ ” propuesto) y los dominios de variables y parámetros (8).

## 3.5 Implementación

La necesidad de contar con locaciones candidatas para la instalación de reservorios en una instancia con el modelo CFLP se aborda mediante la asignación de ubicaciones obtenidas a partir del método de centro de gravedad, el cual permite identificar una ubicación óptima considerando la carga y la distancia entre nodos. Este enfoque se aplica en la localización de centros de distribución como una decisión estratégica de diseño (López Vargas et al., 2023).

### 3.5.1 Centro de gravedad y variaciones por instancia

Las locaciones candidatas para el modelo de programación lineal entera se definen a partir de los datos recopilados y ordenados en “**Resultados de nodos para cada instancia**”. Estos se utilizan para aplicar el algoritmo de centro de gravedad descrito en el **Anexo 13**, esta vez de manera individual por instancia. Los valores de peso de los nodos se determinan según el número de viviendas contabilizadas, y la visualización incluye el centro propuesto (marcador rojo) y los nodos (marcadores azules) en un mapa generado con *OpenStreetMap*.

Por otra parte, con el fin de comprobar la sensibilidad de los resultados y ampliar la cantidad de locaciones para reservorios, se implementa un sistema de variaciones teóricas basado en el método de iteraciones desarrollado por López Vargas et al. (2023). En este contexto, se plantean tres variaciones teóricas en cada instancia.

- **Variación 1:** Aumentar la cantidad de viviendas registradas en el nodo de menor peso en cada instancia hasta el mayor valor de peso de esta, con el fin de plantear una posibilidad crecimiento de viviendas del nodo de menor cantidad.
- **Variación 2:** Agregar un nuevo nodo de una concentración de viviendas no registrada dentro de la instancia inicial (primer resultado), o en su contraparte desagregar los nodos menos representativos para la instancia en materia de cercanía, peso y riesgo de incendio forestal. Esta variación busca representar cada instancia inicial proponiendo nuevos criterios para su definición como: ampliar la cobertura inicial,

centralizar la localización en sectores de mayor peso y evaluar mayor cobertura de reservorios en una instancia según sea el caso.

- **Variación 3:** Del resultado de la variación 2, se aumenta el doble del peso del nuevo nodo agregado a la instancia o del nodo de menor peso luego de desagregar nodos a la instancia, según sea el caso.

Así, en cada instancia propuesta se definen variaciones teóricas como:

#### **3.5.1.1 Instancia 1: Caserío La Paz, Florida.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 4 (menor peso = 3) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 18).
- Variación 2: Se agrega a la instancia nodo 7 con una concentración y peso de 4 casas.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 7 (peso = 8).

#### **3.5.1.2 Instancia 2: Aldea El Pino, Concepción.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 3 (menor peso = 9) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 33).
- Variación 2: Se agrega a la instancia nodo 6 con una concentración y peso de 6 casas.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 6 (peso aumentado = 12).

#### **3.5.1.3 Instancia 3: Caserío Lotato, Concepción.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 2 (menor peso = 4) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 20).
- Variación 2: Se agrega a la instancia nodo 5 con una concentración y peso de 7 casas.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 5 (peso aumentado = 14).

#### **3.5.1.4 Instancia 4: Caserío Población Esperanza, Florida.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 4 (menor peso = 4) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 15).
- Variación 2: Se agrega a la instancia nodo 5 con una concentración y peso de 12 casas.

- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 5 (peso aumentado = 24).

#### **3.5.1.5 Instancia 5: Aldea Llico, Arauco.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 4 (menor peso = 4) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 82).
- Variación 2: Se desagregan los nodos 5 y 6 de la instancia (nodos fuera de riego), y se agrega el caserío Los Rojas como nodo 5 con concentración y peso de 23 casas.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 5 (peso aumentado = 46).

#### **3.5.1.6 Instancia 6: Caserío Los Martínez, Arauco.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 2 (menor peso = 5) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 19).
- Variación 2: Se agrega caserío Los Rojas como nodo 4 con una concentración y peso de 23 casas.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 4 (peso aumentado = 46).

#### **3.5.1.7 Instancia 7: Caserío Los Canelos, Mulchén.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 4 (menor peso = 4) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 19).
- Variación 2: Se agrega a la instancia un nodo 6 con una concentración y peso de 2 casas.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 6 (peso aumentado = 4).

#### **3.5.1.8 Instancia 8: Aldea Corinto, Penco.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 10 (menor peso = 4) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 63).
- Variación 2: Se plantea la instancia dividida en 2 sectores, sector A con nodos del 1 al 6, y sector B con nodos del 7 al 11 (por disposición geográfica de la aldea).

- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 2 (peso aumentado = 16) en sector A, y se aumenta al doble el peso del nodo 10 (peso aumentado = 8) en sector B.

#### **3.5.1.9 Instancia 9: Caseríos Batuco, Pencahue.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 2 (menor peso = 22) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 40).
- Variación 2: Se desagrega el nodo 3 (Villa Batuco) del análisis de la instancia (por lejanía geográfica), se consideran los nodos 1, 2, 4 y 5 para la iteración.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 2 (peso aumentado = 44).

#### **3.5.1.10 Instancia 10: Caserío Calpún, Curepto.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 4 (menor peso = 6) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 21).
- Variación 2: Se desagrega el nodo 4 (por lejanía) del análisis de la instancia, y se consideran los nodos 1, 2 y 3 en la instancia.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta al doble el peso del nodo 1 (peso aumentado = 28).

#### **3.5.1.11 Instancia 11: Aldea Gualleco, Curepto.**

- Variación 1: Se iguala el peso del nodo 9 (menor peso = 15) al peso mayor de nodo de la instancia (peso = 46).
- Variación 2: Se agrega a la instancia un nodo 10 con una concentración y peso de 18 casas.
- Variación 3: Considerando la variación 2, se aumenta el valor del peso del nodo 10 al doble (peso aumentado = 36).

### **3.5.2 Localización de Instalaciones con Capacidad**

Planteando el desarrollo de un *CFLP*, se define la capacidad de un reservorio de agua a través de la información otorgada para la capacidad máxima de tanques de agua contra

incendios establecida en 3.000 metros cúbicos (o 3.000.000 litros) de agua (Synertech, 2025). Esto es aplicado en viviendas de un tamaño relativo de una vivienda social en Chile y con las consideraciones de uso agua por metro cuadrado ( $m^2$ ) para combatir focos de incendios en viviendas establecidos por bomberos.

Se tienen los siguientes datos para determinar la capacidad de cobertura por vivienda en cada reservorio:

- Tamaño de vivienda social: 55 metros cuadrados (MINVU, 2011).
- Caudal de agua por minuto y metros cuadrados: 15 litros por minuto (*min*) por metros cuadrados construidos (Escuela de Bomberos de Santiago, 2017).
- Tiempo mínimo para controlar foco de incendios: 20 minutos (Promedio tiempo sugerido para controlar incendios forestales (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017) y tiempo sugerido para el combate de incendios en estructuras (Sephton & Eng, 2018)).

Aplicando la conversión de unidades por regla de 3, se obtiene un estimado de la cantidad de litros ( $L$ ) demandados por vivienda para controlar un foco de incendio como muestra la Ecuación (9).

$$\frac{55m^2}{vivienda} \times \frac{15 L}{min \cdot m^2} \times 20 min = 16500 \frac{L}{vivienda} \quad (9)$$

Al considerar la estimación de 3.000.000 litros de agua como capacidad máxima por estanque en un reservorio, la cantidad máxima de viviendas abastecidas por un reservorio (con un estanque por reservorio) para controlar focos de incendios se estima por la Ecuación (10).

$$3.000.000 \frac{L}{Estanque} \times \frac{vivienda}{16.500 L} = 181,8 \frac{vivienda}{Estanque} \quad (10)$$

Mediante los resultados obtenidos para la capacidad de abastecimiento hídrico de viviendas en incendios forestales, se propone un alcance aproximado de 200 viviendas por reservorio en comunidades como aldeas y de 100 viviendas por reservorios en caseríos. En la aplicación real se contempla la posibilidad de instalar más de un estanque por reservorio y

de otras capacidades en comunidades, y en el modelo se utilizan las capacidades cercanas a la estimación obtenida. Finalmente, se establece un máximo de dos reservorios a instalar en cada instancia, con el fin de cubrir las demandas que superen la capacidad máxima de un reservorio sin sobredimensionar el número de reservorios para instalar.

Con los datos generados para el modelo *CFLP*, se realiza la implementación del modelo propuesto en la sección **3.4** utilizando Python versión 3.11. La formulación considera la implementación de Ur Rehman (2020) como base para el modelo *CFLP*, añadiendo la función para determinar distancias geográficas reales y herramientas de visualización de resultados mediante las librerías *geopy* y *folium* como se realizó en la sección **0**. El modelo es resuelto mediante las herramientas de modelación la librería *PuLP* considerando los datos propuestos en cada instancia. El código formulado (**Anexo 25**) resuelve la localización de reservorios de agua a partir del registro de nodos y demandas en una instancia y del registro de locaciones candidatas para reservorios almacenados en documentos *Excel* (un registro de nodos y demandas, y un registro de locaciones candidatas), además visualiza los resultados de asignación en un documento *Excel* generado y la representación gráfica en un mapa de calor didáctico (mostrándose nodos y reservorios asignados en la instancia).

## 4. Resultados

En el siguiente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de la implementación del método de centro de gravedad y del modelo CFLP, aplicados a las 11 instancias definidas.

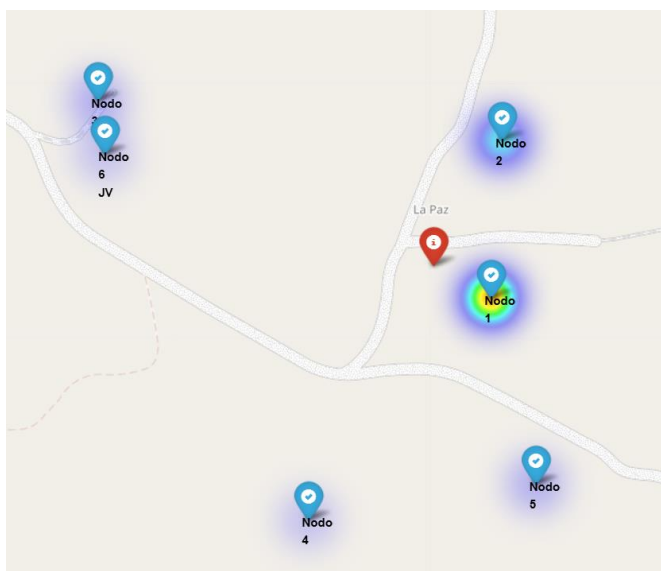
### 4.1 Resultados teóricos mediante centro de gravedad

Mediante el método de centro de gravedad y considerando las variaciones propuestas para la localización de instalaciones en cada caso, como resultado del método se obtiene:

- Un mapa de la instancia (variación 0) donde se visualizan los nodos (marcadores azules) y la localización del reservorio (marcador rojo).
- La representación como mapa de calor de los nodos de mayor peso (número de viviendas registradas en 3.3.2.1) en el mapa, representando los nodos de mayor valor en colores cálidos (amarillo, naranja y rojo) y los de menor en colores fríos (verde y azul) difuminados.
- Tablas resumen (Tabla 14 a Tabla 24) de los resultados de la aplicación del método en las variaciones de las instancias, registrándose las coordenadas de localización propuesta para el reservorio.

#### ❖ Instancia 1: Caserío La Paz, Florida

Figura 8: Centro de gravedad inicial, La Paz.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Centros de gravedad, La Paz.

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-36.91633494	-72.75143765
1	-36.91689258	-72.75178088
2	-36.91620315	-72.75107464
3	-36.91609164	-72.75076747

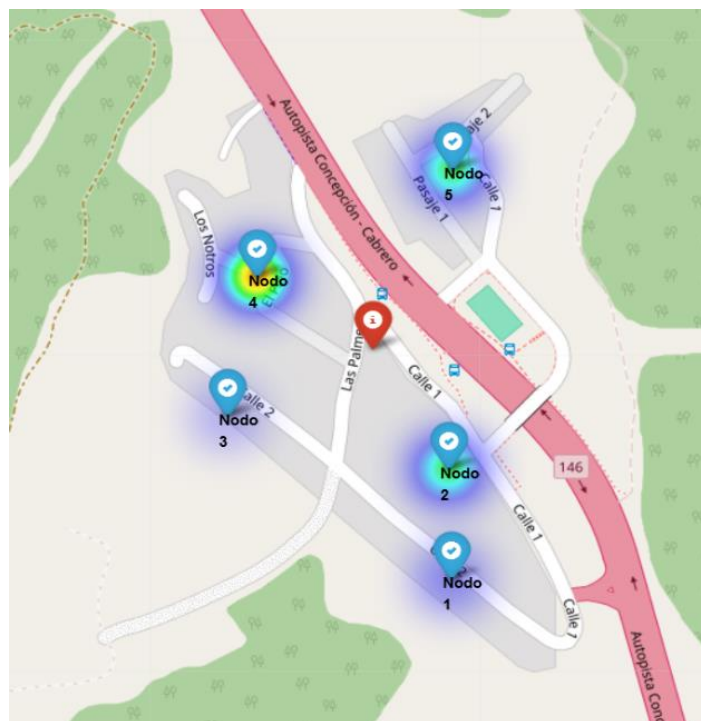
Fuente: Elaboración Propia

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la Tabla 14 se muestran en Anexo 14.

Los pesos de nodos en **Figura 8**, a partir de **Tabla 2**, son: Nodo 1 (18), Nodo 2 (12), Nodo 3 (5), Nodo 4 (3), Nodo 5 (5) y Nodo 6 JV (1).

❖ **Instancia 2: Aldea El Pino, Concepción.**

**Figura 9: Centro de gravedad inicial, El Pino.**



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 15: Centros de gravedad, El Pino.**

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-36.84221138	-72.92264987
1	-36.84229731	-72.92287026
2	-36.84230392	-72.92275637
3	-36.8423872	-72.92285222

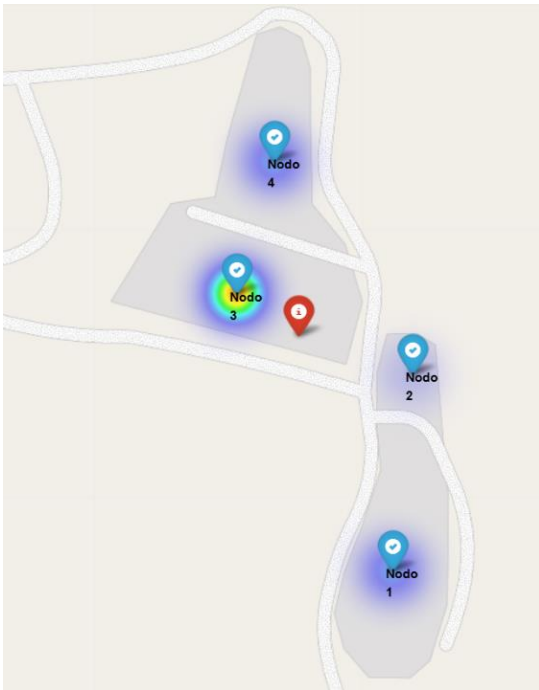
Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 15** se muestran en **Anexo 15**.

Los pesos de nodos en **Figura 9** son: Nodo 1 (14), Nodo 2 (26), Nodo 3 (9), Nodo 4 (33) y Nodo 5 (26), según muestra la **Tabla 3**.

❖ **Instancia 3: Caserío Lotato, Concepción.**

**Figura 10:** Centro de gravedad inicial, Lotato.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 16:** Centros de gravedad, Lotato.

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-36.83060405	-72.91110009
1	-36.8306461	-72.91094936
2	-36.8305067	-72.9113468
3	-36.83043207	-72.91153594

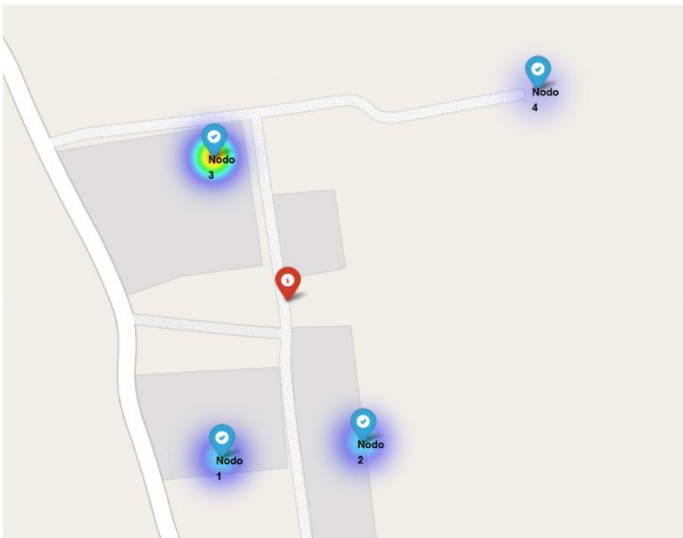
Fuente: Elaboración propia

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 16** se muestran en **Anexo 16**.

Los pesos de nodos en **Figura 10** son: Nodo 1 (11), Nodo 2 (4), Nodo 3 (20) y Nodo 4 (11), según muestra la **Tabla 4**.

❖ **Instancia 4: Caserío Población Esperanza, Florida.**

**Figura 11:** Centro de gravedad inicial, P. Esperanza.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 17:** Centros de gravedad, P. Esperanza.

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-36.92024007	-72.68274316
1	-36.9200136	-72.68240674
2	-36.92138429	-72.68283859
3	-36.92209261	-72.68289767

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 17** se muestran en **Anexo 17**.

Los pesos de nodos en **Figura 11** son: Nodo 1 (10), Nodo 2 (10), Nodo 3 (15) y Nodo 4 (4), según muestra la **Tabla 5**.

❖ **Instancia 5: Aldea Llico, Arauco.**

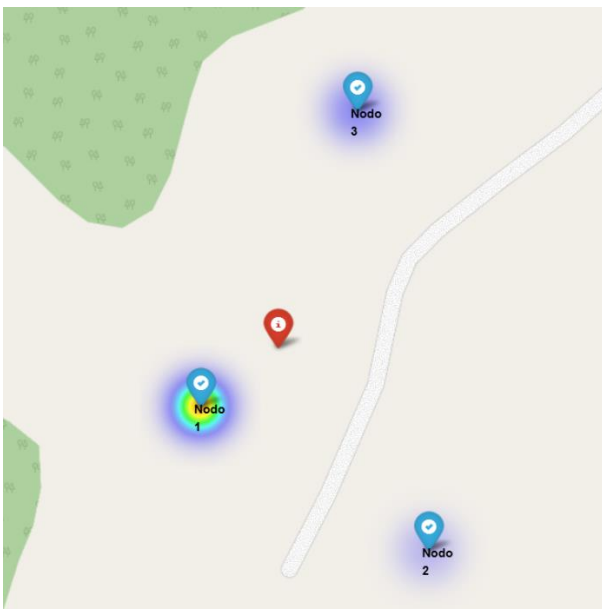
**Figura 12:** Centro de gravedad inicial, Llico.



Fuente: Elaboración propia.

❖ **Instancia 6: Caserío Los Martínez, Arauco.**

**Figura 13:** Centro de gravedad inicial, Los Martínez.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 18:** Centros de gravedad, Llico.

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-37.19853473	-73.5658356
1	-37.19819974	-73.56575149
2	-37.19943413	-73.56663314
3	-37.19942235	-73.56701986

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 18** se muestran en **Anexo 18**.

Los pesos de nodos en **Figura 12** son: Nodo 1 (82), Nodo 2 (62), Nodo 3 (73), Nodo 4 (21), Nodo 5 (37) y Nodo 6 (24), según muestra la **Tabla 6**.

**Tabla 19:** Centros de gravedad, Los Martínez.

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-37.19487367	-73.57190082
1	-37.19500215	-73.57178128
2	-37.19668701	-73.57169851
3	-37.19744448	-73.57161401

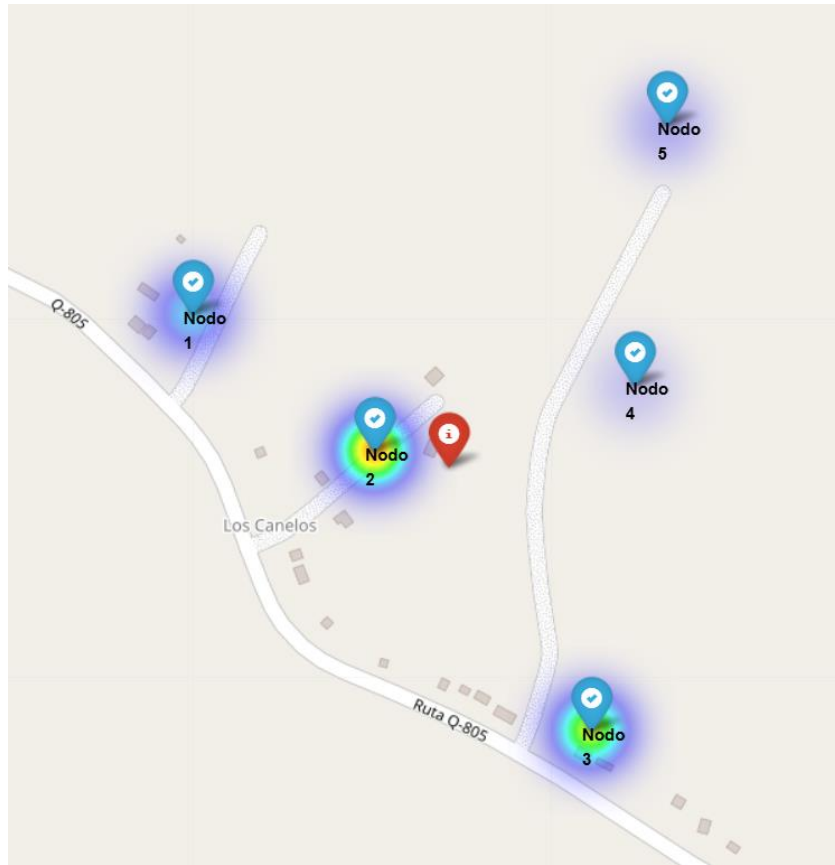
Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 19** se muestran en **Anexo 19**.

Los pesos de nodos en **Figura 13** son: Nodo 1 (19), Nodo 2 (5) y Nodo 3 (9), según muestra la **Tabla 7**.

❖ **Instancia 7: Caserío Los Canelos, Mulchén.**

**Figura 14: Centro de gravedad inicial, Los Canelos.**



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 20: Centros de gravedad, Los Canelos.**

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-37.74120327	-72.22217039
1	-37.74110253	-72.22187675
2	-37.74104993	-72.22199152
3	-37.74090648	-72.2218242

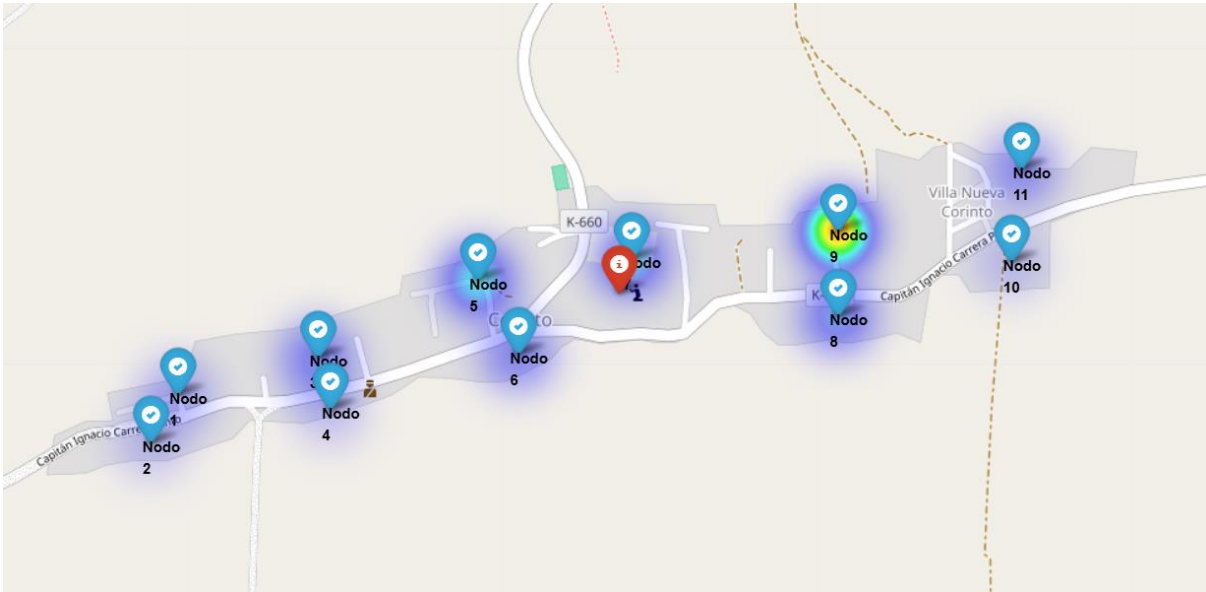
Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 20** se muestran en **Anexo 20**.

Los pesos de nodos en **Figura 14** son: Nodo 1 (12), Nodo 2 (19), Nodo 3 (17), Nodo 4 (4) y Nodo 5 (6), según muestra la **Tabla 8**.

❖ **Instancia 8: Aldea Corinto, Pencahue.**

**Figura 15: Centro de gravedad inicial, Corinto.**



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 21: Centros de gravedad, Corinto.**

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
<b>0</b>	-35.44176247	-71.86504468
<b>1</b>	-35.44168982	-71.86393804
<b>2A</b>	-35.44255059	-71.86924629
<b>2B</b>	-35.44109779	-71.86150115
<b>3A</b>	-35.44262305	-71.86946092
<b>3B</b>	-35.44110286	-71.86142344

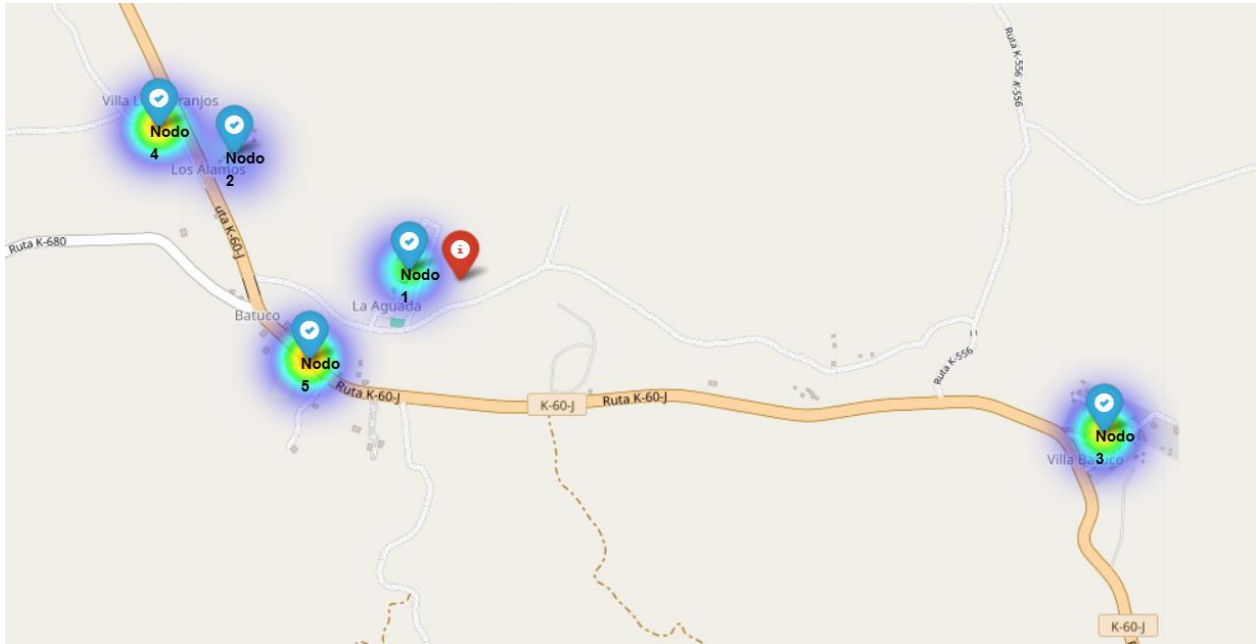
Fuente: Elaboración propia.

Los pesos de nodos en **Figura 15**, a partir de **Tabla 9**, son: Nodo 1 (19), Nodo 2 (8), Nodo 3 (30), Nodo 4 (13), Nodo 5 (42), Nodo 6 (28), Nodo 7 (39), Nodo 8 (34), Nodo 9 (63), Nodo 10 (4) y Nodo 11 (26).

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 21** se muestran en **Anexo 21**.

❖ **Instancia 9: Caseríos Batuco, Pencahue.**

**Figura 16: Centro de gravedad inicial, Batuco.**



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22: Centros de gravedad, Batuco.**

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-35.3193684	-71.9511223
1	-35.31904133	-71.9518414
2	-35.31818137	-71.9572571
3	-35.31786189	-71.9574624

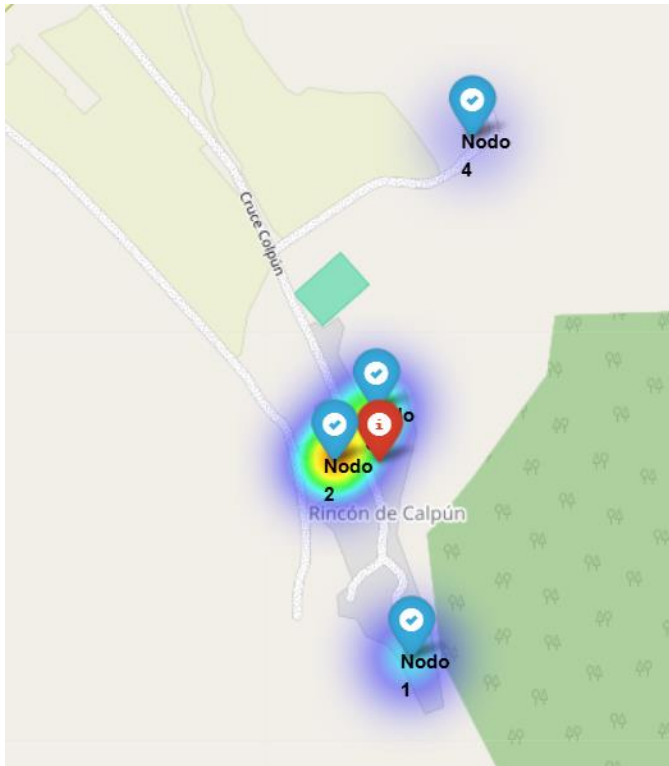
Fuente: Elaboración propia.

Los pesos de nodos en **Figura 16**, a partir de **Tabla 10**, son: Nodo 1 (33), Nodo 2 (22), Nodo 3 (38), Nodo 4 (39) y Nodo 5 (40).

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 22** se muestran en **Anexo 22**.

❖ **Instancia 10: Caserío Calpún, Curepto.**

**Figura 17: Centro de gravedad inicial, Calpún.**



Fuente: Elaboración propia.

Los pesos de nodos en **Figura 17**, a partir de **Tabla 11**, son: Nodo 1 (14), Nodo 2 (21), Nodo 3 (17) y Nodo 4 (6).

**Tabla 23: Centros de gravedad, Calpún.**

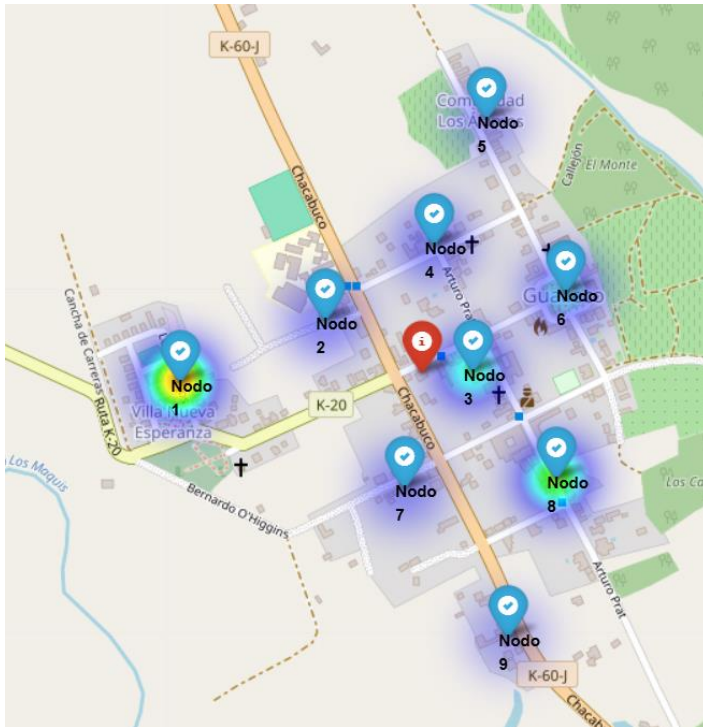
Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-35.03141093	-72.0413426
1	-35.03068118	-72.0410853
2	-35.03182071	-72.0414872
3	-35.0321931	-72.041367

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 23** se muestran en **Anexo 23**.

❖ **Instancia 11: Aldea Gualleco, Curepto.**

**Figura 18: Centro de gravedad inicial, Gualleco.**



Fuente: Elaboración propia.

Los pesos de nodos en **Figura 18**, a partir de **Tabla 12**, son: Nodo 1 (46), Nodo 2 (23), Nodo 3 (34), Nodo 4 (23), Nodo 5 (18), Nodo 6 (28), Nodo 7 (21), Nodo 8 (39) y Nodo 9 (15).

**Tabla 24: Centros de gravedad, Gualleco.**

Localizaciones de centros		
variación	Latitud	Longitud
0	-35.24670372	-71.983861
1	-35.24708854	-71.9837074
2	-35.24747929	-71.9833049
3	-35.24814215	-71.9828295

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos para los centros de gravedad en las variaciones 1, 2 y 3 de la **Tabla 24** se muestran en **Anexo 24**.

## 4.2 Resultados Implementación *CFLP*.

Los resultados de implementación del modelo CFLP definido en “**Modelo Propuesto**”, consideran el uso de las locaciones para centros obtenidas de “**Resultados teóricos mediante centro de gravedad**” para formar el conjunto de locaciones de reservorios en cada instancia. Además, utiliza los nodos y pesos definidos en cada instancia vistos en “**Resultados de nodos para cada instancia generada**”, la capacidad de reservorio propuesta en “**Localización de Instalaciones con Capacidad**” y el número máximo de reservorios definidos en esta sección.

El resultado del modelo en una instancia asigna la instalación de dos reservorios entre las cuatro (a seis) locaciones candidatas, donde se minimiza la suma de las distancias (en kilómetros) entre nodos y reservorios en las posibles combinaciones ponderada por el peso de cada nodo, entregando el resultado óptimo de localización (función objetivo). Los dos reservorios asignados como resultado del modelo abastecen los nodos de la instancia, siendo cada nodo cubierto por un solo reservorio optimizando las distancias y capacidades de abastecimiento.

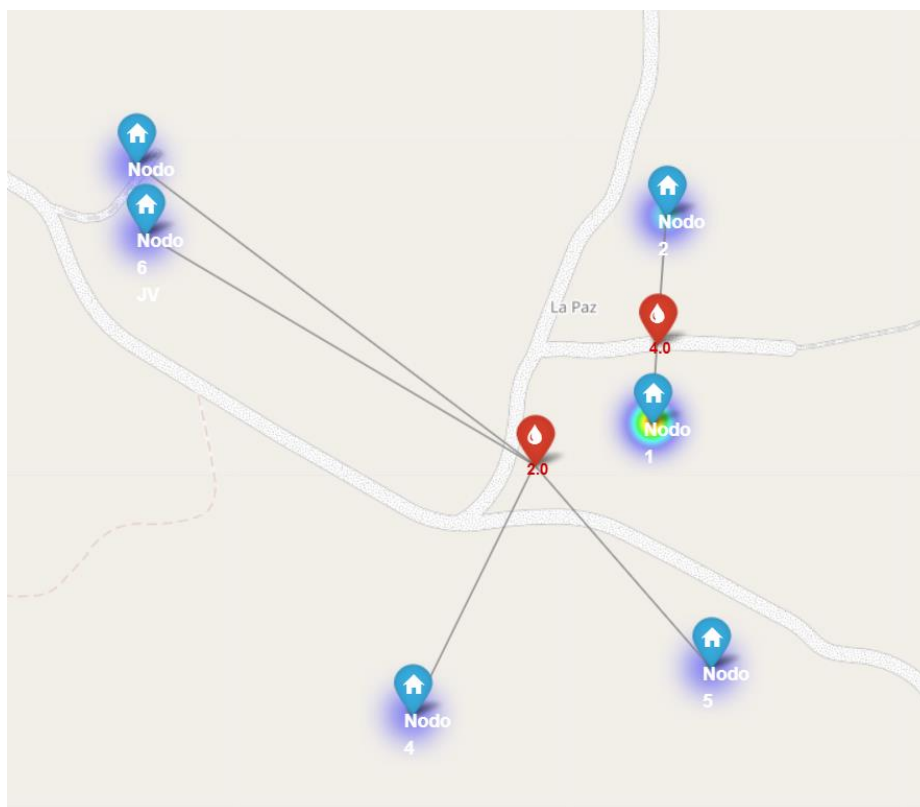
Para la instancia “Caserío La Paz” de Florida, los nodos y pesos se obtienen de **Tabla 2**, siendo estos: Nodo 1 (18), Nodo 2 (12), Nodo 3 (5), Nodo 4 (3), Nodo 5 (5) y Nodo 6 JV (1) respectivamente. Las locaciones candidatas para reservorios, a partir de **Tabla 14**, se definen como: Reservorio 1 (variación 0: -36.91633494, -72.75143765), Reservorio 2 (variación 1: -36.91689258, -72.75178088), Reservorio 3 (variación 2: -36.91620315, -72.75107464) y Reservorio 4 (variación 3: -36.91609164, -72.75076747), considerando coordenadas de latitud y longitud. La capacidad de cada reservorio se establece de 100 viviendas (propuesta como capacidad máxima de un reservorio en un caserío).

El resultado óptimo del modelo, en “Caserío La Paz”, asigna la instalación de los reservorios 2 y 4 (**Figura 19**), considerando un valor de función objetivo de 5,9133, establecida mediante la ponderación de las demandas de los nodos y la distancia en kilómetros (km) entre reservorio al nodo cubierto. El valor del resultado de la función objetivo representa un indicador que permite evaluar las asignaciones del modelo, siendo el óptimo el mínimo valor generado en las posibles asignaciones.

Análogamente, los resultados de localización de reservorios mediante el modelo *CFLP*, se visualizan en un mapa de calor para cada instancia con su cobertura de nodos, como se muestra a continuación.

❖ **Instancia 1: Caserío La Paz, Florida.**

**Figura 19: Resultados CFLP, La Paz.**

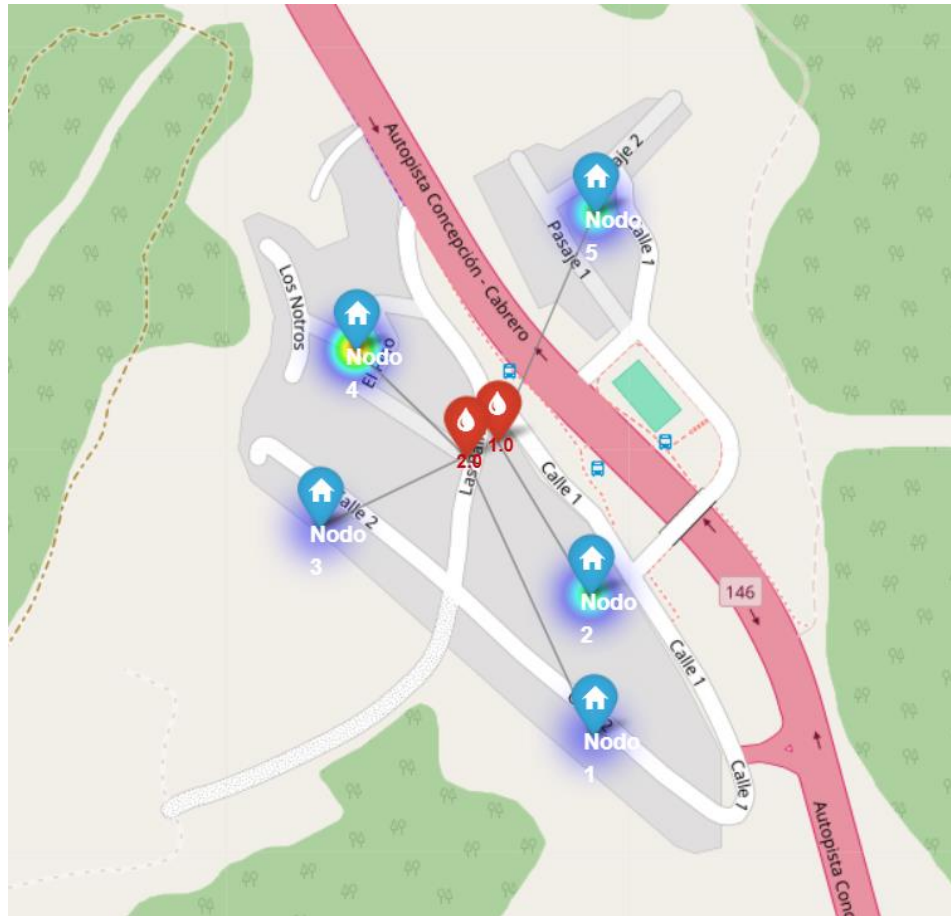


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 5,9133 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 14**) obtenidas en la variación 1 (reservorio 2) y en la variación 3 (reservorio 4) para la instalación de reservorios de agua, con capacidad máxima de abastecer a 100 viviendas cada uno. Los reservorios (marcadores rojos 2.0 y 4.0) cubren las demandas de las viviendas en los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 3 (5), Nodo 4 (3), Nodo 5 (5) y Nodo 6 (1), asignados a reservorio 2; Nodo 1 (18) y Nodo 2 (12), asignados a reservorio 4, como se muestra en **Figura 19** y se registra en **Anexo 26**.

❖ **Instancia 2: Aldea El Pino, Concepción.**

**Figura 20: Resultados CFLP, El Pino.**

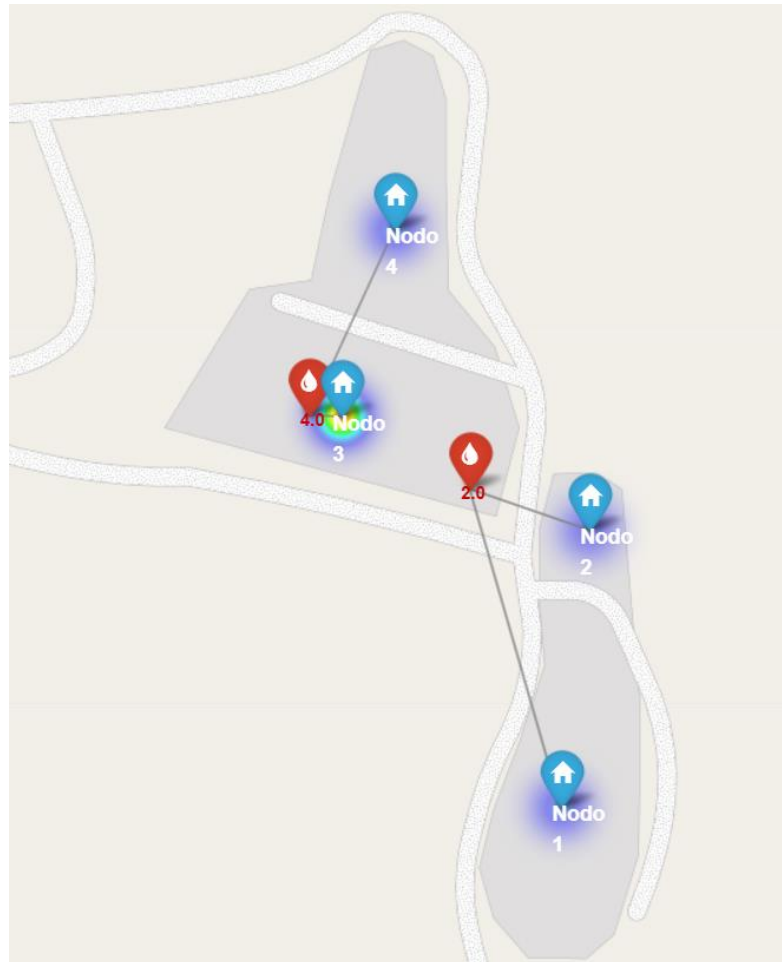


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 13,2864 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 15**) obtenidas en la variación 0 o inicial (reservorio 1) y en la variación 1 (reservorio 2) para la instalación de reservorios de agua, con una capacidad máxima de abastecimiento a 200 viviendas cada uno. Los reservorios (marcadores rojos 1.0 y 2.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(14), Nodo 3(9) y Nodo 4(33), asignados a reservorio 2; Nodo 2(26) y Nodo 5(26), asignados a reservorio 1 como se muestra en **Figura 20** y se registra en **Anexo 27**.

❖ **Instancia 3: Caserío Lotato, Concepción.**

**Figura 21: Resultados CFLP, Lotato.**

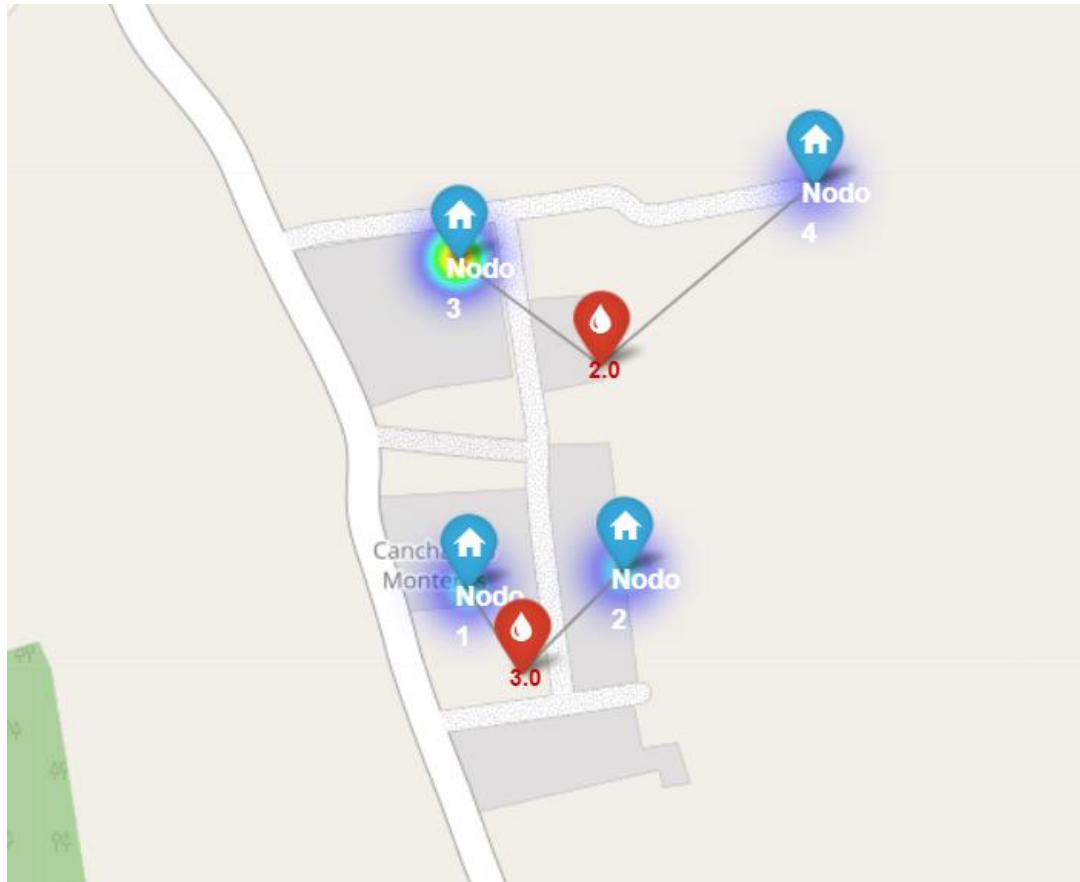


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 2,2837 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 16**) obtenidas en la variación 1 (reservorio 2) y en la variación 3 (reservorio 4) para la instalación de reservorios de agua, con una capacidad máxima de abastecimiento de 100 viviendas en cada uno. Los reservorios (marcadores rojos 2.0 y 4.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(11) y Nodo 2(4), asignados a reservorio 2; Nodo 3(20) y Nodo 4(11), asignados a reservorio 4 como se muestra en **Figura 21** y se registra en **Anexo 28**.

❖ **Instancia 4: Caserío Población Esperanza, Florida.**

**Figura 22: Resultados CFLP, Población Esperanza.**

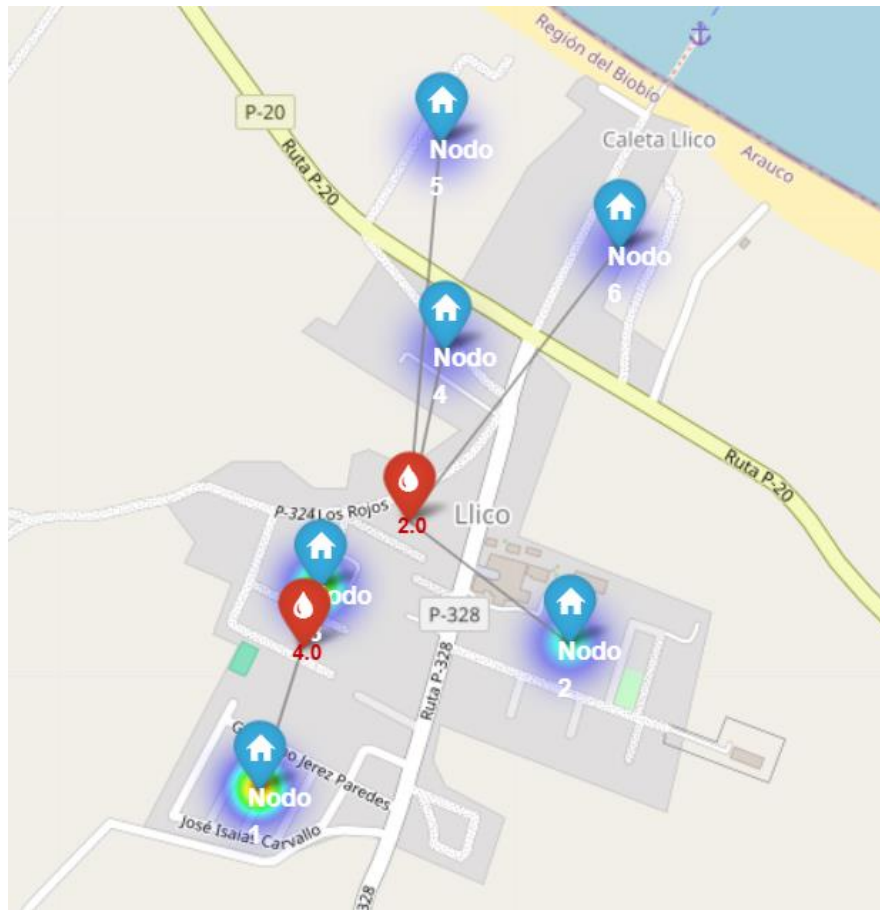


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 3,0728 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 17**) obtenidas en la variación 1 (reservorio 2) y de la variación 2 (reservorio 3) para la instalación de reservorios de agua, con una capacidad máxima de abastecimiento de 100 viviendas en cada uno. Los reservorios (marcadores rojos 2.0 y 3.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(10) y Nodo 2(10), asignados a reservorio 3; Nodo 3(15) y Nodo 4(4), asignados a reservorio 2 como se muestra en **Figura 22** y se registra en **Anexo 29**.

❖ **Instancia 5: Aldea Llico, Arauco.**

**Figura 23: Resultados CFLP, Llico.**

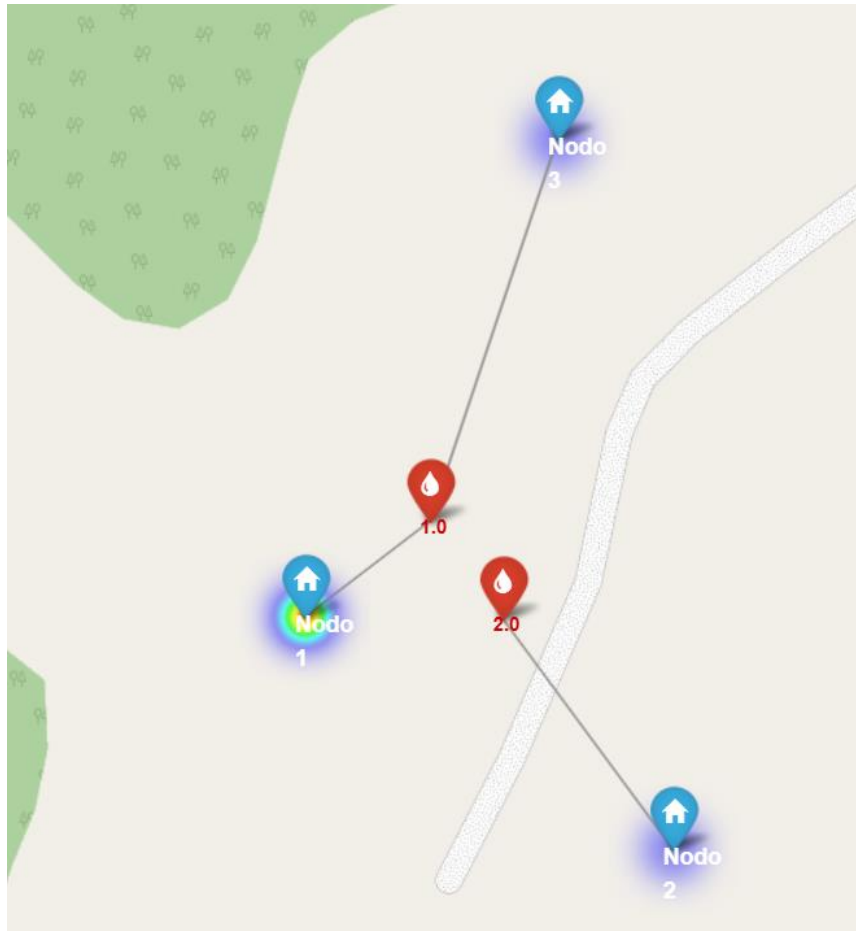


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 58,7757 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 18**) obtenidas en la variación 1(reservorio 2) y de la variación 3(reservorio 4) para la instalación de reservorios de agua, con una capacidad máxima de abastecimiento de 200 viviendas por cada reservorio. Los reservorios (marcadores rojos 2.0 y 4.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules), distribuidas como: Nodo 2(62), Nodo 4(21), Nodo 5(37) y Nodo 6(24) asignados a reservorio 2; Nodo 1(82) y Nodo 3(73) asignados a reservorio 4 como se muestra en **Figura 23**, y registrado en **Anexo 30**.

❖ **Instancia 6: Caserío Los Martínez, Arauco.**

**Figura 24: Resultados CFLP, Los Martínez.**

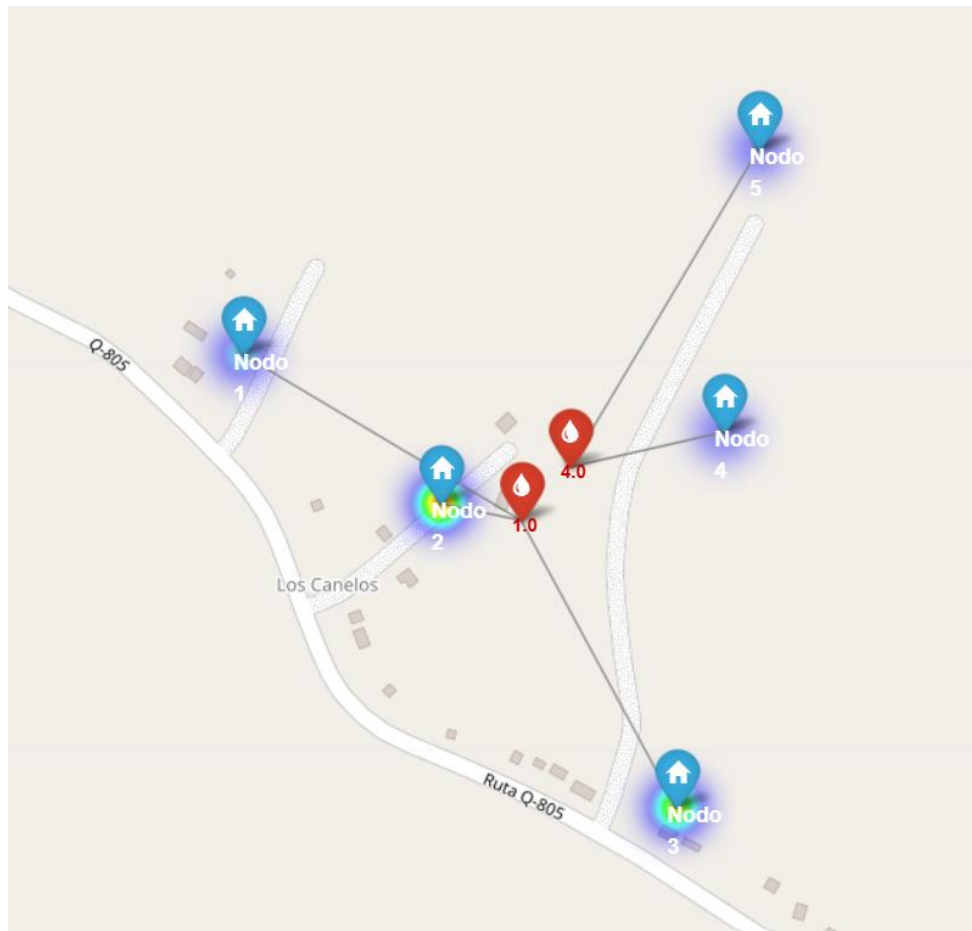


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 1,1769 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 19**) obtenidas en la variación 0 o inicial (reservorio 1) y en la variación 1 (reservorio 2) para la instalación de reservorios de agua, con una capacidad máxima de abastecimiento de 100 viviendas en cada reservorio. Los reservorios (marcadores rojos 1.0 y 2.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(19) y Nodo 3(9), asignados a reservorio 1; Nodo 2(5) asignado a reservorio 2, como se muestra en **Figura 24** y se registra en **Anexo 31**.

❖ **Instancia 7: Caserío Los Canelos, Mulchén.**

**Figura 25: Resultados CFLP, Los Canelos.**

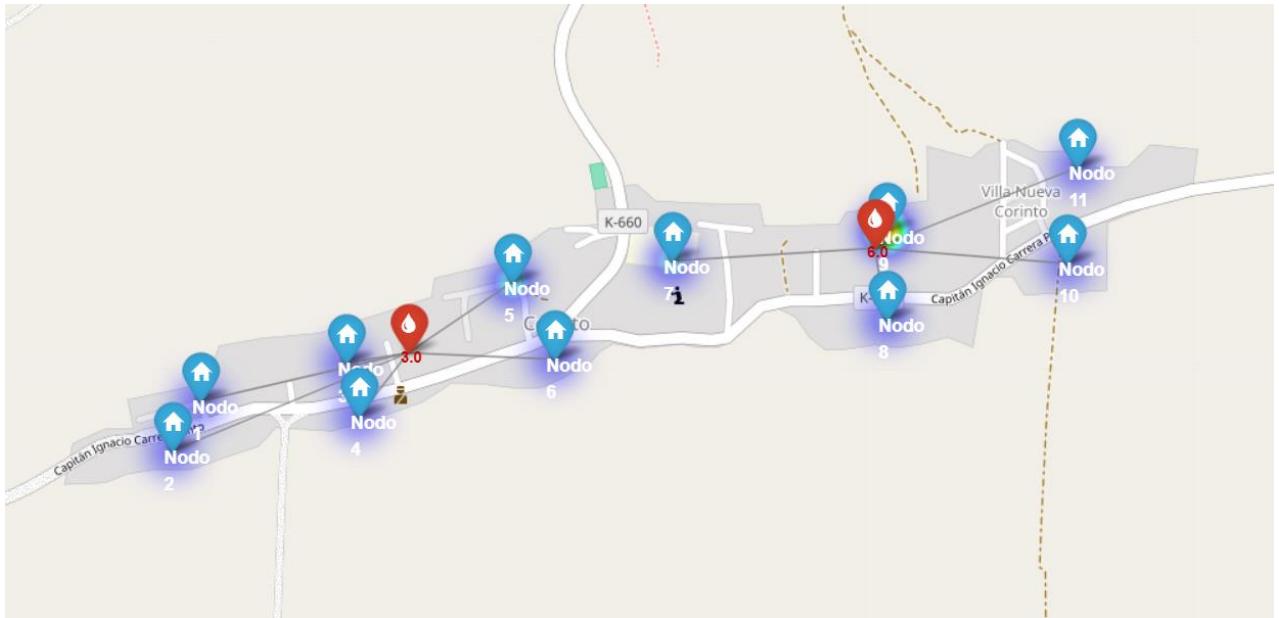


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 8,5991 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 20**) obtenidas en la variación 0 o inicial (reservorio 1) y en la variación 3 (reservorio 4) para la instalación de reservorios de agua, con capacidad máxima de abastecimiento de 100 viviendas por cada reservorio. Los reservorios (marcadores rojos 1.0 y 4.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(12), Nodo 2(19) y Nodo 3(17), asignados a reservorio 1; Nodo 4(4) y Nodo 5(6), asignados a reservorio 4, como se muestra en **Figura 25** y se registra en **Anexo 32**.

## ❖ Instancia 8: Aldea Corinto, Pencahue.

Figura 26: Resultados CFLP, Corinto.

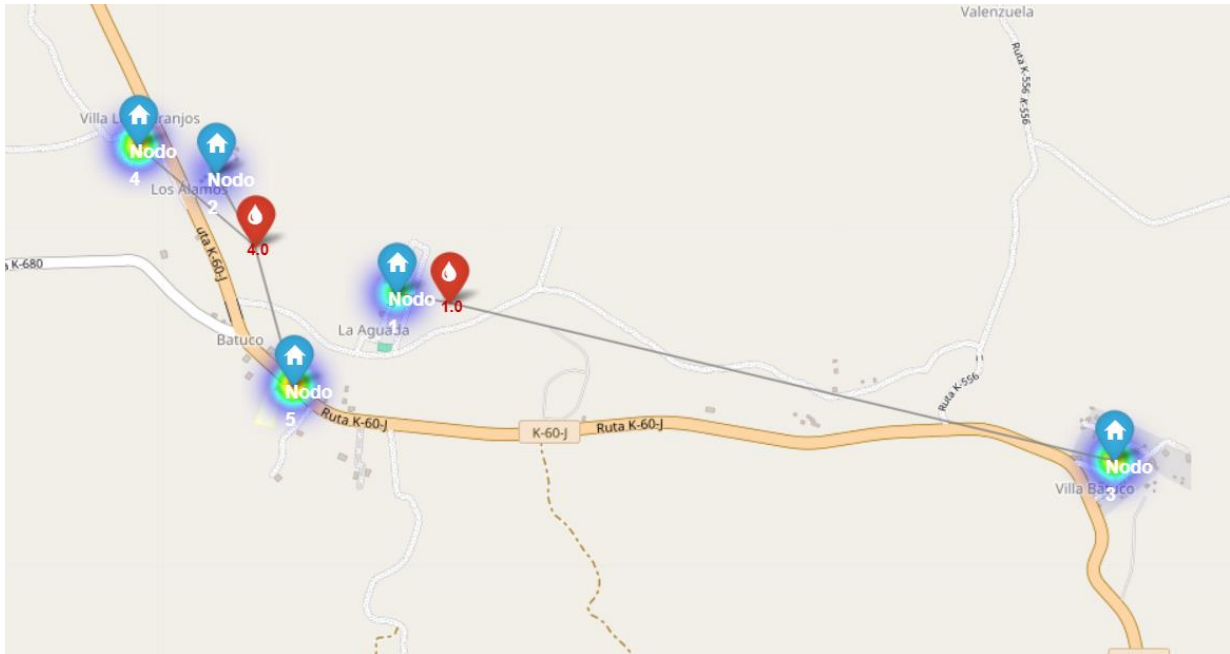


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 55,6555 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 21**) obtenidas en la variación 2A (reservorio 3) y de la variación 3B (reservorio 6) para la instalación de reservorios de agua, con capacidad máxima de abastecimiento de 200 viviendas por cada reservorio. Los reservorios (marcadores rojos 3.0 y 6.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(19), Nodo 2(8), Nodo 3(30), Nodo 4(13), Nodo 5(42) y Nodo 6(28) asignados a reservorio 3; y Nodo 7(39), Nodo 8(34), Nodo 9(63), Nodo 10(4) y Nodo 11(26) asignados a reservorio 6, como se muestra en **Figura 26**, y registrado en **Anexo 33**.

## ❖ Instancia 9: Caseríos Batuco, Pencahue.

Figura 27: Resultados CFLP, Batuco.



Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 122,3371 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 22**) obtenidas en la variación 0 o inicial (reservorio 1) y en la variación 3 (reservorio 4) para la instalación de reservorios de agua, con capacidad máxima de abastecimiento de 200 viviendas por cada reservorio. Los reservorios (marcadores rojos 1.0 y 4.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(33) y Nodo 3(38), asignados a reservorio 1; Nodo 2(22), Nodo 4(39) y Nodo 5(40), asignados a reservorio 4, como se muestra en **Figura 27** y se registra en **Anexo 34**.

❖ **Instancia 10: Caserío Calpún, Curepto.**

**Figura 28: Resultados CFLP, Calpún.**

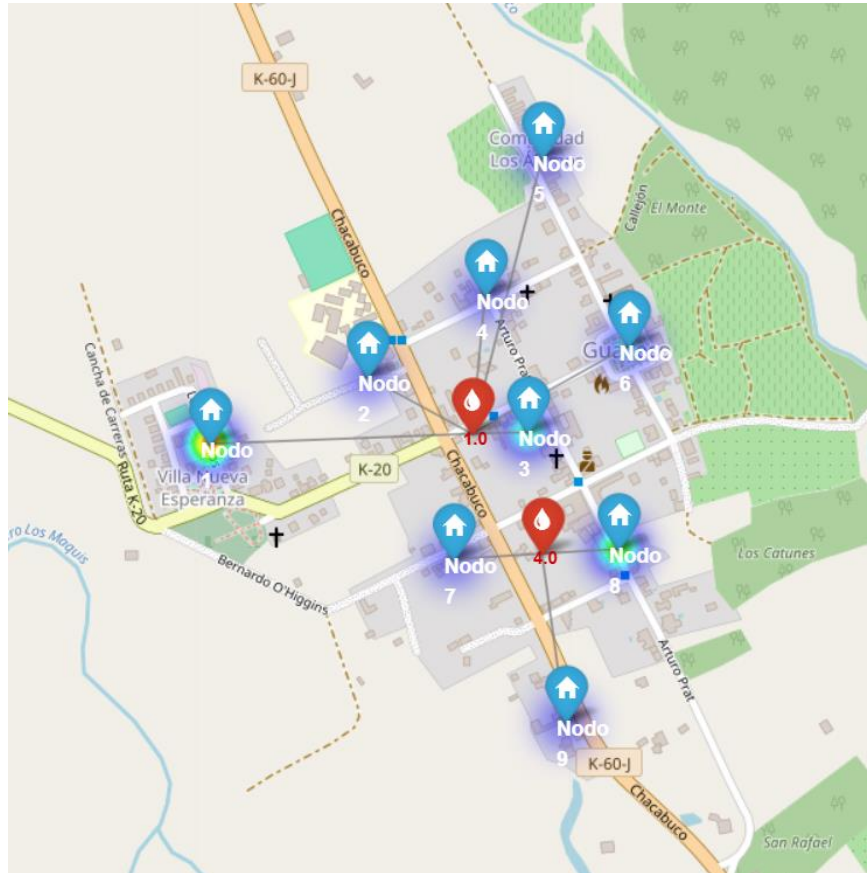


Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 6,6354 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 23**) obtenidas en la variación 1 (reservorio 2) y la variación 2 (reservorio 3) para la instalación de reservorios de agua, con capacidad máxima de abastecimiento de 100 viviendas por cada reservorio. Los reservorios (marcadores rojos 2.0 y 3.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(14) y Nodo 2(21), asignados a reservorio 3; Nodo 3(17) y Nodo 4(6), asignados a reservorio 2, como se muestra en **Figura 28** y se registra en **Anexo 35**.

❖ **Instancia 11: Aldea Gualleco, Curepto.**

**Figura 29: Resultados CFLP, Gualleco.**



Fuente: Elaboración propia.

Con valor óptimo de 50,0624 ( $\text{km} \times \text{número de viviendas}$ ), como resultado mínimo de la sumatoria de ponderaciones entre demandas de nodos y las distancias hacia las locaciones candidatas en la función objetivo, el modelo asigna las locaciones (**Tabla 24**) obtenidas en la variación 0 o inicial (reservorio 1) y la variación 3 (reservorio 4) para la instalación de reservorios de agua, con capacidad máxima de abastecimiento de 200 viviendas por cada reservorio. Los reservorios (marcadores rojos 1.0 y 4.0) cubren las demandas de los nodos (marcadores azules) distribuidas como: Nodo 1(46), Nodo 2(23), Nodo 3(34), Nodo 4(23), Nodo 5(18) y Nodo 6(28), asignados a reservorio 1; Nodo 7(21), Nodo 8(39) y Nodo 9(15), asignados a reservorio 4, como se muestra en **Figura 29** y se registra en **Anexo 36**.

Los resultados del modelo CFLP para localización de reservorios en cada instancia se muestran en **Tabla 25**, con la información resumen de los reservorios instalados por cada instancia, la distancia total entre los nodos y reservorios instalados (sumatoria de todas las distancias en km), la distancia promedio entre un reservorio y un nodo en cada instancia y finalmente el valor de función objetivo óptimo en cada instancia (indicador optimizado en el modelo).

**Tabla 25: Resumen de resultados CFLP, localización de reservorios por instancia.**

<b>Instancia</b>	<b>Reservorios Instalados</b>		<b>Distancia Reservorio-Nodos Total (km)</b>	<b>Distancia Reservorio-Nodos Promedio (km)</b>	<b>Valor F.O. (viviendas × km)</b>
<b>Caserío La Paz</b>	Reservorio 2	Reservorio 4	1.247682065	0.207947011	5.9133
<b>Aldea El Pino</b>	Reservorio 1	Reservorio 2	0.636264539	0.127252908	13.2864
<b>Caserío Lotato</b>	Reservorio 2	Reservorio 4	0.224878618	0.056219654	2.2837
<b>Caserío P.Esperanza</b>	Reservorio 2	Reservorio 3	0.346763178	0.086690794	3.0728
<b>Aldea Llico</b>	Reservorio 2	Reservorio 4	1.395855211	0.232642535	58.7757
<b>Caserío Los Martínez</b>	Reservorio 1	Reservorio 2	0.123863529	0.041287843	1.1769
<b>Caserío Los Canelos</b>	Reservorio 1	Reservorio 4	0.781917554	0.156383511	8.5991
<b>Aldea Corinto</b>	Reservorio 3	Reservorio 6	2.426565252	0.220596841	55.6555
<b>Caseríos Batuco</b>	Reservorio 1	Reservorio 4	3.308638341	0.661727668	122.3371
<b>Caserío Calpún</b>	Reservorio 2	Reservorio 3	0.622449339	0.155612335	6.6354
<b>Aldea Gualleco</b>	Reservorio 1	Reservorio 4	1.836949826	0.204105536	50.0624

Fuente: Elaboración propia.

## 5. Discusión y Conclusiones

En el presente capítulo se analizan los resultados de la aplicación del método de centro de gravedad y del modelo CFLP, junto con las dificultades observadas en su implementación. También se presentan las limitaciones del trabajo y se formulan propuestas para trabajos futuros en torno a la metodología desarrollada.

### 5.1 Discusión

En la propuesta e implementación de un modelo de programación lineal entera para el problema de localización de reservorios en comunidades, uno de los principales desafíos metodológicos corresponde a la obtención y estructuración de datos georreferenciados, debido a la ausencia de información pública sobre distribución de viviendas y riesgos. Para compensar esta limitación, se generan datos a partir de información del INE (Instituto Nacional de Estadísticas, 2019) y de la verificación de imágenes satelitales en *Google Earth*. Con ello se seleccionan 16 comunidades de las regiones del **Biobío** y **Maule**, que definen 11 instancias caracterizadas por su cercanía a plantaciones forestales.

La representación de la demanda se establece mediante la generación de nodos obtenidos con el método de **centro de gravedad ponderado** (Castro et al., 2019), considerando como pesos el número de viviendas por sector en cada comunidad. Este procedimiento traduce la dispersión habitacional en coordenadas representativas y genera un total de 62 nodos en las 11 instancias. En casos simples, un nodo corresponde al centro de una línea de viviendas; en casos más complejos, se define un polígono en cada zona de concentración habitacional y se calcula su centroide, representando así las distintas concentraciones de viviendas.

La implementación del método de **centro de gravedad** (López Vargas et al., 2023) constituye una primera aproximación a la localización de reservorios y permite identificar ubicaciones estratégicas según la distribución espacial y la concentración habitacional. Aunque no incorpora restricciones de capacidad ni cobertura, resulta una herramienta versátil para visualizar la demanda y generar propuestas iniciales. Su bajo costo computacional facilita la evaluación de escenarios y variaciones de las instancias, tales como el aumento de la demanda en nodos de bajo peso, la inclusión de caseríos o sectores aledaños y la

segmentación de comunidades extensas. Un ejemplo es **Aldea Corinto**, que se divide en dos subzonas para obtener un análisis más preciso de cobertura.

Este enfoque se adapta tanto a instancias simples, como caseríos con tres nodos (por ejemplo, *Los Martínez*), como a casos más densos, como *Aldea Corinto* con once nodos. Además, permite probar variaciones y registrar localizaciones candidatas para la siguiente etapa de análisis.

La segunda etapa corresponde a la implementación de un modelo *CFLP*, que incorpora un planteamiento más completo y realista al considerar la capacidad máxima de atención por reservorio, el número máximo de instalaciones por comunidad y la asignación óptima de nodos a instalaciones mediante la minimización de distancias. Este modelo utiliza como entrada los resultados obtenidos con el centro de gravedad: para cada comunidad se definen entre cuatro y seis ubicaciones candidatas, generadas a partir de las variaciones evaluadas en cada instancia. La capacidad de los reservorios se fija de forma referencial en 100 viviendas para caseríos y 200 para aldeas.

La ejecución del modelo muestra que, en la mayoría de los casos, las ubicaciones seleccionadas no coinciden con las propuestas iniciales del centro de gravedad, sino con las variaciones posteriores, lo que evidencia la utilidad del análisis iterativo. De los 22 reservorios seleccionados en las 11 comunidades, **17 corresponden a ubicaciones alternativas**. Esto confirma que el modelo *CFLP* mejora la propuesta inicial, ya que minimiza la distancia ponderada por la demanda de los nodos y determina el valor óptimo de la función objetivo considerando la instalación de más de un reservorio asegurando una cobertura eficaz con menores distancias totales, a diferencia del método de centro de gravedad, que ofrece solo una localización candidata sin medir la distancia total ponderada ni admitir más de una instalación por iteración.

Si bien el modelo *CFLP* requiere información adicional para su parametrización (capacidad de los reservorios, número máximo de instalaciones, etc.) y su costo computacional es elevado al tratarse de un problema de programación lineal entera, su aplicación resulta más cercana a la implementación real. El centro de gravedad ponderado, en contraste, aunque rápido y directo, solo permite proponer un reservorio por instancia y no considera restricciones de capacidad ni cobertura. En este sentido, el *CFLP* ofrece una

solución más robusta, ya sea con datos exactos o mediante datos generados como en este estudio.

Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de métodos heurísticos (como el centro de gravedad) y exactos (*CFLP*) permite implementar de manera efectiva el problema de localización de instalaciones en contextos rurales. La estrategia desarrollada es replicable en otras comunidades y constituye una metodología útil para apoyar decisiones de instalación de infraestructura preventiva frente a incendios forestales. También se identifican oportunidades de mejora mediante la incorporación de datos más específicos, como tipología de viviendas, accesibilidad vial y restricciones topográficas, los cuales podrían obtenerse en actualizaciones futuras o mediante análisis particulares de instancias. De esta manera, la localización de reservorios de agua con la formulación propuesta contribuye a la atención oportuna de focos de incendio y a la reducción de daños en comunidades rurales.

Finalmente, el estudio plantea una propuesta metodológica de carácter teórico para la localización de reservorios de agua, basada en la generación de datos y en la formulación de un modelo de programación matemática (*CFLP*). La información utilizada permite construir redes de nodos representativos entre puntos de demanda y ubicaciones candidatas, aunque estas últimas no corresponden necesariamente a sitios reales disponibles. En consecuencia, las soluciones responden a criterios teóricos de optimización y no consideran factores como las condiciones del terreno, el acceso vial, los medios de transporte disponibles u otras restricciones logísticas. Estas limitaciones surgen de la ausencia de mecanismos y datos para definir tales condiciones en el modelo. No obstante, la metodología constituye una herramienta aplicable en localidades con información limitada, y proporciona criterios replicables y adaptables para investigaciones futuras.

## 5.2 Conclusiones

La localización de reservorios de agua mediante modelos matemáticos constituye una herramienta efectiva para apoyar medidas preventivas frente a incendios forestales en comunidades rurales. El presente estudio demuestra que es posible modelar escenarios de mitigación de riesgo utilizando enfoques de programación matemática adaptados al contexto territorial de las regiones del Maule y Biobío, incluso bajo condiciones de información limitada.

La aplicación del método de centro de gravedad resulta útil como aproximación inicial para representar y analizar la distribución espacial de viviendas en las comunidades. Este método permite construir nodos representativos a partir de concentraciones habitacionales y evaluar diferentes configuraciones espaciales de manera rápida y versátil, aportando una base sólida para la posterior etapa de optimización.

El modelo CFLP ofrece un planteamiento más realista al problema de localización, ya que incorpora restricciones de capacidad, cobertura de la demanda y minimización de distancias entre instalaciones y nodos. Con este modelo es posible evaluar múltiples configuraciones de locaciones candidatas en cada comunidad y generar propuestas óptimas considerando supuestos sobre abastecimiento y cantidad máxima de reservorios.

Los resultados muestran que, en la mayoría de los casos, las ubicaciones óptimas de reservorios no coinciden con las propuestas iniciales obtenidas con el centro de gravedad, sino con variaciones derivadas de cambios en la distribución de nodos o en las demandas. Esto confirma que el uso combinado de métodos heurísticos y exactos en etapas sucesivas mejora la calidad de las soluciones alcanzadas.

La metodología implementada es replicable y escalable a otras comunidades rurales expuestas a riesgo forestal, y representa una contribución metodológica adaptable a distintos territorios. No obstante, su aplicación práctica requiere disponer de información más precisa sobre tipología de viviendas, factibilidad técnica de instalación y accesibilidad, aspectos que deben ser considerados en investigaciones posteriores.

Finalmente, este trabajo evidencia que la integración entre análisis geográfico, programación lineal entera y métodos de localización aporta soluciones concretas a problemas territoriales complejos en contextos con limitaciones de información. La metodología combinada constituye una herramienta eficaz para la toma de decisiones en escenarios donde la planificación preventiva resulta clave para reducir los costos y el impacto de los desastres naturales.

### **5.3 Limitaciones del estudio y propuestas futuras**

El modelo CFLP para la localización de reservorios de agua se desarrolla en este estudio desde una perspectiva teórica con aproximación a la realidad, lo que implica el desafío de modelar información limitada para representar instancias reales en un problema de programación lineal entera. La ausencia de registros actualizados de comunidades vulnerables genera un costo de tiempo adicional en la verificación de información geográfica y sociodemográfica. Esta verificación considera factores como el riesgo por proximidad a plantaciones forestales, la delimitación territorial de las comunidades y la caracterización de su estructura habitacional. Ante dicha incertidumbre, se recurre a la generación de datos aproximados para formular el modelo.

La construcción de nodos mediante el método de centro de gravedad se basa en las concentraciones de viviendas observadas en cada comunidad. Este procedimiento, aunque válido para representar la demanda, implica un mayor costo de tiempo cuando las comunidades presentan una mayor cantidad de viviendas o cuando se amplía el número de instancias a analizar. De esta manera, las localidades candidatas para la instalación de reservorios no corresponden a emplazamientos reales, sino a ubicaciones teóricas generadas para la resolución del problema. Además, el modelo no incorpora criterios geográficos como tipo de suelo o altura del terreno, ni los costos de instalación de reservorios, lo que limita la factibilidad directa de su aplicación práctica. Finalmente, el CFLP presenta un costo computacional elevado, lo que restringe su escalabilidad a problemas de gran tamaño si no se dispone de recursos de procesamiento adecuados.

En consecuencia, los resultados obtenidos deben entenderse como propuestas teóricas que requieren validación y ajuste en escenarios reales. Para futuras investigaciones, la metodología desarrollada ofrece la posibilidad de mejoras que acerquen el modelo a una implementación práctica. Entre estas, se plantea el uso de datos más precisos que representen con mayor fidelidad a cada comunidad, lo que puede lograrse mediante la integración de sistemas de información geográfica, la actualización de registros oficiales y la aplicación de herramientas de software que agilicen la definición de datos requeridos. Asimismo, el modelo puede fortalecerse mediante la incorporación de costos de instalación, la identificación de localidades reales disponibles para emplazar reservorios y la definición de coberturas ajustadas a la tipología habitacional y a las condiciones geográficas de cada comunidad. De este modo, la metodología no solo se perfecciona en términos teóricos, sino que avanza hacia una aplicación factible y replicable en escenarios de riesgo forestal.

## 6. Referencias

- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2017, marzo 8). *El uso de helicópteros para combatir los incendios forestales en Australia*. <https://www.bcn.cl/observatorio/asiapacifico/noticias/uso-helicopteros-incendios-forestales-australia#:~:text=Valoraci%C3%B3n%20del%20uso%20de%20helic%C3%B3pteros,las%20brigadas%20terrestres%E2%80%9D%2C%20sostuvo.>
- Cabaña, C. (2024). *Plantaciones Forestales Efectuadas Durante el Año 2023*. <https://www.conaf.cl/centro-documental/informe-de-plantaciones-forestales-2023/>
- Carro Paz, R., & González Gómez, D. (2012). *Localización de Instalaciones*. [https://nulan.mdp.edu.ar/id/eprint/1619/1/14\\_localizacion\\_instalaciones.pdf](https://nulan.mdp.edu.ar/id/eprint/1619/1/14_localizacion_instalaciones.pdf)
- Castro, S. D., Castro, S. D. & Socha, A. H., Citación, :, Castro, S. D., & Socha, A. H. (. (2019). Application of the Center of Gravity Principle (Geometric Center-Centroid) to Optimize Travel and Starting Times Using Fertilizer Application Clusters. *Revista Palmas*, 40, 168–176.
- CONAF. (2023). *Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile*.
- CONAF. (2024). *Hectáreas por Incendio Nacional de Incendios Forestales por Región, 1977 - 2024 octubre*. <https://www.conaf.cl/centro-documental/hectareas-por-incendio-nacional-de-incendios-forestales-por-region-1977-2023/>
- Daza-Moscoso, M. A., Carnero-Quispe, M. F., & Cárdenas-Medina, J. M. (2024). Localización de instalaciones en logística humanitaria: una revisión de la literatura y consideraciones para futuras investigaciones. *DYNA*, 91(232), 172–180. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n232.111818>
- Escuela de Bomberos de Santiago. (2017). *Caudal y Presión: Dos conceptos que como bomberos debemos saber manejar*. <http://cbsebs.cl/noticia.php?832-caudal-y-presion-dos-conceptos-que-como-bomberos-debemos-saber-manejar>
- Gobierno de Chile. (2023). *Plan de Reconstrucción Post Incendios 2023, Región del Biobío*. <https://www.indap.gob.cl/sites/default/files/2023-04/Plan-de-reconstruccion-gob-al-05.03.23.pdf>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2019). *Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019*. <http://www.censo2017.cl/servicio-de-mapas/descargas/mapas/Urbano-Rural->
- Lee, E. H., & Jeong, J. (2025). Facility location problem for senior centers in an upcoming super-aging society. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90096-y>

- López Vargas, J. C., Losada Losada, J. D., & Duque Uribe, V. (2023). Aplicación del análisis del centro de gravedad en el diseño de cadenas de suministro humanitarias para la atención de desastres: El caso de Colombia. *Revista de Climatología*, 23, 102–116. <https://doi.org/10.59427/rcli/2023/v23.102-116>
- López Vizcaíno, E. (2018). *Propuesta metodológica para la georreferenciación de la población y primeras aplicaciones en Galicia*. <https://www.researchgate.net/publication/343826600>
- Maharjan, R., & Hanaoka, S. (2020). A credibility-based multi-objective temporary logistics hub location-allocation model for relief supply and distribution under uncertainty. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70, 100727. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.07.003>
- Ming, J., Richard, J. P. P., & Zhu, J. (2021). A Facility Location and Allocation Model for Cooperative Fire Services. *IEEE Access*, 9, 90908–90918. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3091481>
- Ministerio de Hacienda. (2023). *Reporte de la estimación de los costos fiscales y económicos de la emergencia por los incendios forestales*. <https://www.hacienda.cl/areas-de-trabajo/politicas-macroeconomicas/informes/informe-de-costos-de-incendios-forestales-al-3-de-abril>
- MINVU. (2011). *Cuadro-Normativo-Abreviado-lamado-en-dos-fases*. <https://www.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2023/02/Cuadro-Normativo-Abreviado-lamado-en-dos-fases.pdf>
- Mohri, S. S., Akbarzadeh, M., & Sayed Matin, S. H. (2020). A Hybrid model for locating new emergency facilities to improve the coverage of the road crashes. *Socio-Economic Planning Sciences*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.01.005>
- Poblete Hernández, P., Kahler González, C., Bañados Munita, J. C., Gysling Caselli, J., Pardo Velásquez, E., Soto Aguirre, D., Baeza Rocha, D., Catelicán Vera, L., Hernández Pineda, J., & Troncoso Recabarren, H. (2024). *Anuario Forestal 2024*.
- Sagardía Parga, R., Bahamondez Villarroel, C., Ávila Campos, A., Reyes Gallardo, R., & Vergara Asenjo, G. (2022). *Inventario Forestal Nacional de Bosques Nativos y Actualización de Plantaciones Forestales*. [www.infor.cl](http://www.infor.cl)
- Salazar López, B. (2021, octubre 13). *Mapas de calor y Algoritmo de Centro de Gravedad utilizando Python*. <https://ingenieriaindustrialonline.com/localizacion-de-instalaciones/mapas-de-calor-y-algoritmo-de-centro-de-gravedad-utilizando-python/>.
- Sephton, J., & Eng, P. (2018). *Water Supplies for Suburban and Rural Fire Fighting-NFPA 1142...and more. 2018 Manitoba Building Officials Association-Annual Fall Seminar & Trade Show*. [https://mboa.mb.ca/uploads/files/NFPA%201142%20Water%20Supply%20-%20Jim%20Sephton\(1\).pdf](https://mboa.mb.ca/uploads/files/NFPA%201142%20Water%20Supply%20-%20Jim%20Sephton(1).pdf)

- SERNAPRED. (2023, marzo 1). *Consolidado de Incendios Forestales Relevantes*.  
<https://web.senapred.cl/consolidado-de-incendios-forestales-relevantes-46>.
- Synertech. (2025). *Tanques de agua contra incendios*.  
<https://www.synertech.cl/tanques/tanques-de-agua-contra-incendios>
- Ur Rehman, H. (2020). *Capacitated Facility Location Problem (Python PuLP) [Jupyter notebook]*. *GitHub*. github.com. <https://github.com/hakeemrehman/Python-PuLP/blob/master/Capacitated%20Facility%20Location%20Problem.ipynb>
- Vindra Ahuja, B. K., Magnant, T. L., & Orlin, J. B. (1993). *Network Flows Theory, Algorithms, and Applications*.

## 7. Anexos

### Anexo 1: Datos totales para formulación de nodos

Instancia	Nodo	Region	Provincia	Punto	Latitud	Longitud	Localidad	Peso
1	1	Biobío	Concepción	PP1	-36.9170806	-72.75210278	Caserío La Paz	1
1	1	Biobío	Concepción	PP2	-36.9161639	-72.7518	Caserío La Paz	1
1	1	Biobío	Concepción	PP3	-36.9161694	-72.7497	Caserío La Paz	1
1	1	Biobío	Concepción	PP4	-36.9170472	-72.74965	Caserío La Paz	1
1	2	Biobío	Concepción	PP5	-36.916022	-72.751719	Caserío La Paz	1
1	2	Biobío	Concepción	PP6	-36.916051	-72.750024	Caserío La Paz	1
1	2	Biobío	Concepción	PP7	-36.915325	-72.749805	Caserío La Paz	1
1	2	Biobío	Concepción	PP8	-36.91373	-72.750758	Caserío La Paz	1
1	2	Biobío	Concepción	PP9	-36.915155	-72.751158	Caserío La Paz	1
1	3	Biobío	Concepción	2P1	-36.915137	-72.755734	Caserío La Paz	1
1	3	Biobío	Concepción	2P2	-36.91455	-72.755459	Caserío La Paz	1
1	3	Biobío	Concepción	2P3	-36.914801	-72.754578	Caserío La Paz	1
1	3	Biobío	Concepción	2P4	-36.915141	-72.754479	Caserío La Paz	1
1	4	Biobío	Concepción	3P1	-36.917993	-72.752741	Caserío La Paz	1
1	4	Biobío	Concepción	3P2	-36.918796	-72.752811	Caserío La Paz	2
1	5	Biobío	Concepción	4P1	-36.918411	-72.751337	Caserío La Paz	1
1	5	Biobío	Concepción	4P2	-36.918269	-72.750476	Caserío La Paz	1
1	5	Biobío	Concepción	4P3	-36.918172	-72.750039	Caserío La Paz	2
1	5	Biobío	Concepción	4P4	-36.918067	-72.749751	Caserío La Paz	1
1	6	Biobío	Concepción	Junta de Vecinos L	-36.9153709	-72.75498809	Caserío La Paz	1
2	1	Biobío	Concepción	EP11	-36.843266	-72.922936	Aldea El Pino	1
2	1	Biobío	Concepción	EP12	-36.844375	-72.921056	Aldea El Pino	1
2	2	Biobío	Concepción	EP21	-36.844102	-72.921094	Aldea El Pino	1
2	2	Biobío	Concepción	EP22	-36.842951	-72.922829	Aldea El Pino	1
2	2	Biobío	Concepción	EP23	-36.842148	-72.922658	Aldea El Pino	1
2	2	Biobío	Concepción	EP24	-36.842841	-72.921958	Aldea El Pino	1
2	2	Biobío	Concepción	EP25	-36.843224	-72.921571	Aldea El Pino	1
2	3	Biobío	Concepción	EP31	-36.842223	-72.92457	Aldea El Pino	1
2	3	Biobío	Concepción	EP32	-36.843145	-72.923154	Aldea El Pino	1
2	4	Biobío	Concepción	EP41	-36.842094	-72.924188	Aldea El Pino	1
2	4	Biobío	Concepción	EP42	-36.842702	-72.923176	Aldea El Pino	1
2	4	Biobío	Concepción	EP43	-36.841891	-72.92292	Aldea El Pino	1
2	4	Biobío	Concepción	EP44	-36.840671	-72.923575	Aldea El Pino	1
2	4	Biobío	Concepción	EP45	-36.841221	-72.924222	Aldea El Pino	1
2	5	Biobío	Concepción	EP51	-36.840779	-72.922735	Aldea El Pino	1
2	5	Biobío	Concepción	EP52	-36.841636	-72.922098	Aldea El Pino	1
2	5	Biobío	Concepción	EP53	-36.841127	-72.921654	Aldea El Pino	1
2	5	Biobío	Concepción	EP54	-36.840332	-72.921448	Aldea El Pino	1
3	1	Biobío	Concepción	LT11	-36.832113	-72.910738	Caserío Lotato	1
3	1	Biobío	Concepción	LT12	-36.831537	-72.910789	Caserío Lotato	1
3	1	Biobío	Concepción	LT13	-36.831083	-72.910593	Caserío Lotato	1
3	1	Biobío	Concepción	LT14	-36.831548	-72.91034	Caserío Lotato	1
3	2	Biobío	Concepción	LT21	-36.83067	-72.910351	Caserío Lotato	1
3	2	Biobío	Concepción	LT22	-36.830864	-72.910681	Caserío Lotato	1
3	3	Biobío	Concepción	LT31	-36.830724	-72.910852	Caserío Lotato	1
3	3	Biobío	Concepción	LT32	-36.830346	-72.91084	Caserío Lotato	1
3	3	Biobío	Concepción	LT33	-36.830208	-72.911796	Caserío Lotato	1
3	3	Biobío	Concepción	LT34	-36.830456	-72.912175	Caserío Lotato	1
3	4	Biobío	Concepción	LT41	-36.830224	-72.910919	Caserío Lotato	1
3	4	Biobío	Concepción	LT42	-36.830061	-72.911614	Caserío Lotato	1
3	4	Biobío	Concepción	LT43	-36.829381	-72.911138	Caserío Lotato	1
4	1	Biobío	Concepción	LE11	-36.921532	-72.683327	Caserío Esperanza	1
4	1	Biobío	Concepción	LE12	-36.921439	-72.682747	Caserío Esperanza	1
4	1	Biobío	Concepción	LE13	-36.920526	-72.682851	Caserío Esperanza	1
4	1	Biobío	Concepción	LE14	-36.920531	-72.683648	Caserío Esperanza	1
4	2	Biobío	Concepción	LE21	-36.921408	-72.682468	Caserío Esperanza	1
4	2	Biobío	Concepción	LE22	-36.92099	-72.681898	Caserío Esperanza	1
4	2	Biobío	Concepción	LE23	-36.920398	-72.682473	Caserío Esperanza	1
4	3	Biobío	Concepción	LE31	-36.920146	-72.683738	Caserío Esperanza	1
4	3	Biobío	Concepción	LE32	-36.919961	-72.682428	Caserío Esperanza	1
4	3	Biobío	Concepción	LE33	-36.918987	-72.682567	Caserío Esperanza	1
4	3	Biobío	Concepción	LE34	-36.91911	-72.683199	Caserío Esperanza	1
4	3	Biobío	Concepción	LE35	-36.919506	-72.684034	Caserío Esperanza	1
4	4	Biobío	Concepción	LE41	-36.919241	-72.681796	Caserío Esperanza	1
4	4	Biobío	Concepción	LE42	-36.919474	-72.681048	Caserío Esperanza	1
4	4	Biobío	Concepción	LE43	-36.918917	-72.680798	Caserío Esperanza	1

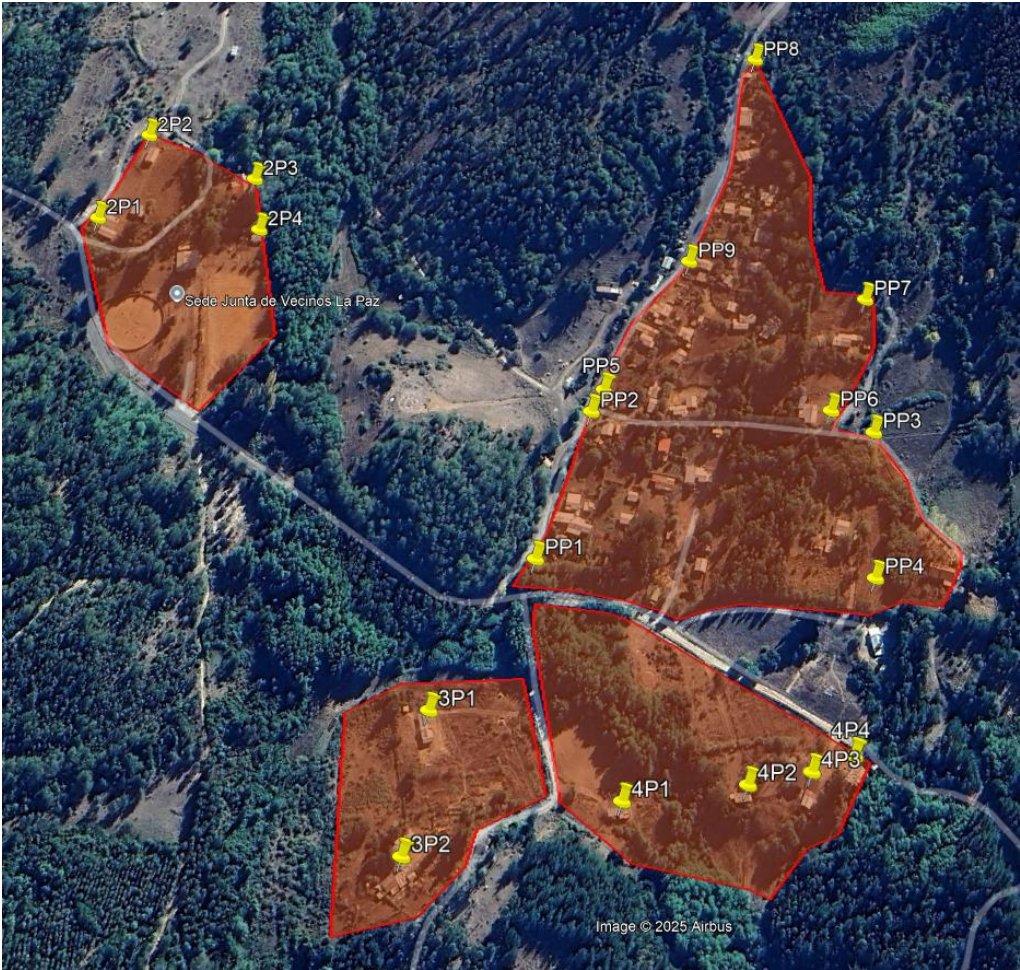
5	1	Biobío	Arauco	AL11	-37.201171	-73.568849	Aldea Llico	1
5	1	Biobío	Arauco	AL12	-37.201393	-73.567454	Aldea Llico	1
5	1	Biobío	Arauco	AL13	-37.200625	-73.565901	Aldea Llico	1
5	1	Biobío	Arauco	AL14	-37.199921	-73.56807	Aldea Llico	1
5	2	Biobío	Arauco	AL21	-37.199665	-73.565283	Aldea Llico	1
5	2	Biobío	Arauco	AL22	-37.20066	-73.562877	Aldea Llico	1
5	2	Biobío	Arauco	AL23	-37.199103	-73.562399	Aldea Llico	1
5	2	Biobío	Arauco	AL24	-37.198076	-73.564736	Aldea Llico	1
5	3	Biobío	Arauco	AL31	-37.200106	-73.565856	Aldea Llico	1
5	3	Biobío	Arauco	AL32	-37.199246	-73.567872	Aldea Llico	1
5	3	Biobío	Arauco	AL33	-37.198068	-73.568573	Aldea Llico	1
5	3	Biobío	Arauco	AL34	-37.197971	-73.565044	Aldea Llico	1
5	4	Biobío	Arauco	AL41	-37.197294	-73.564248	Aldea Llico	1
5	4	Biobío	Arauco	AL42	-37.196452	-73.566791	Aldea Llico	1
5	4	Biobío	Arauco	AL43	-37.19569	-73.566269	Aldea Llico	1
5	4	Biobío	Arauco	AL44	-37.196795	-73.564049	Aldea Llico	1
5	5	Biobío	Arauco	AL51	-37.195859	-73.564347	Aldea Llico	1
5	5	Biobío	Arauco	AL52	-37.19531	-73.566126	Aldea Llico	1
5	5	Biobío	Arauco	AL53	-37.194194	-73.56714	Aldea Llico	1
5	5	Biobío	Arauco	AL54	-37.193086	-73.566099	Aldea Llico	1
5	5	Biobío	Arauco	AL55	-37.194388	-73.563135	Aldea Llico	1
5	6	Biobío	Arauco	AL61	-37.196665	-73.563449	Aldea Llico	1
5	6	Biobío	Arauco	AL62	-37.196075	-73.563984	Aldea Llico	1
5	6	Biobío	Arauco	AL63	-37.194446	-73.56284	Aldea Llico	1
5	6	Biobío	Arauco	AL64	-37.195185	-73.562613	Aldea Llico	1
6	1	Biobío	Arauco	LM11	-37.195129	-73.572406	Caserío Los Maitenes	1
6	1	Biobío	Arauco	LM12	-37.195176	-73.571846	Caserío Los Maitenes	1
6	1	Biobío	Arauco	LM13	-37.194862	-73.571735	Caserío Los Maitenes	1
6	1	Biobío	Arauco	LM14	-37.194828	-73.572441	Caserío Los Maitenes	1
6	2	Biobío	Arauco	LM21	-37.195356	-73.571737	Caserío Los Maitenes	1
6	2	Biobío	Arauco	LM22	-37.195254	-73.571262	Caserío Los Maitenes	1
6	3	Biobío	Arauco	LM31	-37.194575	-73.571542	Caserío Los Maitenes	1
6	3	Biobío	Arauco	LM32	-37.194373	-73.571219	Caserío Los Maitenes	1
6	3	Biobío	Arauco	LM33	-37.194146	-73.571828	Caserío Los Maitenes	1
6	3	Biobío	Arauco	LM34	-37.194386	-73.572165	Caserío Los Maitenes	1
7	1	Biobío	Biobío	LC11	-37.739756	-72.224415	Caserío Los Canelos	1
7	1	Biobío	Biobío	LC12	-37.740321	-72.224789	Caserío Los Canelos	1
7	1	Biobío	Biobío	LC13	-37.741044	-72.223821	Caserío Los Canelos	1
7	1	Biobío	Biobío	LC14	-37.739982	-72.223523	Caserío Los Canelos	1
7	2	Biobío	Biobío	LC21	-37.742438	-72.222755	Caserío Los Canelos	1
7	2	Biobío	Biobío	LC22	-37.741048	-72.221988	Caserío Los Canelos	1
7	2	Biobío	Biobío	LC23	-37.740255	-72.222011	Caserío Los Canelos	1
7	2	Biobío	Biobío	LC24	-37.740338	-72.222717	Caserío Los Canelos	1
7	2	Biobío	Biobío	LC25	-37.741288	-72.223478	Caserío Los Canelos	2
7	3	Biobío	Biobío	LC31	-37.742561	-72.222331	Caserío Los Canelos	1
7	3	Biobío	Biobío	LC32	-37.742108	-72.221815	Caserío Los Canelos	1
7	3	Biobío	Biobío	LC33	-37.743005	-72.22001	Caserío Los Canelos	1
7	3	Biobío	Biobío	LC34	-37.74356	-72.220141	Caserío Los Canelos	1
7	4	Biobío	Biobío	LC41	-37.740719	-72.221423	Caserío Los Canelos	1
7	4	Biobío	Biobío	LC42	-37.740504	-72.220765	Caserío Los Canelos	1
7	4	Biobío	Biobío	LC43	-37.740916	-72.220036	Caserío Los Canelos	1
7	5	Biobío	Biobío	LC51	-37.739195	-72.221037	Caserío Los Canelos	1
7	5	Biobío	Biobío	LC52	-37.739382	-72.220103	Caserío Los Canelos	1
7	5	Biobío	Biobío	LC53	-37.738828	-72.220356	Caserío Los Canelos	1

8	1	Maule	Talca	AC11	-35.443194	-71.873788	Aldea Corinto	1
8	1	Maule	Talca	AC12	-35.443679	-71.873731	Aldea Corinto	1
8	1	Maule	Talca	AC13	-35.442773	-71.871819	Aldea Corinto	1
8	1	Maule	Talca	AC14	-35.44319	-71.871671	Aldea Corinto	1
8	2	Maule	Talca	AC21	-35.44414	-71.874619	Aldea Corinto	1
8	2	Maule	Talca	AC22	-35.443642	-71.871815	Aldea Corinto	1
8	3	Maule	Talca	AC31	-35.442607	-71.871238	Aldea Corinto	1
8	3	Maule	Talca	AC32	-35.443168	-71.871229	Aldea Corinto	1
8	3	Maule	Talca	AC33	-35.442222	-71.869748	Aldea Corinto	1
8	3	Maule	Talca	AC34	-35.442722	-71.869017	Aldea Corinto	1
8	4	Maule	Talca	AC41	-35.443971	-71.870701	Aldea Corinto	1
8	4	Maule	Talca	AC42	-35.443469	-71.871212	Aldea Corinto	1
8	4	Maule	Talca	AC43	-35.44313	-71.868941	Aldea Corinto	1
8	4	Maule	Talca	AC44	-35.443079	-71.869519	Aldea Corinto	1
8	5	Maule	Talca	AC51	-35.44256	-71.868334	Aldea Corinto	1
8	5	Maule	Talca	AC52	-35.441619	-71.868787	Aldea Corinto	1
8	5	Maule	Talca	AC53	-35.441021	-71.86762	Aldea Corinto	1
8	5	Maule	Talca	AC54	-35.440591	-71.865953	Aldea Corinto	1
8	5	Maule	Talca	AC55	-35.442105	-71.866869	Aldea Corinto	1
8	6	Maule	Talca	AC61	-35.442853	-71.868376	Aldea Corinto	1
8	6	Maule	Talca	AC62	-35.44244	-71.866992	Aldea Corinto	1
8	6	Maule	Talca	AC63	-35.442426	-71.865255	Aldea Corinto	1
8	6	Maule	Talca	AC64	-35.442839	-71.866587	Aldea Corinto	1
8	7	Maule	Talca	AC71	-35.442128	-71.866481	Aldea Corinto	1
8	7	Maule	Talca	AC72	-35.440457	-71.865496	Aldea Corinto	1
8	7	Maule	Talca	AC73	-35.440536	-71.863578	Aldea Corinto	1
8	7	Maule	Talca	AC74	-35.442049	-71.863785	Aldea Corinto	1
8	8	Maule	Talca	AC81	-35.441887	-71.862557	Aldea Corinto	1
8	8	Maule	Talca	AC82	-35.44241	-71.862586	Aldea Corinto	1
8	8	Maule	Talca	AC83	-35.441705	-71.859665	Aldea Corinto	1
8	8	Maule	Talca	AC84	-35.442345	-71.860084	Aldea Corinto	1
8	9	Maule	Talca	AC91	-35.441619	-71.862622	Aldea Corinto	1
8	9	Maule	Talca	AC92	-35.44102	-71.86285	Aldea Corinto	1
8	9	Maule	Talca	AC93	-35.440694	-71.861685	Aldea Corinto	1
8	9	Maule	Talca	AC94	-35.439802	-71.859461	Aldea Corinto	1
8	9	Maule	Talca	AC95	-35.441259	-71.859548	Aldea Corinto	1
8	10	Maule	Talca	AC101	-35.441406	-71.85881	Aldea Corinto	1
8	10	Maule	Talca	AC102	-35.44122	-71.857587	Aldea Corinto	1
8	11	Maule	Talca	AC111	-35.440936	-71.858925	Aldea Corinto	1
8	11	Maule	Talca	AC112	-35.439802	-71.858996	Aldea Corinto	1
8	11	Maule	Talca	AC113	-35.440183	-71.856692	Aldea Corinto	1
8	11	Maule	Talca	AC114	-35.439119	-71.857473	Aldea Corinto	1
9	1	Maule	Talca	AG11	-35.320437	-71.952911	Caserío La Aguada	1
9	1	Maule	Talca	AG12	-35.317931	-71.951883	Caserío La Aguada	1
9	1	Maule	Talca	AG13	-35.317912	-71.952707	Caserío La Aguada	1
9	1	Maule	Talca	AG14	-35.320176	-71.953905	Caserío La Aguada	1
9	2	Maule	Talca	VA11	-35.31672	-71.959118	Caserío Los Álamos	1
9	2	Maule	Talca	VA12	-35.315656	-71.957946	Caserío Los Álamos	1
9	2	Maule	Talca	VA13	-35.315352	-71.958373	Caserío Los Álamos	1
9	2	Maule	Talca	VA14	-35.315936	-71.959415	Caserío Los Álamos	1
9	3	Maule	Talca	VB11	-35.324711	-71.929918	Villa Batuco	1
9	3	Maule	Talca	VB12	-35.323527	-71.927104	Villa Batuco	1
9	3	Maule	Talca	VB13	-35.322458	-71.930234	Villa Batuco	1
9	3	Maule	Talca	VB14	-35.323521	-71.930701	Villa Batuco	1
9	4	Maule	Talca	VN11	-35.316861	-71.959779	Villa Los Naranjos	1
9	4	Maule	Talca	VN12	-35.314703	-71.960924	Villa Los Naranjos	1
9	4	Maule	Talca	VN13	-35.314031	-71.961877	Villa Los Naranjos	1
9	4	Maule	Talca	VN14	-35.315167	-71.962494	Villa Los Naranjos	1
9	5	Maule	Talca	BC11	-35.323331	-71.956744	Batuco Centro	1
9	5	Maule	Talca	BC12	-35.321911	-71.954028	Batuco Centro	1
9	5	Maule	Talca	BC13	-35.320862	-71.955657	Batuco Centro	1
9	5	Maule	Talca	BC14	-35.320192	-71.95829	Batuco Centro	1

10	1	Maule	Talca	RC11	-35.033846	-72.04114	Caserío Rincón de Calpún	1
10	1	Maule	Talca	RC12	-35.034073	-72.040427	Caserío Rincón de Calpún	1
10	1	Maule	Talca	RC13	-35.033153	-72.040774	Caserío Rincón de Calpún	1
10	1	Maule	Talca	RC14	-35.033233	-72.041341	Caserío Rincón de Calpún	1
10	2	Maule	Talca	RC21	-35.030704	-72.041988	Caserío Rincón de Calpún	1
10	2	Maule	Talca	RC22	-35.030922	-72.04243	Caserío Rincón de Calpún	1
10	2	Maule	Talca	RC23	-35.032112	-72.041307	Caserío Rincón de Calpún	1
10	2	Maule	Talca	RC24	-35.031957	-72.042069	Caserío Rincón de Calpún	1
10	3	Maule	Talca	RC31	-35.031854	-72.041108	Caserío Rincón de Calpún	1
10	3	Maule	Talca	RC32	-35.030767	-72.040915	Caserío Rincón de Calpún	1
10	3	Maule	Talca	RC33	-35.029975	-72.042129	Caserío Rincón de Calpún	1
10	4	Maule	Talca	RC41	-35.028385	-72.040099	Caserío Rincón de Calpún	1
10	4	Maule	Talca	RC42	-35.027887	-72.04048	Caserío Rincón de Calpún	1
10	4	Maule	Talca	RC43	-35.027708	-72.039606	Caserío Rincón de Calpún	1
10	4	Maule	Talca	RC44	-35.027458	-72.040175	Caserío Rincón de Calpún	1
11	1	Maule	Talca	GU11	-35.247687	-71.988227	Aldea Gualleco	1
11	1	Maule	Talca	GU12	-35.24625	-71.988913	Aldea Gualleco	1
11	1	Maule	Talca	GU13	-35.246082	-71.987658	Aldea Gualleco	1
11	1	Maule	Talca	GU14	-35.247292	-71.986117	Aldea Gualleco	1
11	2	Maule	Talca	GU21	-35.246995	-71.985336	Aldea Gualleco	1
11	2	Maule	Talca	GU22	-35.246681	-71.984467	Aldea Gualleco	1
11	2	Maule	Talca	GU23	-35.244924	-71.985494	Aldea Gualleco	1
11	2	Maule	Talca	GU24	-35.245499	-71.986294	Aldea Gualleco	1
11	3	Maule	Talca	GU31	-35.246145	-71.984487	Aldea Gualleco	1
11	3	Maule	Talca	GU32	-35.246077	-71.982742	Aldea Gualleco	1
11	3	Maule	Talca	GU33	-35.247038	-71.981878	Aldea Gualleco	1
11	3	Maule	Talca	GU34	-35.247519	-71.983069	Aldea Gualleco	1
11	4	Maule	Talca	GU41	-35.245506	-71.984887	Aldea Gualleco	1
11	4	Maule	Talca	GU42	-35.244483	-71.984247	Aldea Gualleco	1
11	4	Maule	Talca	GU43	-35.244564	-71.982423	Aldea Gualleco	1
11	4	Maule	Talca	GU44	-35.245588	-71.983128	Aldea Gualleco	1
11	5	Maule	Talca	GU51	-35.244324	-71.982697	Aldea Gualleco	1
11	5	Maule	Talca	GU52	-35.244092	-71.982147	Aldea Gualleco	1
11	5	Maule	Talca	GU53	-35.242517	-71.983057	Aldea Gualleco	1
11	5	Maule	Talca	GU54	-35.242644	-71.983449	Aldea Gualleco	1
11	6	Maule	Talca	GU61	-35.244675	-71.982087	Aldea Gualleco	1
11	6	Maule	Talca	GU62	-35.245869	-71.982405	Aldea Gualleco	1
11	6	Maule	Talca	GU63	-35.245431	-71.980955	Aldea Gualleco	1
11	6	Maule	Talca	GU64	-35.246624	-71.980849	Aldea Gualleco	1
11	7	Maule	Talca	GU71	-35.246949	-71.984344	Aldea Gualleco	1
11	7	Maule	Talca	GU72	-35.248423	-71.98456	Aldea Gualleco	1
11	7	Maule	Talca	GU73	-35.249304	-71.984217	Aldea Gualleco	1
11	7	Maule	Talca	GU74	-35.248189	-71.983467	Aldea Gualleco	1
11	8	Maule	Talca	GU81	-35.248791	-71.982832	Aldea Gualleco	1
11	8	Maule	Talca	GU82	-35.247598	-71.982618	Aldea Gualleco	1
11	8	Maule	Talca	GU83	-35.246917	-71.980541	Aldea Gualleco	1
11	8	Maule	Talca	GU84	-35.249062	-71.980838	Aldea Gualleco	1
11	9	Maule	Talca	GU91	-35.25068	-71.982126	Aldea Gualleco	1
11	9	Maule	Talca	GU92	-35.250028	-71.981777	Aldea Gualleco	1
11	9	Maule	Talca	GU93	-35.249615	-71.983187	Aldea Gualleco	1
11	9	Maule	Talca	GU94	-35.250296	-71.982843	Aldea Gualleco	1

Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 2:** Marcadores para nodos instancia 1 “Caserío La Paz”



**Anexo 3: Marcadores para nodos instancia 2 “Aldea El Pino”**



**Anexo 4: Marcadores para nodos instancia 3 “Caserío Lotato”**



**Anexo 5:** Marcadores para nodos instancia 4 “Caserío Población Esperanza”



**Anexo 6:** Marcadores para nodos instancia 5 “Aldea Llico”



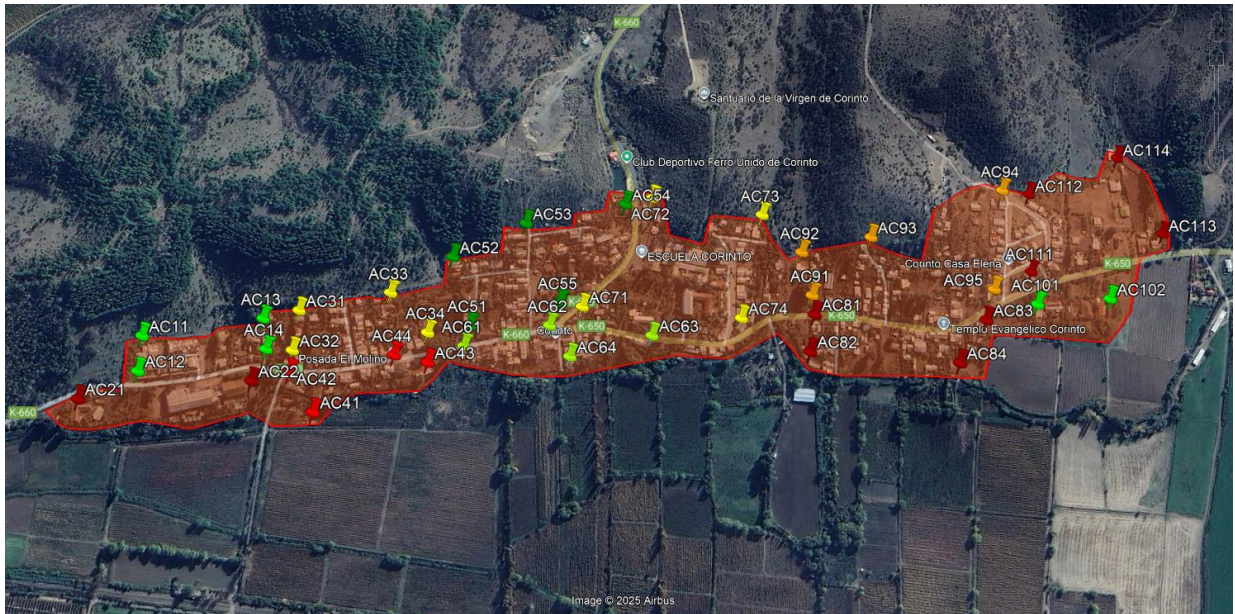
**Anexo 7:** Marcadores para nodos instancia 6 “Caserío Los Maitenes”



**Anexo 8:** Marcadores para nodos instancia 7 “Caserío Los Canelos”



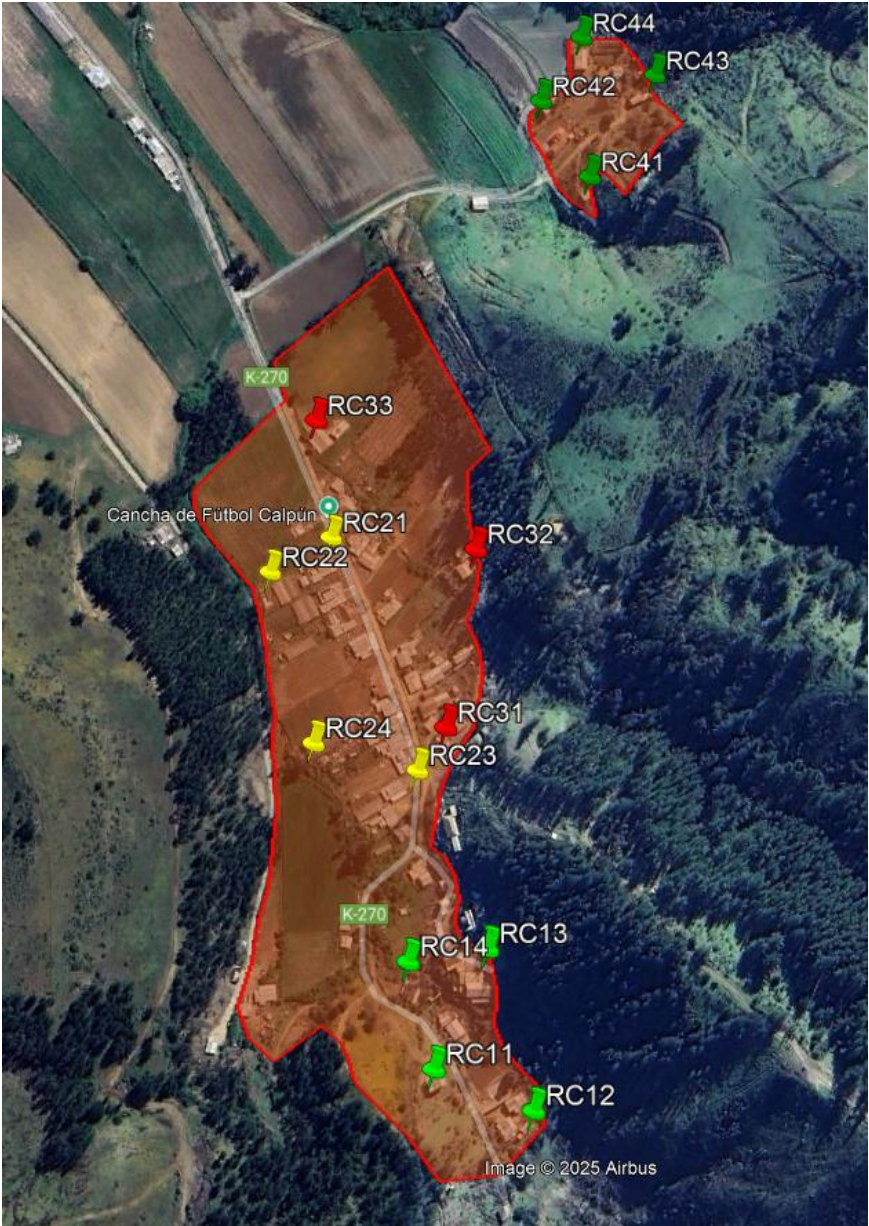
**Anexo 9: Marcadores para nodos instancia 8 “Aldea Corinto”**



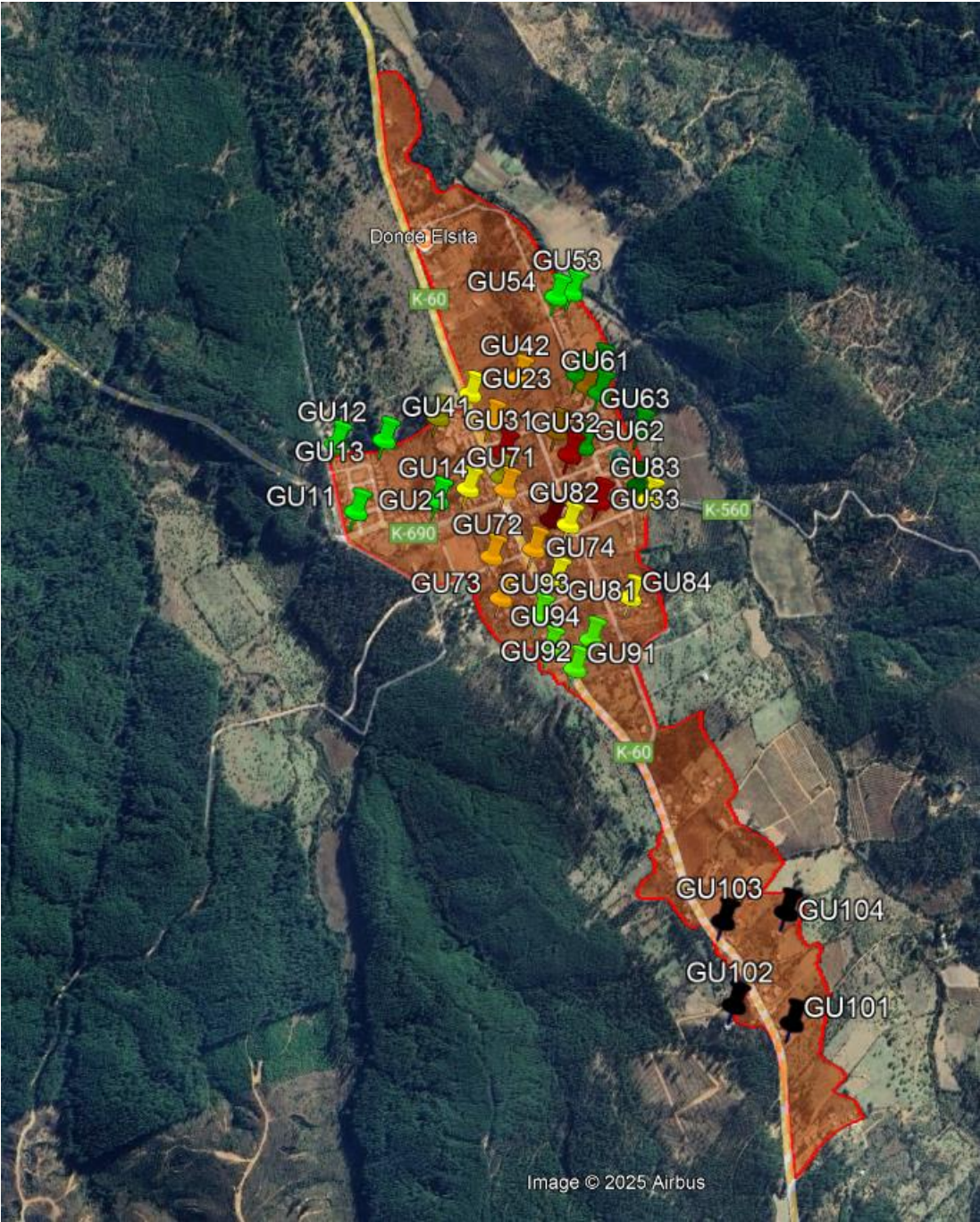
**Anexo 10: Marcadores para nodos instancia 9 “Conjunto de caseríos Batuco”**



**Anexo 11: Marcadores para nodos instancia 10 “Caserío Calpún”**



Anexo 12: Marcadores para nodos instancia 11 “Aldea Gualleco”



## Anexo 13: Código de obtención de Nodo individual

```
# importar las librerías necesarias
import pandas as pd
import numpy as np
import folium
import statistics
from folium.plugins import HeatMap
import geopy
from geopy.extra.rate_limiter import RateLimiter

# importar archivo al entorno
from google.colab import files

uploaded = files.upload()

for fn in uploaded.keys():
    print("User uploaded file \"{name}\" with length {length} bytes'.format(
        name=fn, length=len(uploaded[fn])))

# Leer el documento de Excel y almacenar los datos en la variable data
data = pd.read_excel('.xlsx')

# Visualizar datos del encabezado
data.head()

# Filtrar filas que tengan valores válidos en Latitud, Longitud y Peso
data_valid = data.dropna(subset=["Latitud", "Longitud", "Peso"])

# Convertir a tipo numérico por si hay problemas con cadenas
data_valid["Latitud"] = pd.to_numeric(data_valid["Latitud"], errors="coerce")
data_valid["Longitud"] = pd.to_numeric(data_valid["Longitud"], errors="coerce")
data_valid["Peso"] = pd.to_numeric(data_valid["Peso"], errors="coerce")

# Eliminar nuevamente cualquier fila con valores nulos después de conversión
data_valid = data_valid.dropna(subset=["Latitud", "Longitud", "Peso"])

# Extraer listas para cálculo
lats = data_valid["Latitud"].tolist()
longs = data_valid["Longitud"].tolist()
pesos = data_valid["Peso"].tolist()

# Calcular el centro de gravedad ponderado
centro_gravedad = {
    "lat": np.dot(lats, pesos) / np.sum(pesos),
    "lon": np.dot(longs, pesos) / np.sum(pesos)
}

# Mostrar resultados
print("Centro de Gravedad (Latitud, Longitud):", centro_gravedad)

# Crear Mapa de Calor
# Calcular la media de las latitudes y las longitudes para centrar el mapa
mediaLong = statistics.mean(longs)
mediaLat = statistics.mean(lats)
```

```

# Crear un objeto de mapa base Map()
mapa = folium.Map(location=[mediaLat, mediaLong], zoom_start = 20)

# Crear la capa de mapa de calor (lat, lon, peso)
mapa_calor = HeatMap(
    list(zip(lats, longs, pesos)),
    min_opacity=0.2,
    max_val=max(pesos),
    radius=30,
    blur=30,
    max_zoom=1
)

# Agregar el marcador del centro de gravedad con lat/lon en el popup
lat_cg = centro_gravedad["lat"]
lon_cg = centro_gravedad["lon"]

popup_text = f"""
<b>Centro de Gravedad</b><br>
Latitud: {lat_cg:.6f}<br>
Longitud: {lon_cg:.6f}
"""

folium.Marker(
    [lat_cg, lon_cg],
    popup=popup_text,
    tooltip="Nodo",
    icon=folium.Icon(color="red", icon="info-sign")
).add_to(mapa)

# Agregar marcador para cada punto
for _, row in data_valid.iterrows():
    lat = row["Latitud"]
    lon = row["Longitud"]
    nombre_punto = row["Punto"]

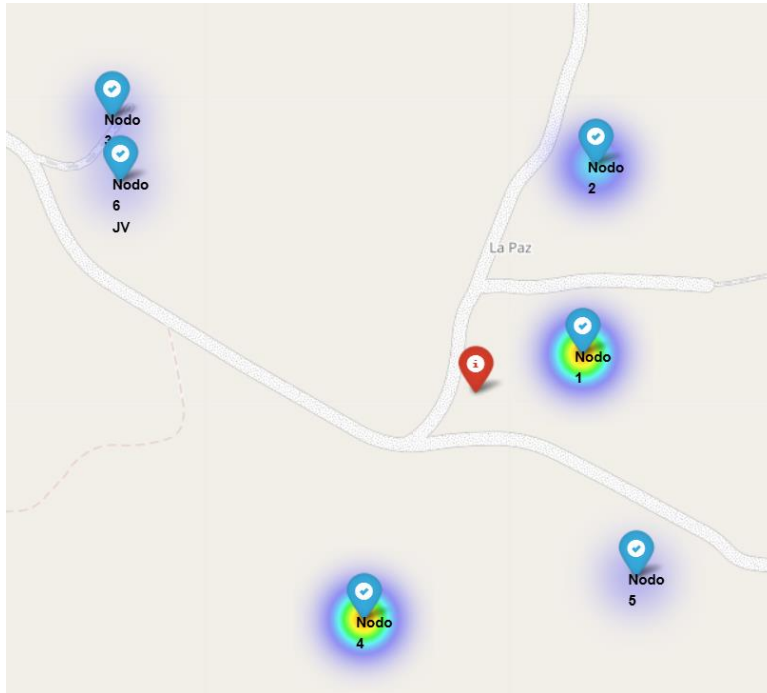
    folium.Marker(
        location=[lat, lon],
        popup=f"Punto: {nombre_punto}",
        tooltip=nombre_punto,
        icon=folium.Icon(color="blue", icon="ok-sign")
    ).add_to(mapa)

# Agregar capa de calor al mapa base
mapa_calor.add_to(mapa)

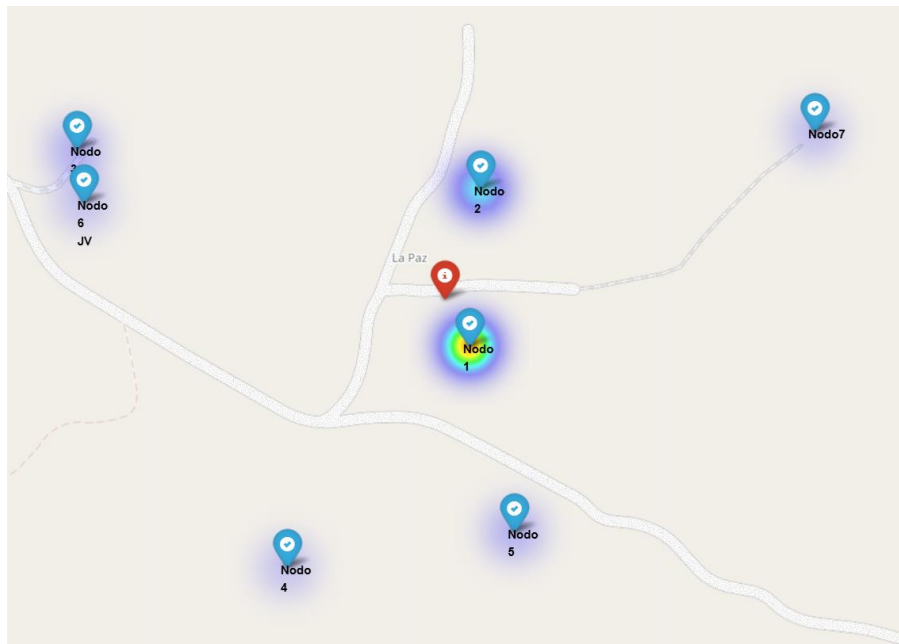
# Mostrar mapa
mapa

```

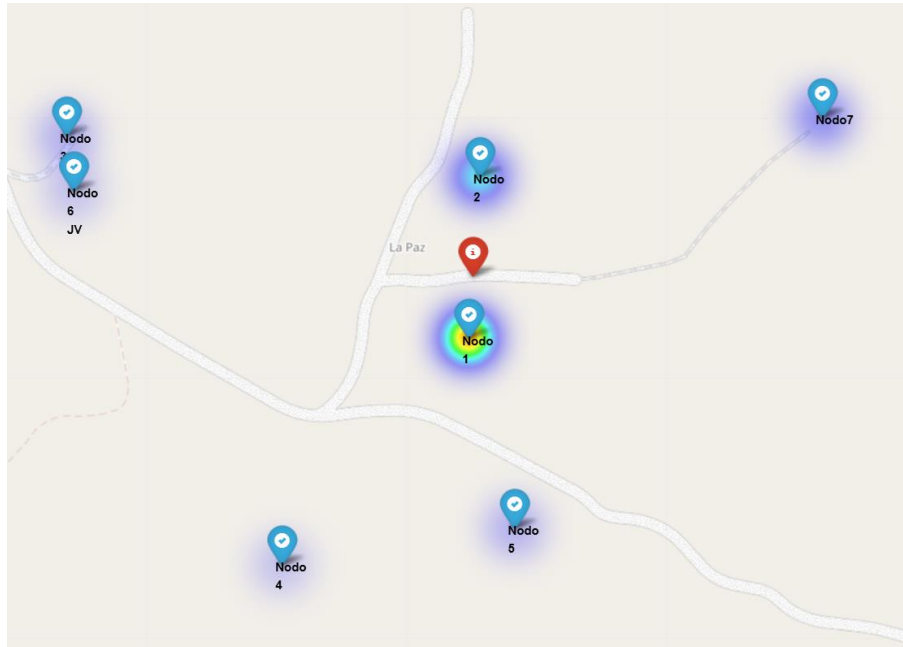
#### Anexo 14: Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 1.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

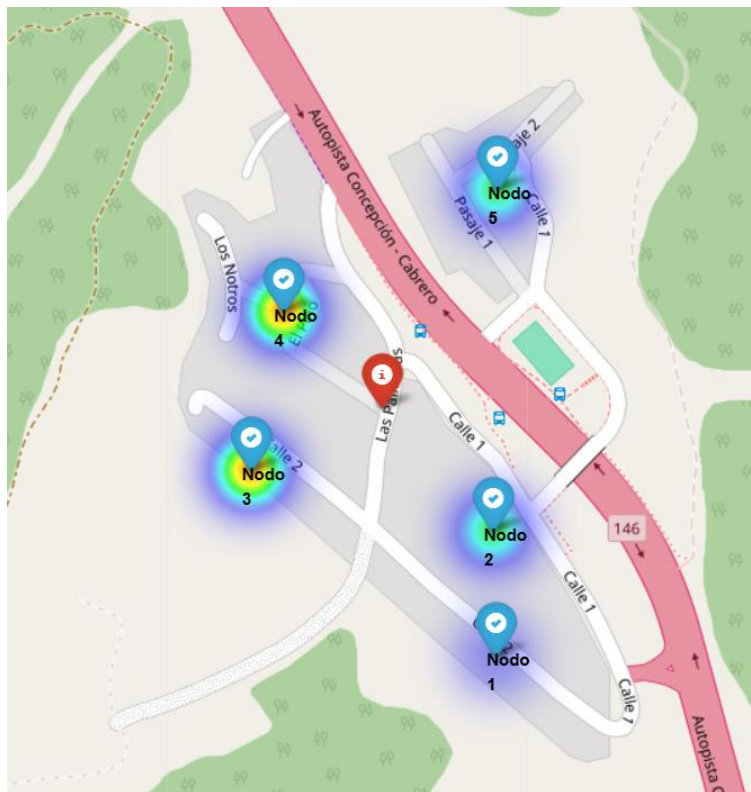


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

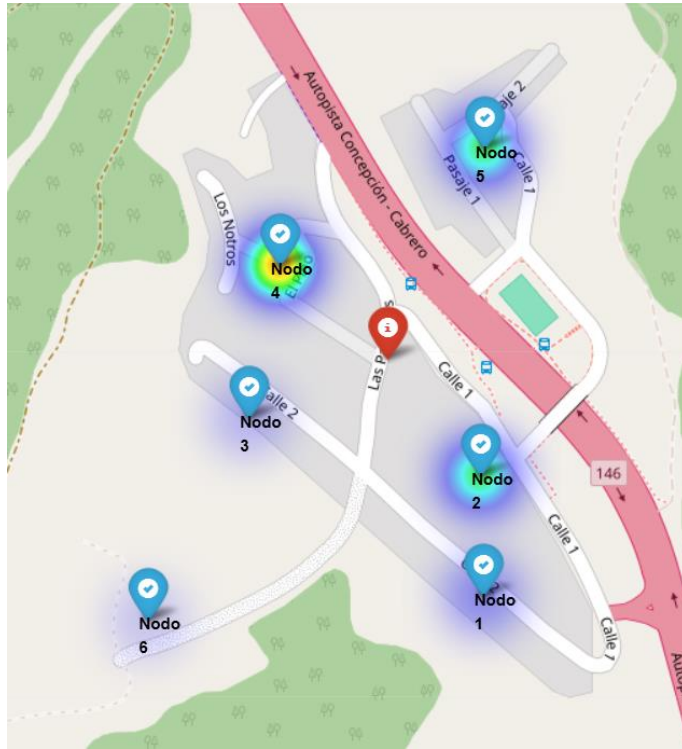


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

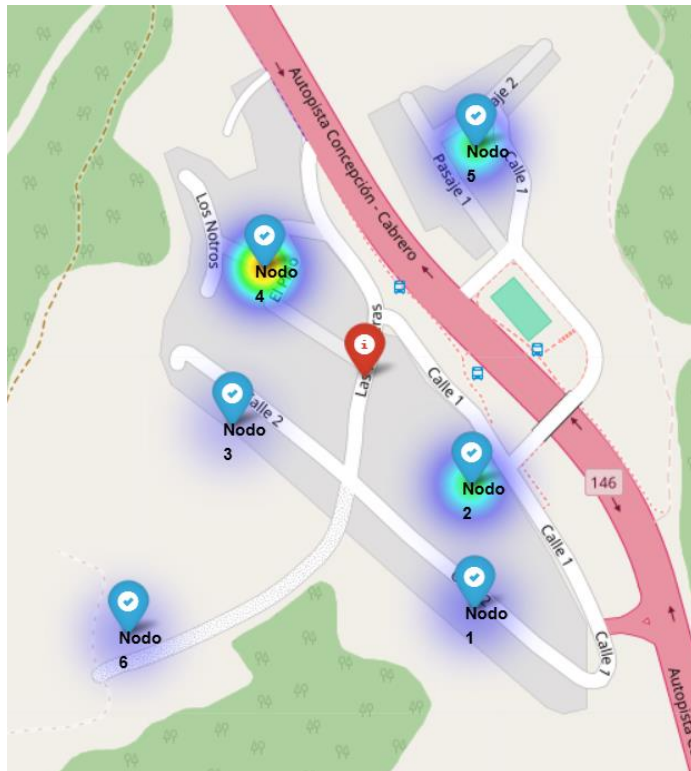
**Anexo 15:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 2.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

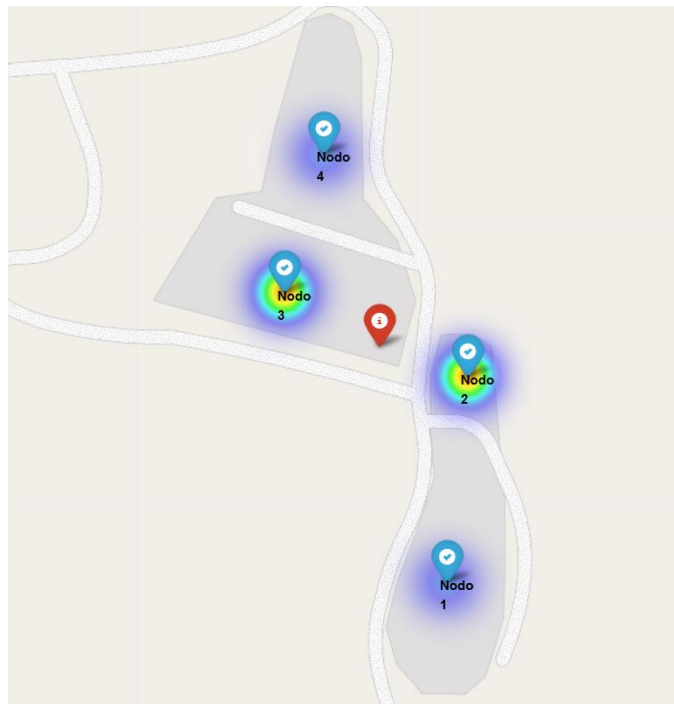


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

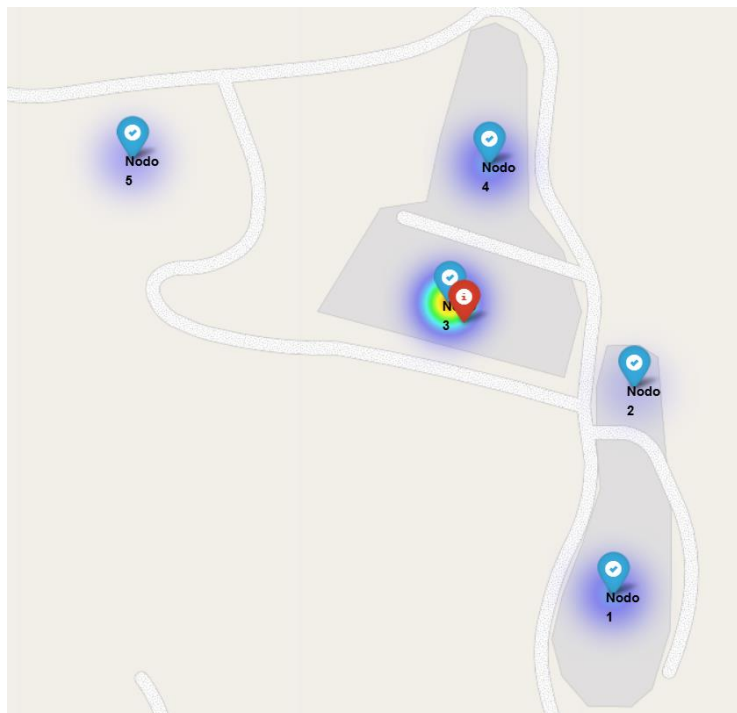


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

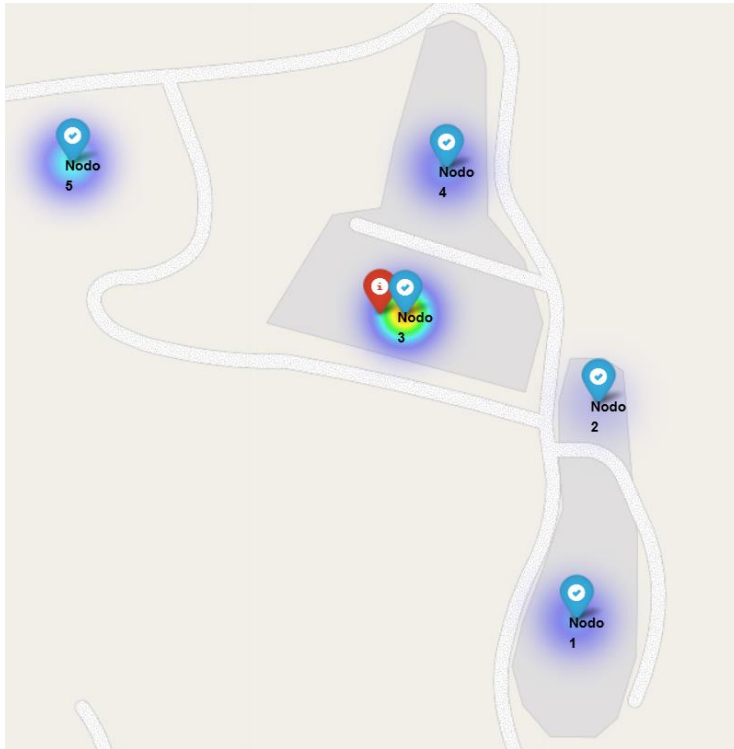
**Anexo 16:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 3.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

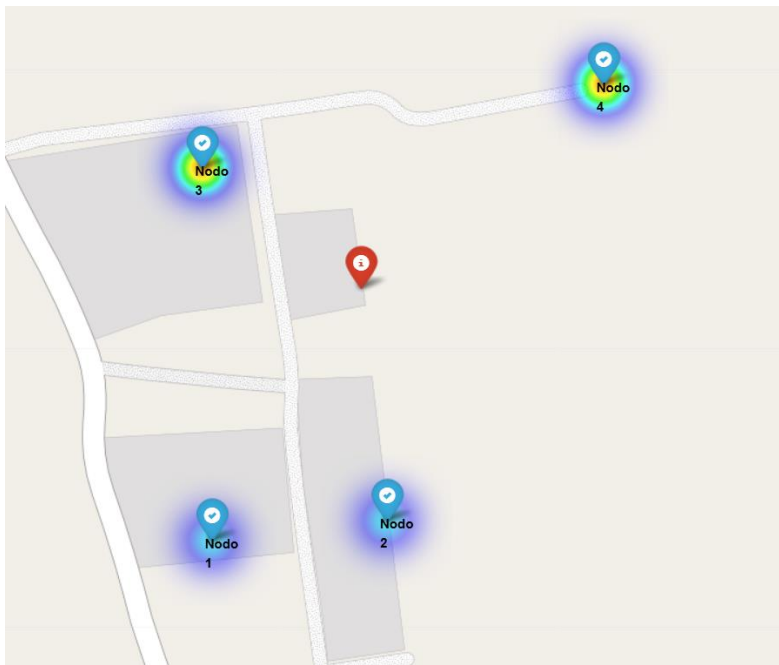


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

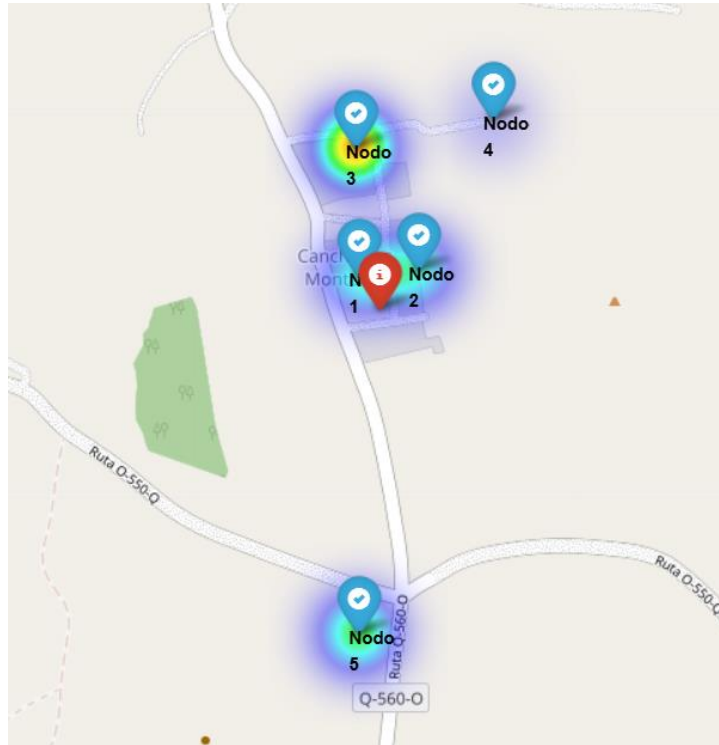


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

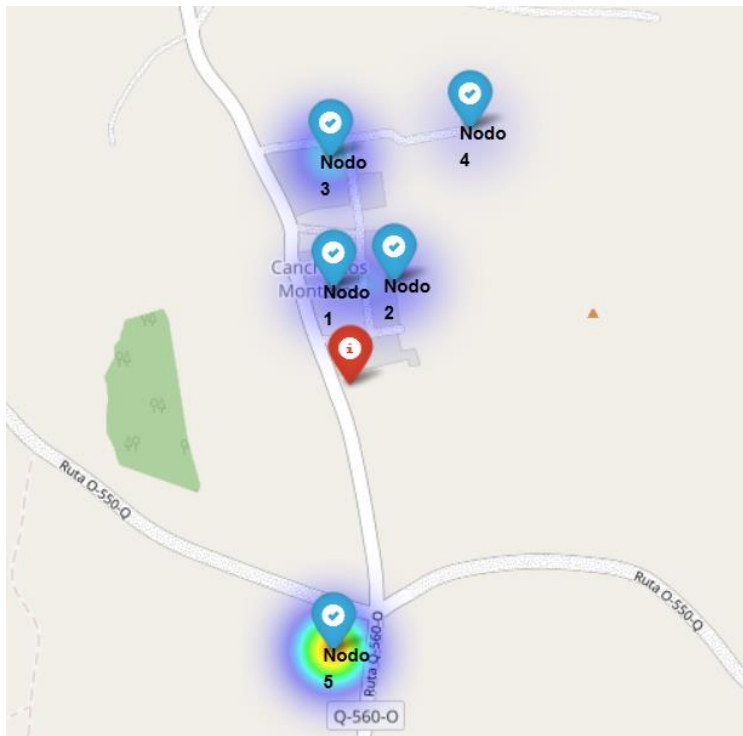
**Anexo 17:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 4.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.



Fuente: Elaboración propia, variación 2.

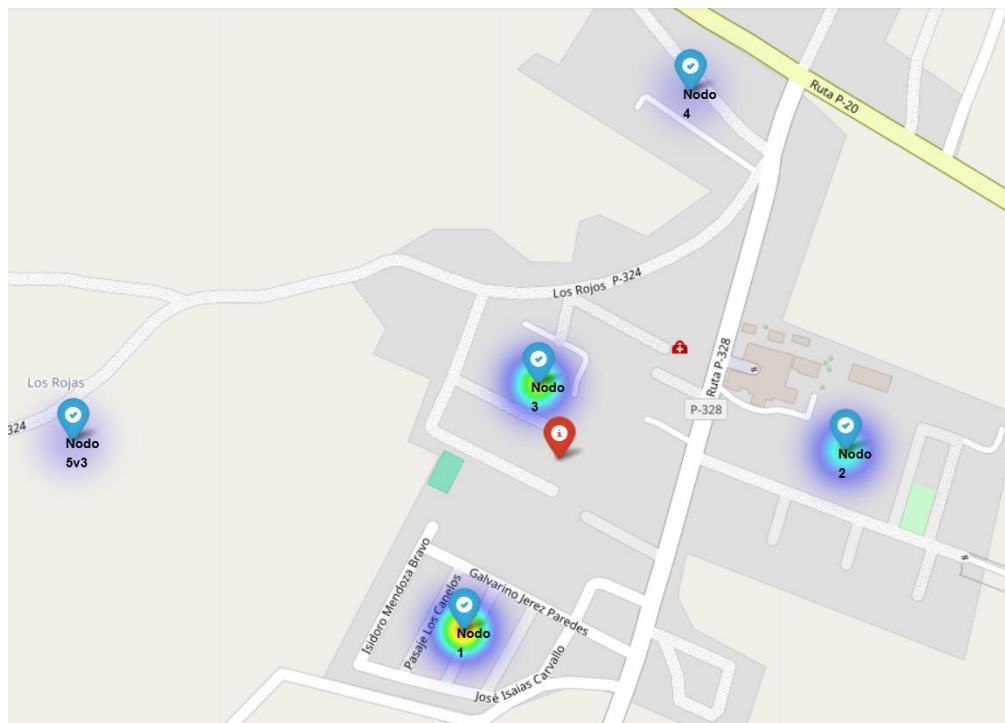


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

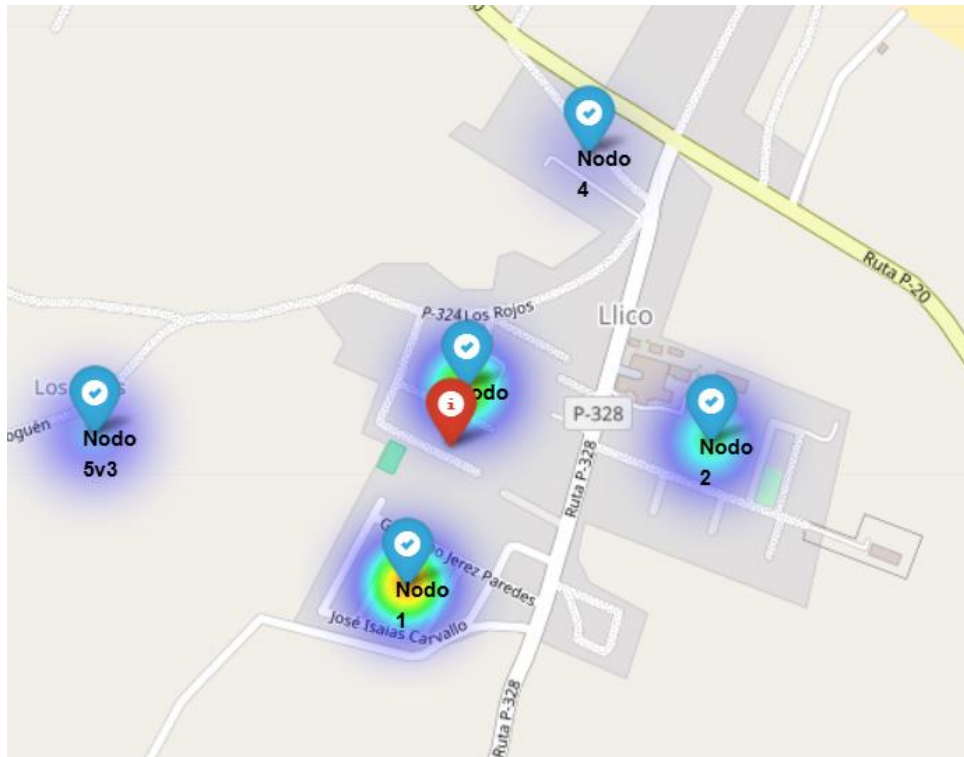
**Anexo 18:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 5



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

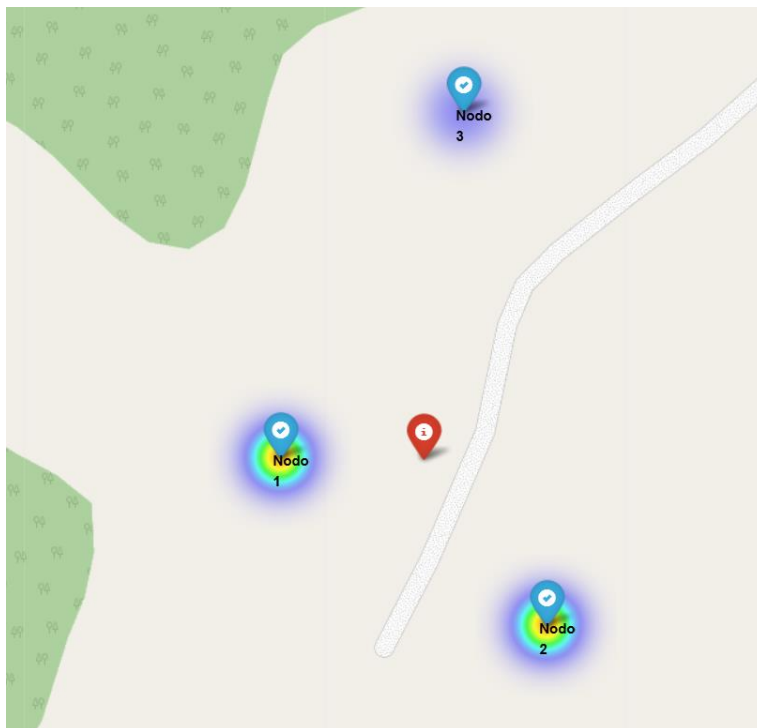


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

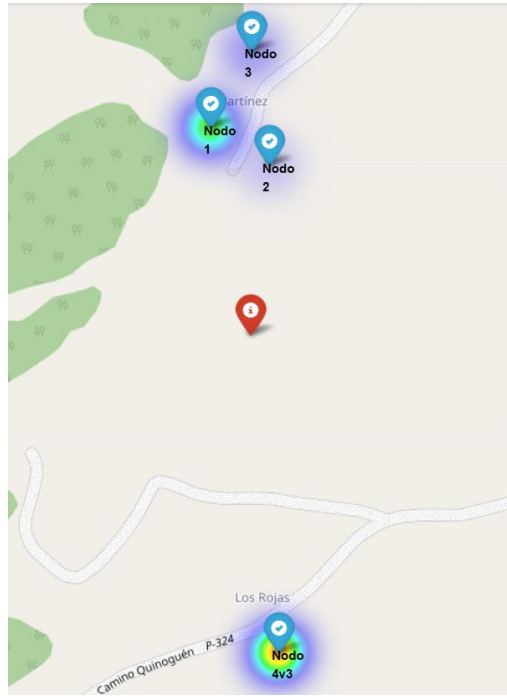


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

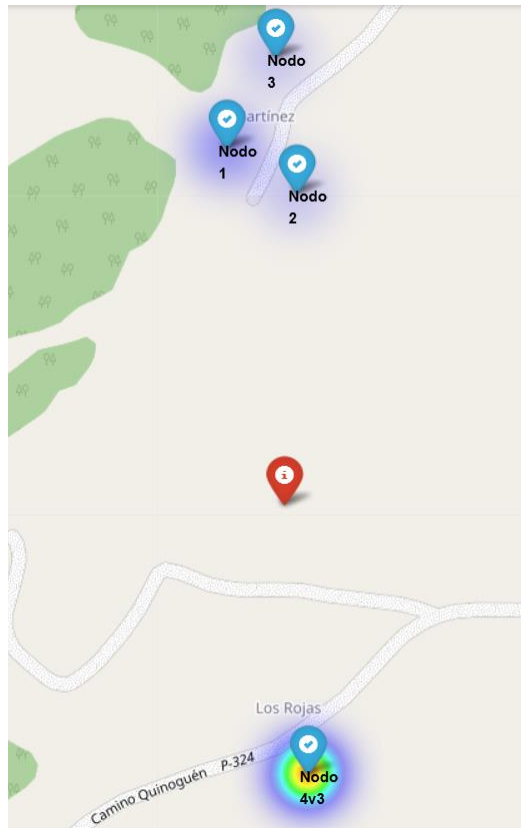
**Anexo 19:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 6.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

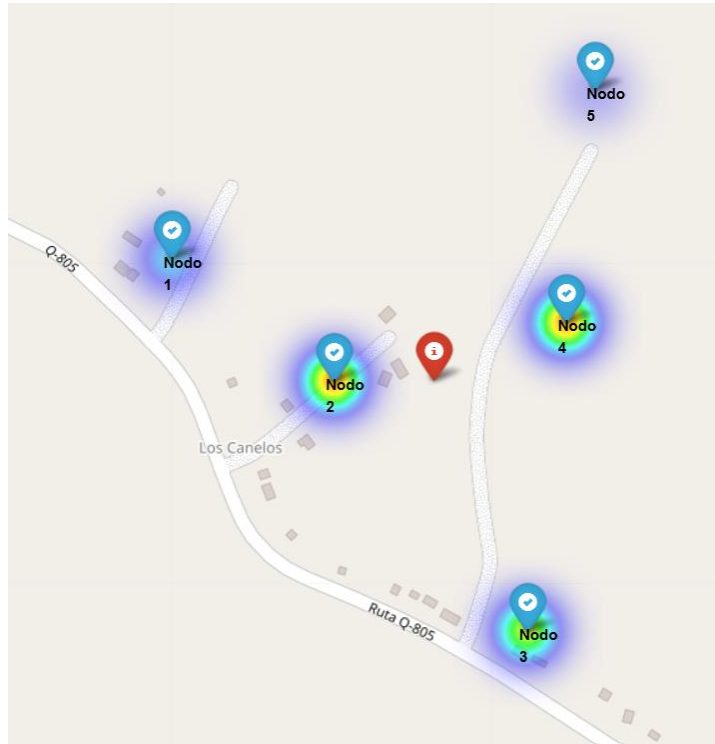


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

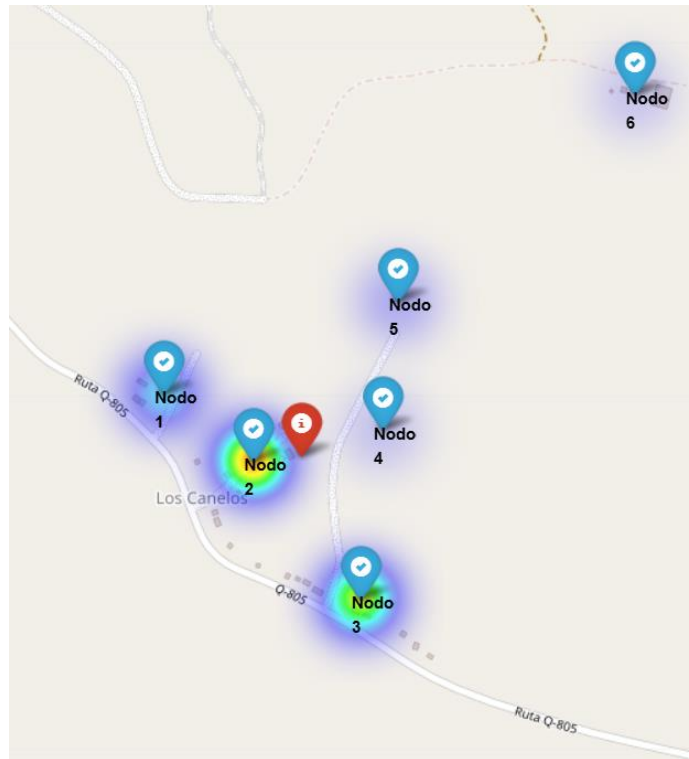


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

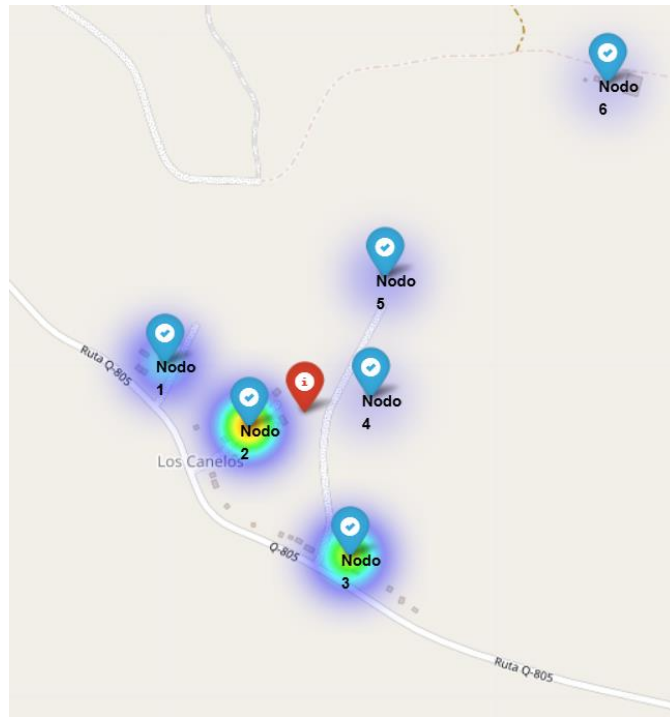
**Anexo 20:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 7.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

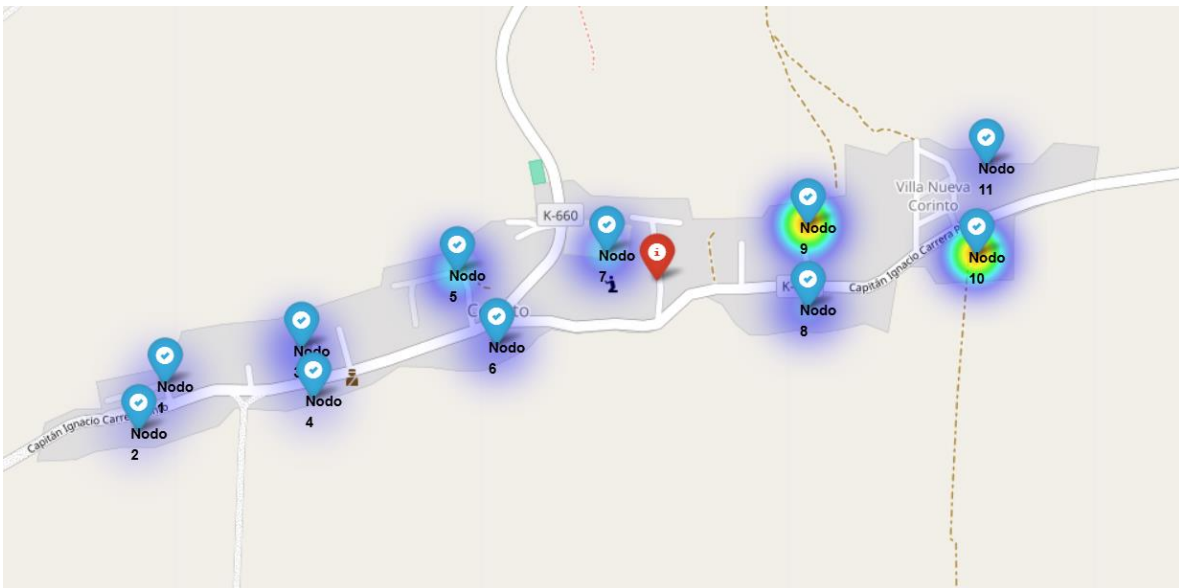


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

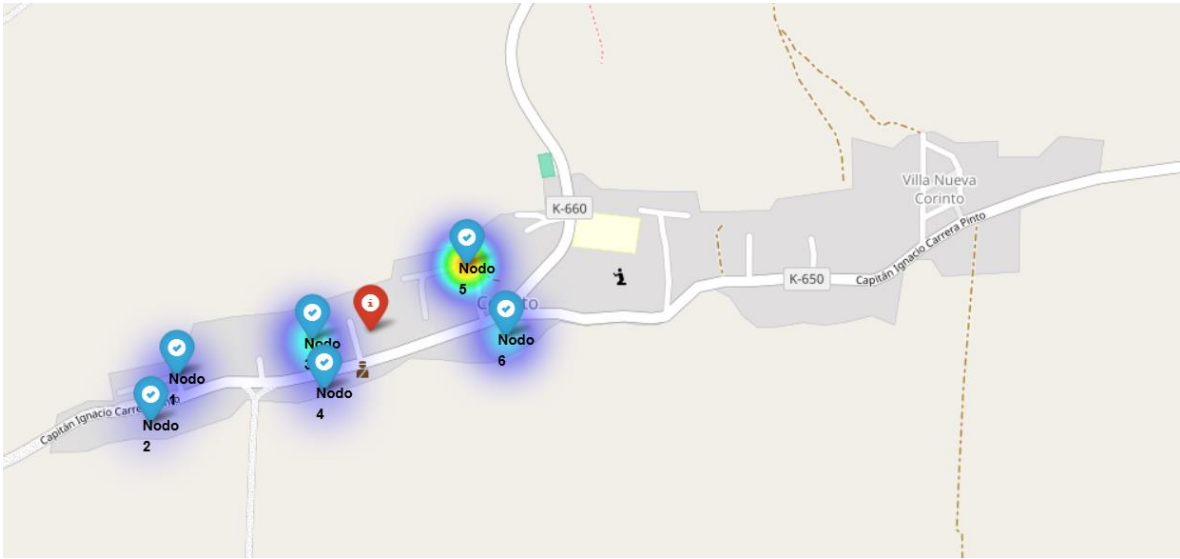


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

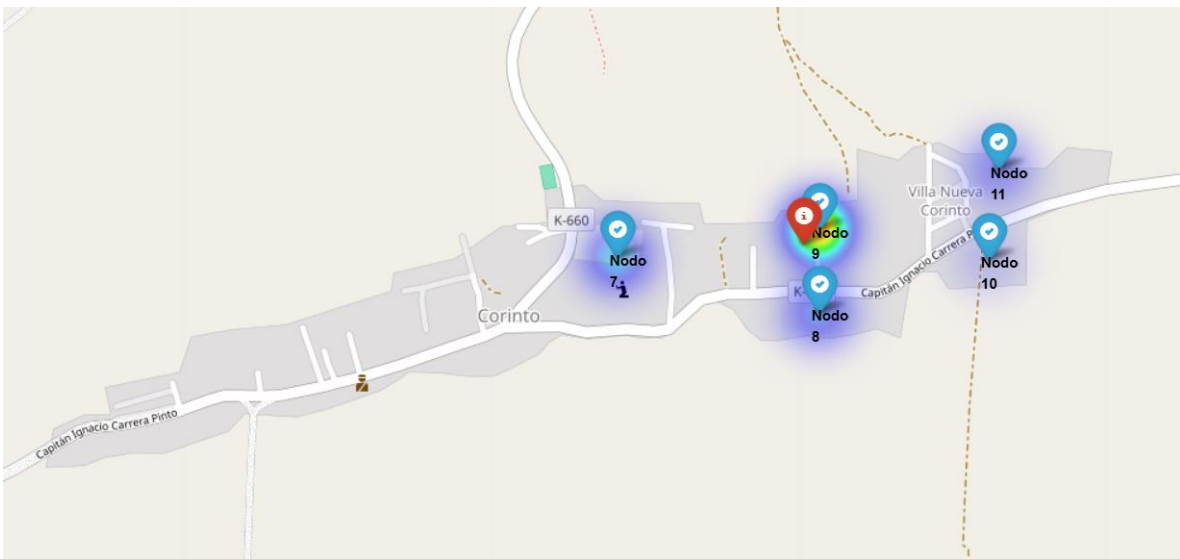
**Anexo 21:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 8.



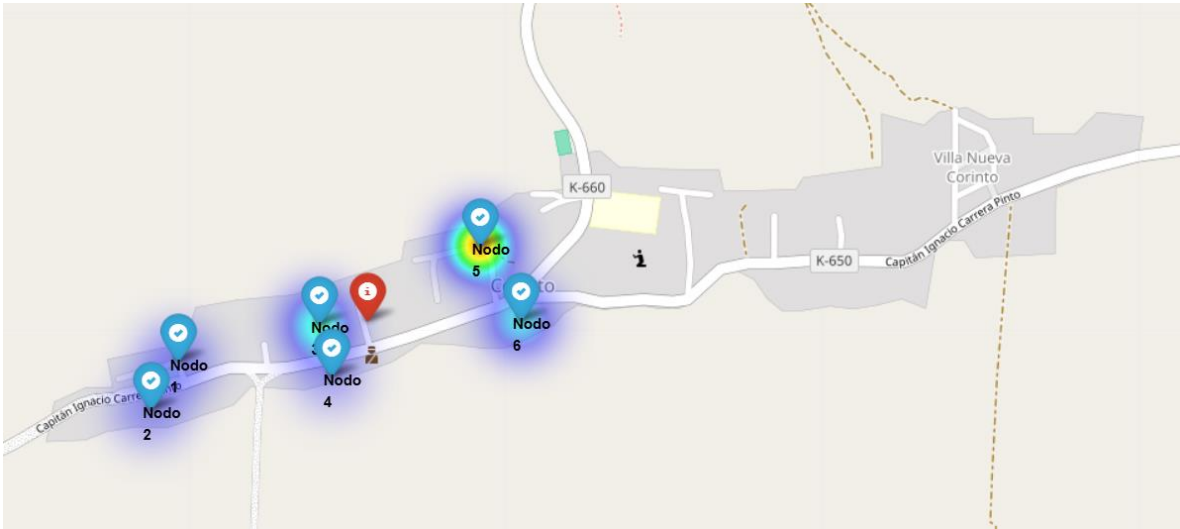
Fuente: Elaboración propia, variación 1.



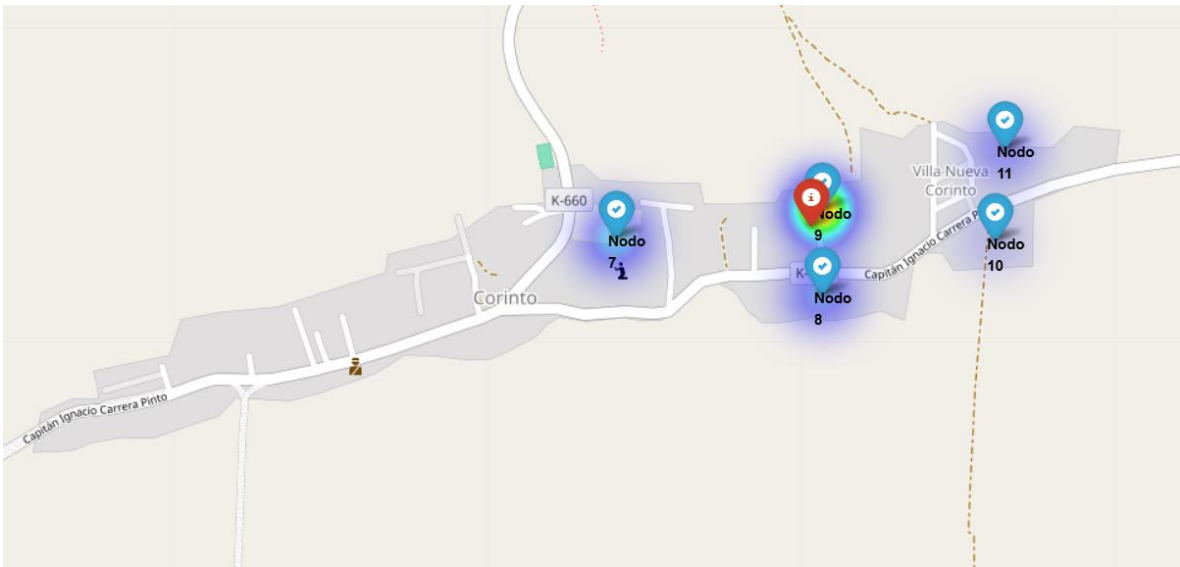
Fuente: Elaboración propia, variación 2A.



Fuente: Elaboración propia, variación 2B.

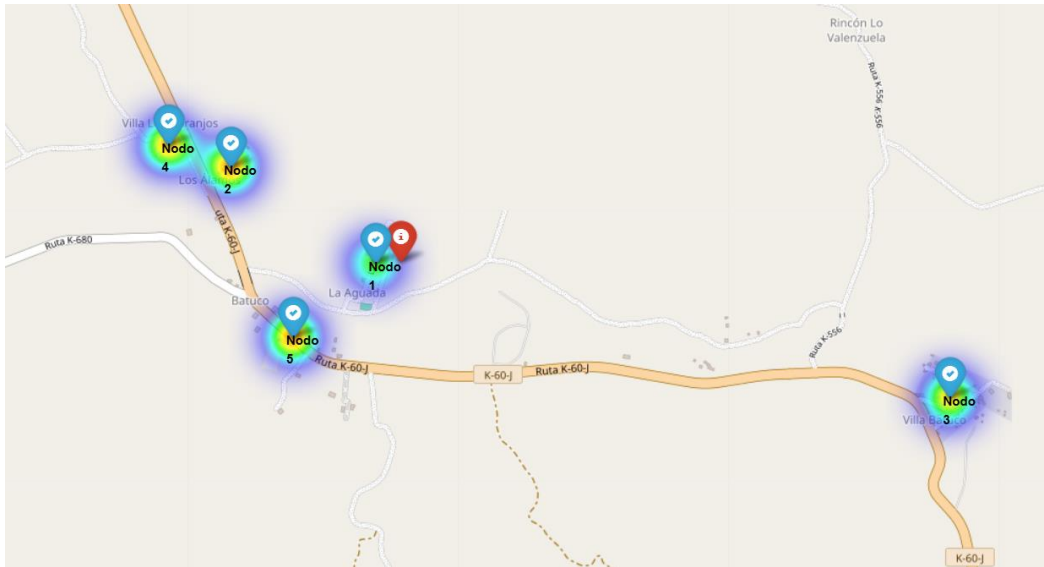


Fuente: Elaboración propia, variación 3A.

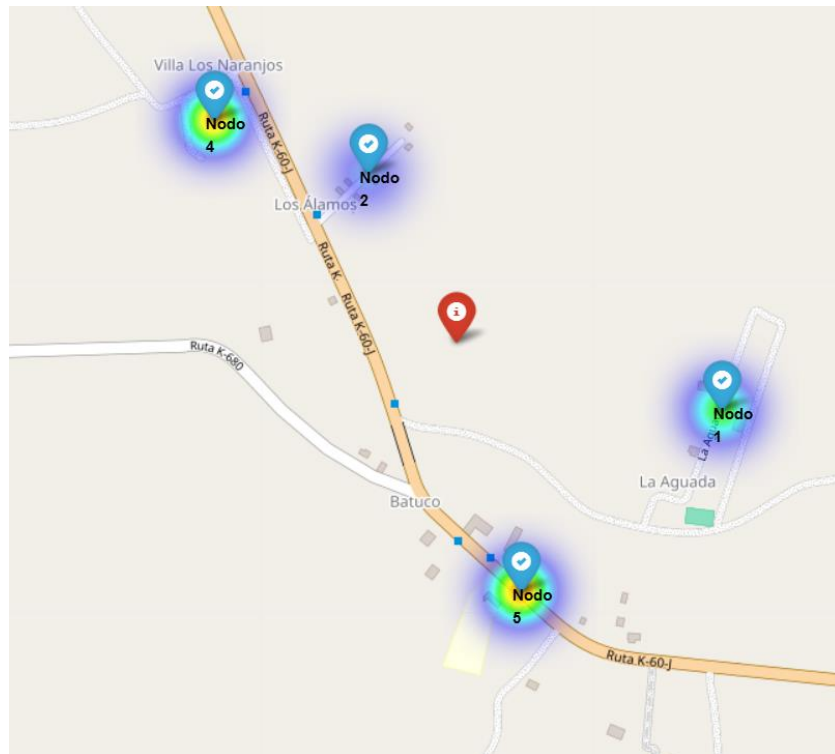


Fuente: Elaboración propia, variación 3B.

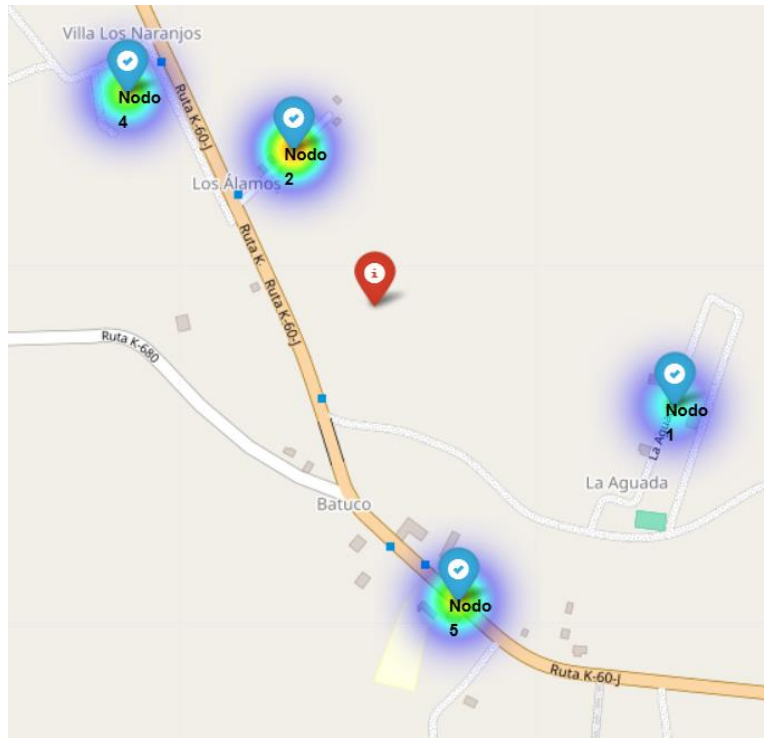
**Anexo 22:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 9.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

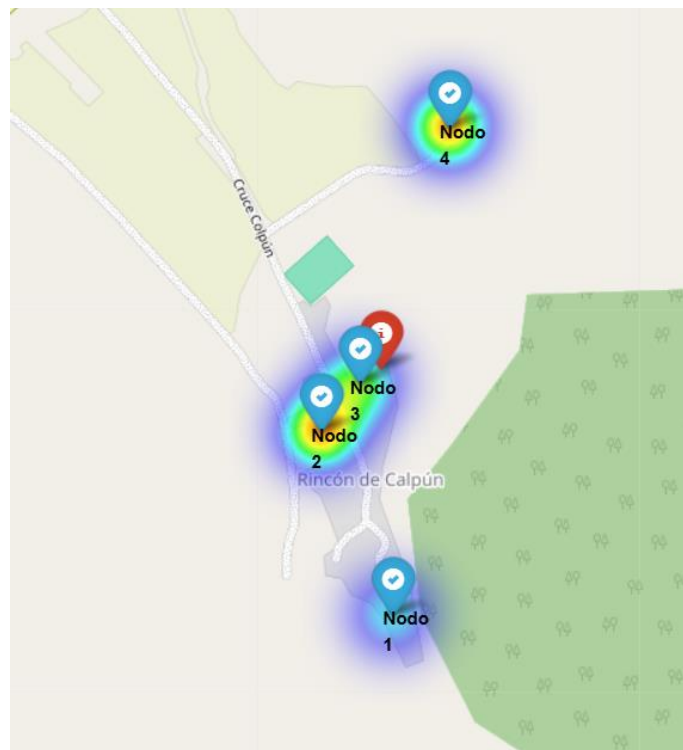


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

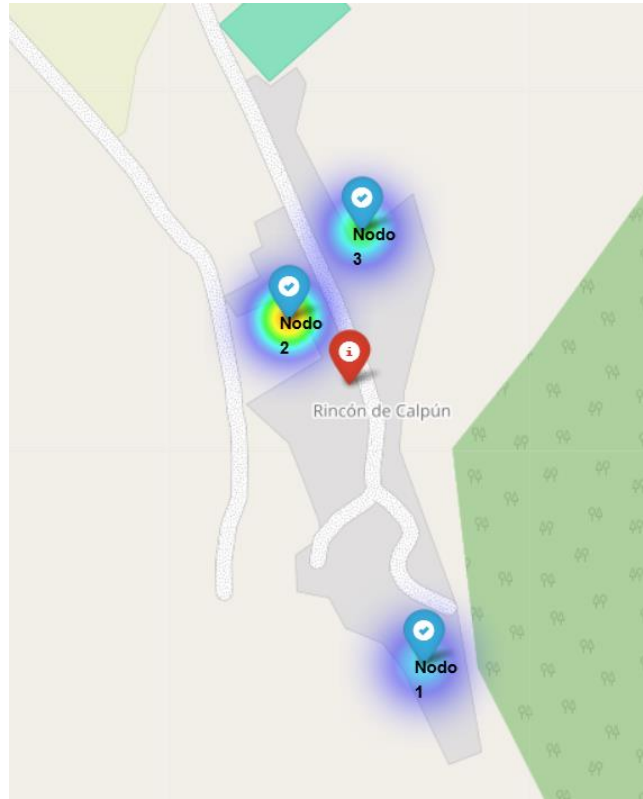


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

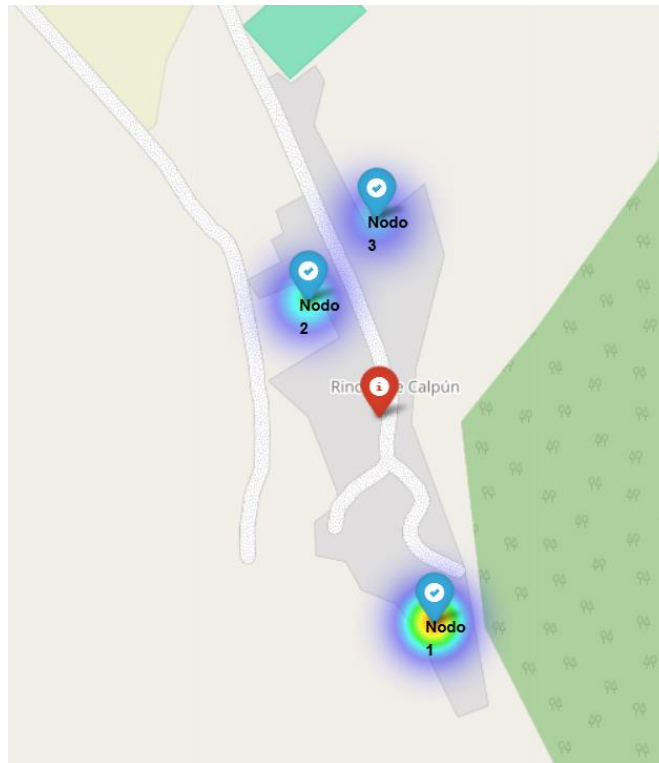
**Anexo 23:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 10.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.

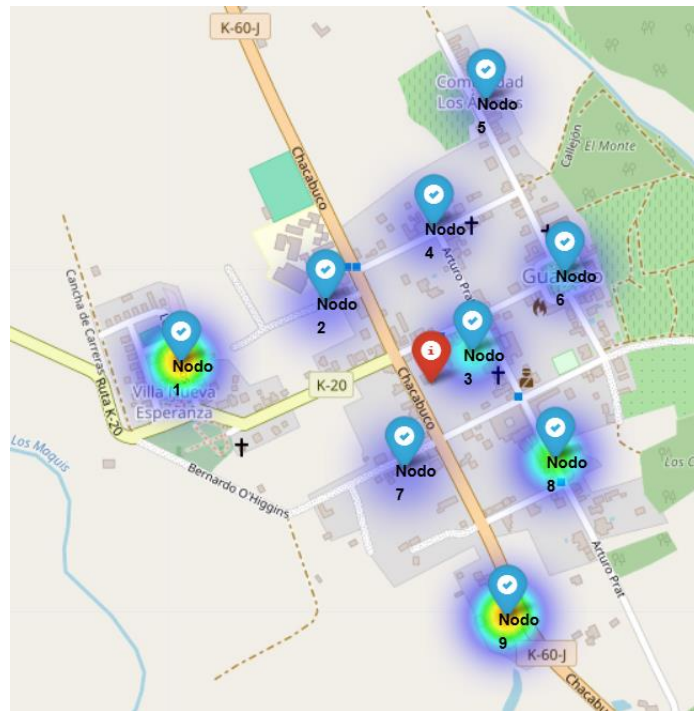


Fuente: Elaboración propia, variación 2.

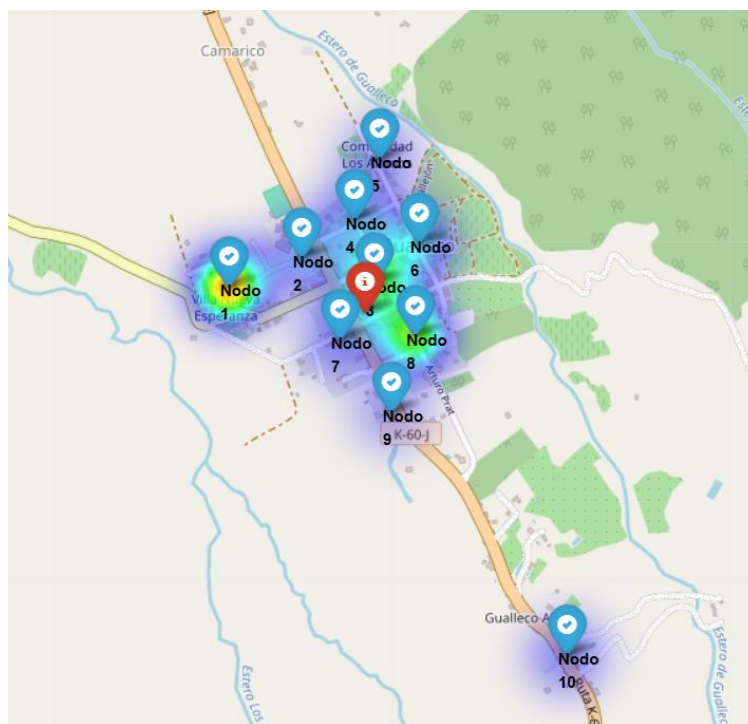


Fuente: Elaboración propia, variación 3.

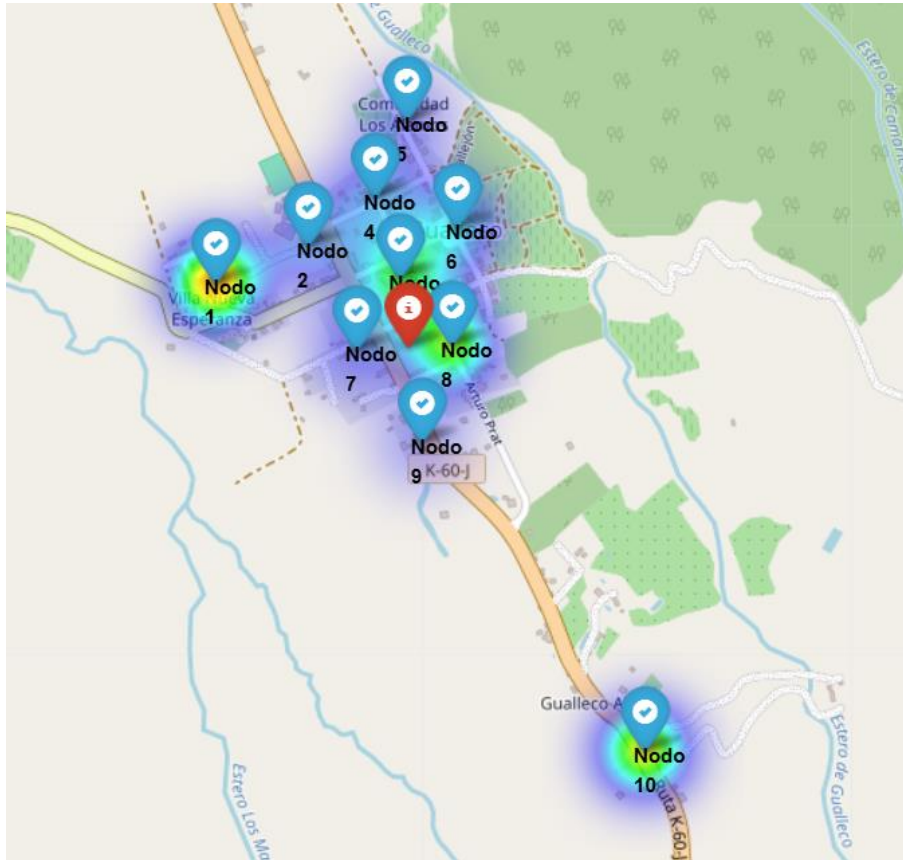
**Anexo 24:** Gráficos de variaciones 1, 2 y 3 instancia 11.



Fuente: Elaboración propia, variación 1.



Fuente: Elaboración propia, variación 2.



Fuente: Elaboración propia, variación 3.

## Anexo 25: Código de modelo CFLP para localización de reservorios de agua.

```

# Instalación de librerías necesarias
!pip install pulp geopy folium openpyxl

#Importar librerías
import pandas as pd
from geopy.distance import geodesic
from pulp import LpProblem, LpMinimize, LpVariable, lpSum, LpBinary, PULP_CBC_CMD

#Subir archivos desde el equipo
from google.colab import files
uploaded = files.upload()

# Lectura de archivos subidos como dataframe
df_nodos = pd.read_excel("Instancia11.xlsx")
df_reservorios = pd.read_excel("ReservoriosI11.xlsx")

df_nodos.head()

df_reservorios.head()

#Indexar nodos y reservorios

```

```

nodos = list(df_nodos.index)
reservorios = list(df_reservorios.index)

# Realizar diccionarios de datos
demanda = {i: df_nodos.loc[i, "Peso"] for i in nodos}
capacidad = {j: df_reservorios.loc[j, "Capacidad"] for j in reservorios}

#Calculo distancias geodésicas entre cada nodo y cada reservorio
distancias = {
    (i, j): geodesic(
        (df_nodos.loc[i, "Latitud"], df_nodos.loc[i, "Longitud"]),
        (df_reservorios.loc[j, "Latitud"], df_reservorios.loc[j, "Longitud"])
    ).km
    for i in nodos for j in reservorios
}

#Definición del modelo de programación lineal entera
model = LpProblem("Localizacion_Reservorios", LpMinimize)

# Variables binarias
x = LpVariable.dicts("Asignacion", (nodos, reservorios), cat=LpBinary)
y = LpVariable.dicts("Construir", reservorios, cat=LpBinary)

# Parámetro: máximo de reservorios a instalar
k = 2

# Función objetivo: minimizar distancia total ponderada por demanda
model += lpSum(demanda[i] * distancias[i, j] * x[i][j] for i in nodos for j in reservorios)

# Restricción: cada nodo debe ser asignado a un reservorio
for i in nodos:
    model += lpSum(x[i][j] for j in reservorios) == 1

# Restricción: solo se asigna a reservorios construidos
for i in nodos:
    for j in reservorios:
        model += x[i][j] <= y[j]

# Restricción: capacidad de los reservorios
for j in reservorios:
    model += lpSum(demanda[i] * x[i][j] for i in nodos) <= capacidad[j]

# Restricción: máximo de k reservorios
model += lpSum(y[j] for j in reservorios) <= k

# Resolución del modelo
model.solve(PULP_CBC_CMD(msg=1))

# Almacenar resultados en DataFrame
resultados = []
for i in nodos:
    for j in reservorios:
        if x[i][j].varValue == 1:
            resultados.append({
                "Nodo": df_nodos.loc[i, "Punto"],

```

```

"Reservorio Asignado": df_reservorios.loc[j, "Reservorio"],
"Lat Nodo": df_nodos.loc[i, "Latitud"],
"Lon Nodo": df_nodos.loc[i, "Longitud"],
"Lat Reservorio": df_reservorios.loc[j, "Latitud"],
"Lon Reservorio": df_reservorios.loc[j, "Longitud"],
"Distancia (km)": distancias[i, j],
"Demanda Nodo": demanda[i]
})

```

```
df_resultados = pd.DataFrame(resultados)
```

```

# Guardar archivo de resultados
df_resultados.to_excel("Resultado_Localizacion.xlsx", index=False)
print("Archivo guardado: Resultado_Localizacion.xlsx")

```

### Anexo 26: Tabla de Resultados CFLP Instancia 1

Nodo	Reservorio Asignado	Lat Nodo	Lon Nodo	Lat Reservorio	Lon Reservorio	Distancia (km)	Demanda Nodo
Nodo 1	4	-36.91661528	-72.75081319	-36.9160916	-72.7507675	0.058253561	18
Nodo 2	4	-36.9152566	-72.7506928	-36.9160916	-72.7507675	0.092908085	12
Nodo 3	2	-36.91490725	-72.7550625	-36.9168926	-72.7517809	0.366134815	5
Nodo 4	2	-36.91852833	-72.75278767	-36.9168926	-72.7517809	0.202487697	3
Nodo 5	2	-36.9182182	-72.7503284	-36.9168926	-72.7517809	0.195941904	5
Nodo 6 JV	2	-36.91537089	-72.75498809	-36.9168926	-72.7517809	0.331956002	1

### Anexo 27: Tabla de Resultados CFLP Instancia 2

Nodo	Reservorio Asignado	Lat Nodo	Lon Nodo	Lat Reservorio	Lon Reservorio	Distancia (km)	Demanda Nodo
Nodo 1	2	-36.8438	-72.922	-36.8423	-72.9229	0.186155	14
Nodo 2	1	-36.8431	-72.922	-36.8422	-72.9226	0.108921	26
Nodo 3	2	-36.8427	-72.9239	-36.8423	-72.9229	0.098318	9
Nodo 4	2	-36.8417	-72.9236	-36.8423	-72.9229	0.092689	33
Nodo 5	1	-36.841	-72.922	-36.8422	-72.9226	0.150181	26

**Anexo 28:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 3

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	2	-36.8316	-72.9106	-36.8306	-72.9109	0.106807	11
<b>Nodo 2</b>	2	-36.8308	-72.9105	-36.8306	-72.9109	0.040922	4
<b>Nodo 3</b>	4	-36.8304	-72.9114	-36.8304	-72.9115	0.010723	20
<b>Nodo 4</b>	4	-36.8299	-72.9112	-36.8304	-72.9115	0.066427	11

**Anexo 29:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 4

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	3	-36.921	-72.6831	-36.9214	-72.6828	0.0499	10
<b>Nodo 2</b>	3	-36.9209	-72.6823	-36.9214	-72.6828	0.070708	10
<b>Nodo 3</b>	2	-36.9195	-72.6832	-36.92	-72.6824	0.087464	15
<b>Nodo 4</b>	2	-36.9192	-72.6812	-36.92	-72.6824	0.138692	4

**Anexo 30:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 5

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	4	-37.2008	-73.5676	-37.1994	-73.567	0.158087	82
<b>Nodo 2</b>	2	-37.1994	-73.5638	-37.1982	-73.5658	0.215248	62
<b>Nodo 3</b>	4	-37.1988	-73.5668	-37.1994	-73.567	0.06582	73
<b>Nodo 4</b>	2	-37.1966	-73.5653	-37.1982	-73.5658	0.18587	21
<b>Nodo 5</b>	2	-37.1946	-73.5654	-37.1982	-73.5658	0.404547	37
<b>Nodo 6</b>	2	-37.1956	-73.5632	-37.1982	-73.5658	0.366283	24

**Anexo 31:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 6

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	1	-37.195	-73.5721	-37.1949	-73.5719	0.022973	19
<b>Nodo 2</b>	2	-37.1953	-73.5715	-37.195	-73.5718	0.041899	5
<b>Nodo 3</b>	1	-37.1944	-73.5717	-37.1949	-73.5719	0.058991	9

**Anexo 32:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 7

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	1	-37.7403	-72.2241	-37.7412	-72.2222	0.201605	12
<b>Nodo 2</b>	1	-37.7411	-72.2227	-37.7412	-72.2222	0.051094	19
<b>Nodo 3</b>	1	-37.7428	-72.2211	-37.7412	-72.2222	0.202676	17
<b>Nodo 4</b>	4	-37.7407	-72.2207	-37.7409	-72.2218	0.097831	4
<b>Nodo 5</b>	4	-37.7391	-72.2205	-37.7409	-72.2218	0.228713	6

**Anexo 33:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 8

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	3	-35.443209	-71.87275225	-35.44255059	-71.86924629	0.326593217	19
<b>Nodo 2</b>	3	-35.443891	-71.873217	-35.44255059	-71.86924629	0.389982921	8
<b>Nodo 3</b>	3	-35.44268	-71.870308	-35.44255059	-71.86924629	0.09745628	30
<b>Nodo 4</b>	3	-35.443412	-71.87009325	-35.44255059	-71.86924629	0.122689436	13
<b>Nodo 5</b>	3	-35.441579	-71.8675126	-35.44255059	-71.86924629	0.190769747	42
<b>Nodo 6</b>	3	-35.44264	-71.8668025	-35.44255059	-71.86924629	0.22210011	28
<b>Nodo 7</b>	6	-35.441293	-71.864835	-35.44110286	-71.86142344	0.310467558	39
<b>Nodo 8</b>	6	-35.442087	-71.861223	-35.44110286	-71.86142344	0.110668518	34
<b>Nodo 9</b>	6	-35.440879	-71.8612332	-35.44110286	-71.86142344	0.030270815	63
<b>Nodo 10</b>	6	-35.441313	-71.8581985	-35.44110286	-71.86142344	0.293737105	4
<b>Nodo 11</b>	6	-35.44001	-71.8580215	-35.44110286	-71.86142344	0.331829545	26

**Anexo 34:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 9

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	1	-35.3191	-71.9529	-35.3194	-71.95112232	0.159751584	33
<b>Nodo 2</b>	4	-35.3159	-71.9587	-35.3179	-71.95746239	0.244011465	22
<b>Nodo 3</b>	1	-35.3236	-71.9295	-35.3194	-71.95112232	2.021165446	38
<b>Nodo 4</b>	4	-35.3152	-71.9613	-35.3179	-71.95746239	0.455668464	39
<b>Nodo 5</b>	4	-35.3216	-71.9562	-35.3179	-71.95746239	0.428041382	40

**Anexo 35:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 10

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	3	-35.0336	-72.0409	-35.0318	-72.0415	0.20151	14
<b>Nodo 2</b>	3	-35.0314	-72.0419	-35.0318	-72.0415	0.060923	21
<b>Nodo 3</b>	2	-35.0309	-72.0414	-35.0307	-72.0411	0.034067	17
<b>Nodo 4</b>	2	-35.0279	-72.0401	-35.0307	-72.0411	0.32595	6

**Anexo 36:** Tabla de Resultados CFLP Instancia 11

<b>Nodo</b>	<b>Reservorio Asignado</b>	<b>Lat Nodo</b>	<b>Lon Nodo</b>	<b>Lat Reservorio</b>	<b>Lon Reservorio</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Demanda Nodo</b>
<b>Nodo 1</b>	1	-35.2468	-71.9877	-35.2467	-71.9839	0.352284	46
<b>Nodo 2</b>	1	-35.246	-71.9854	-35.2467	-71.9839	0.158859	23
<b>Nodo 3</b>	1	-35.2467	-71.983	-35.2467	-71.9839	0.074366	34
<b>Nodo 4</b>	1	-35.245	-71.9837	-35.2467	-71.9839	0.185912	23
<b>Nodo 5</b>	1	-35.2434	-71.9828	-35.2467	-71.9839	0.378802	18
<b>Nodo 6</b>	1	-35.2456	-71.9816	-35.2467	-71.9839	0.238746	28
<b>Nodo 7</b>	4	-35.2482	-71.9841	-35.2481	-71.9828	0.120185	21
<b>Nodo 8</b>	4	-35.2481	-71.9817	-35.2481	-71.9828	0.102293	39
<b>Nodo 9</b>	4	-35.2502	-71.9825	-35.2481	-71.9828	0.225502	15

## UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA

### RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

<b>Departamento</b>	: Departamento de Ingeniería Industrial.
<b>Carrera</b>	: Ingeniería Civil Industrial.
<b>Nombre del memorista</b>	: Felipe Ignacio Godoy Ortega.
<b>Título de la memoria</b>	: Aplicación y Comparación de Modelos de Localización de Instalaciones para Mitigación de Daños por Incendios Forestales.
<b>Fecha de la presentación oral</b>	:
<b>Profesores Guía</b>	: María Magdalena Jensen Castillo, Lorena del Carmen Pradenas Rojas.
<b>Profesor(es) Revisor(es)</b>	: Carlos Contreras Bolton.
<b>Concepto</b>	:
<b>Calificación</b>	:

#### **Resumen (máximo 200 palabras)**

Los incendios forestales en Chile han tenido un fuerte impacto en comunidades rurales, creando la necesidad de estrategias preventivas. Este estudio tuvo como objetivo analizar la funcionalidad y el rendimiento de un modelo de programación matemática para la localización de reservorios de agua en pequeñas comunidades, como medida de mitigación ante estos eventos. Para ello, se revisó literatura en logística humanitaria, se definió un modelo de localización tipo *Capacitated Facility Location Problem (CFLP)* y se generaron datos de demanda mediante el método de centro de gravedad ponderado, en base a la distribución habitacional de 11 comunidades de las regiones del Biobío y Maule.

La metodología incluyó una aproximación inicial heurística con el centro de gravedad, seguida por el modelo CFLP que integró restricciones de capacidad, cobertura y asignación óptima. Los resultados mostraron que la mayoría de las ubicaciones óptimas difirieron de las propuestas iniciales, validando la utilidad de combinar enfoques heurísticos y exactos .

El modelo propuesto es replicable, adaptable a diversos contextos rurales y útil para la planificación preventiva frente a incendios, demostrando que la integración de análisis

geográfico y programación matemática permite abordar problemas territoriales incluso con información limitada.