



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe 3

**Minimización del costo de recolección de agua de
neblina en sectores rurales de Chile para el
período 2025-2075**

Grupo 63

Matías Alarcón, 21643466, sección 1
Jorge Jacque, 21638071, sección 2
Denise Kinzel, 21638446, sección 2
Felipe Lobos, 21637520, sección 3
Diego Sfeir, 21638187, sección 4
Felipe Torres, 21637857, sección 4

Fecha entrega: 23 de junio de 2023

Índice

1. Descripción del problema	3
1.1. Contextualización del problema	3
1.2. Impacto del problema	3
1.3. Objetivo	4
2. Modelación del problema	5
2.1. Supuestos	5
2.2. Conjuntos	5
2.3. Parámetros	6
2.4. Variables	6
2.5. Función objetivo	6
2.6. Restricciones	7
3. Definición de datos	8
3.1. Costos	8
3.2. Superficie efectiva y área ocupada	9
3.3. Demanda de agua y humedad por región	9
3.4. Frecuencia de mantención	9
3.5. Recolección de agua	9
4. Implementación de Gurobi y resultados obtenidos	10
5. Análisis de Sensibilidad	11
5.1. d_{it} : demanda de agua potable rural por año en la región i y en el año t, en litros	12
5.2. Cm_{midt} : costo de mantención de los atrapanieblas de material m y dimensión d, en la región i en el año t, en UF	12
5.3. Per_i : número de años máximo hasta la siguiente mantención según la región i	13
5.4. Desactivación de la restricción 5, correspondiente a la condición de mantención por cantidad recolectada	13
5.5. Desactivación de la restricción 8, correspondiente a la condición de construcción bajo superficie disponible	13
6. Conclusión	13
7. Bibliografía	15
8. Anexo	16

1. Descripción del problema

1.1. Contextualización del problema

La situación de escasez hídrica en Chile es un problema cada vez más preocupante. Un estudio de las Naciones Unidas (2021) mostró que, en las regiones desde Atacama hasta Ñuble, ha habido un déficit de casi 100 % de precipitaciones respecto del período 1981-2010. Además, el mismo estudio señala que se proyecta que la demanda consuntiva de agua aumente en un 4,5 % para el año 2030. Más aún, el Balance Hídrico Nacional (Ministerio de Obras Públicas, 2017) prevé que la disponibilidad de agua caerá en un 50 % hacia el periodo 2030-2060, lo que agrava aún más la situación. La falta de acceso a agua potable segura y confiable en estas regiones puede tener consecuencias negativas en la salud y el bienestar de la población, así como en la economía y el desarrollo social. Por lo anterior, es fundamental y urgente encontrar soluciones innovadoras y efectivas que puedan mejorar la calidad de vida de las personas y enfrentar los desafíos que presenta la escasa disponibilidad de agua potable en estas regiones.

Particularmente, en los sectores rurales del país se tiene menos acceso a agua potable. Son casi 400.000 viviendas que no tienen acceso a agua potable. Dentro del mundo rural, un 47,2 % se abastece de agua de pozos y vertientes cuyas aguas no están tratadas. Es decir, que tienen contaminantes. Además, durante el verano muchas veces se quedan sin abastecimiento. (Teletrece, 2022)

Por este motivo, la búsqueda de soluciones para la escasez hídrica ha sido una preocupación constante en la sociedad y se han desarrollado diversos métodos para abordarla. Sin embargo, muchos de ellos han demostrado no ser amigables con el medio ambiente. Un claro ejemplo es la desalinización del agua de mar, que utiliza métodos químicos y físicos para eliminar la sal del agua. Si bien este proceso puede ser efectivo en la obtención de agua dulce, tiene un impacto negativo en el medio ambiente. Los residuos del proceso de desalinización son altamente tóxicos y se depositan en el fondo marino, causando la contaminación del agua, hasta incluso la muerte de los organismos marinos. Además, la desalinización requiere una gran cantidad de energía, que en muchos casos proviene de fuentes no renovables. En Chile, un 51,7 % de la energía se produce a partir de fuentes no renovables como el gas natural, petróleo y carbón, lo que aumenta la huella de carbono del país y contribuye al cambio climático (Vivanco, 2019).

No obstante, existen también soluciones inocuas para el planeta, como corresponden los atrapanieblas. En específico, consisten en una malla capaz de atrapar vapor de agua al ser colgada entre dos soportes, completamente extendida y perpendicular a la superficie del suelo. De esta forma, se puede captar la niebla, para luego ser recolectada para el consumo humano.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se puede decir que la escasez de precipitaciones, el futuro agotamiento de reservas de agua y la creciente demanda de agua de la población, hace que la búsqueda de maneras de solventar esta problemática de forma eco-amigable sea necesaria y urgente. Es por esto que se propone minimizar los costos asociados a recolectar agua proveída a las principales sectores rurales desde la Región de Atacama a la de Ñuble, a través de instalaciones de atrapanieblas.

1.2. Impacto del problema

Para implementar los atrapanieblas se requiere de ciertas condiciones geográficas especiales, ya que no todo tipo de terreno es apto para ello. En términos generales, se necesita una topografía que permita la formación de nubes densas de agua, además de una combinación adecuada de vientos y presiones atmosféricas (Cereceda, 1992).

En ese sentido, la geografía del país es favorable para este tipo de recolección de agua, ya que al ser angosto y tener gran parte del territorio cerca del mar, las neblinas abundan a lo largo de Chile. Sin embargo, en la zona sur del país no se presenta escasez de agua, por lo que no tendría sentido

invertir en atrapanieblas en las últimas regiones, pues además de no aportar significativamente agua, en comparación a la disponible, con los vientos y tormentas es más probable que los atrapanieblas sufran daños que requieran reparación. Por estas razones y los datos exhibidos por Naciones Unidas, es que se decide estudiar la instalación de atrapanieblas en Chile desde la región de Atacama hasta la del Ñuble.

Además, en las zonas rurales del país el aire está menos contaminado, por lo que el agua recolectada por los atrapanieblas estaría lista para el consumo y sería utilizable para las pequeñas comunidades que residen de estos sectores.

En este orden de ideas, se estima que la implementación de un sistema de atrapanieblas consistente en alrededor de 250 m^2 puede recolectar más de 1500 litros diarios de agua dulce lista para el consumo, según indica la Comunidad Agrícola de Peña Blanca. Esto, considerando que el consumo promedio de agua de una persona es de 170 litros (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2020), puede ser tomado como una buena alternativa para mitigar el impacto de la escasez hídrica.

Siguiendo lo anterior, presentar un método de recolección de agua que no requiera energía, que llevado a cabo provee de un recurso limpio y accesible para toda la población donde se instalen, y que implementa solamente procesos naturales en su actuar, implica una reducción en los costos de obtención de este recurso. Esto favorece incluso más a la sociedad, considerando que el agua es recolectada en la misma región, por lo que el transporte de agua desde otras regiones podría verse reducido o completamente eliminado, permitiendo que todos estos recursos económicos sean destinados a otras problemáticas del país. Ejemplo de gastos en este término, en los que se podría incurrir en el futuro, es la “carretera hídrica” que busca transportar agua desde la zona centro a la zona norte del país, y que es un proyecto que ha sido fuertemente criticado y considerado como insostenible.

En síntesis, la construcción de diversas redes de atrapanieblas asoma como una excelente iniciativa. Así, se podría diversificar la matriz de obtención de agua, al aprovechar una fuente que no ha sido incorporada de forma sistemática como lo es la niebla.

1.3. Objetivo

En el presente informe, se busca desarrollar un modelo de optimización que minimice los costos asociados para cubrir la demanda de agua consuntiva potable rural recolectada por medio de atrapanieblas en el país, evaluando su instalación a lo largo de las regiones del país con crisis hídrica. El Estado, a través de la Dirección General de Aguas (DGA), debe buscar una forma de implementar los atrapanieblas. En ese sentido, el principal tomador de decisiones de este proyecto es la DGA, ya que es el principal ente encargado de velar por el adecuado uso de los recursos hídricos del país. De este modo, se garantiza que su funcionamiento pueda ser el más eficiente posible.

La instalación del atrapanieblas tiene varias decisiones asociadas. Estas son: el material de la malla, el tamaño de los poros, la altura y ancho de la estructura, la ubicación geográfica, la instalación, el depósito de almacenamiento y el mantenimiento. Este último es esencial en la instalación de atrapanieblas ya que, sin la mantención necesaria, el sistema no recolectará agua de manera eficiente. Esto incluye: la limpieza de la malla, la revisión de las estructuras de soporte y la eliminación de sedimentos en el depósito de almacenamiento. Así, se debe decidir también lo que pasará con el agua después de ser recolectada y la distribución de la misma. Por añadidura, todas las decisiones mencionadas deben ser tomadas considerando que se busca minimizar los costos para cubrir la demanda, lo que implica una cuidadosa evaluación de costos y beneficios de cada opción de diseño.

A pesar de las ventajas de los atrapanieblas, su implementación se ve restringida por el costo tanto de instalación, como de mantenimiento y reparación ante eventos meteorológicos extremos. Es importante evaluar cuidadosamente estos costos antes de implementar un atrapanieblas, para

asegurar su viabilidad y sustentabilidad a largo plazo. De esta manera, en el presente documento se propone un modelo que tiene como objetivo minimizar los costos de la recolección de agua suministrada por medio de atrapanieblas para satisfacer la demanda de agua potable rural en las siete regiones del país en donde se implementaría este sistema.

2. Modelación del problema

2.1. Supuestos

- Se comenzará el proyecto con 0 atrapanieblas construidos, vale decir, en el período antes del primero, habrán 0 atrapanieblas.
- El agua se demorará un tiempo despreciable en llegar desde los recolectores de agua de los atrapanieblas a las ciudades, de las regiones donde se instalen los atrapanieblas, en que se distribuyen.
- Existen 5 tipos de materiales considerados para la confección de un atrapaniebla, y cada atrapaniebla puede ser de sólo un material.
- La construcción de los atrapanieblas es tal que permite que las mallas se mantengan completamente extendidas durante el tiempo que operan.
- Cada atrapanieblas puede ser construido con una de tres dimensiones distintas, con el fin de mantener la realidad física de las estructuras.
- No se construirán atrapanieblas en zonas donde su construcción no puede ser realizada, o donde pelagra debido a factores ambientales como quebradas o colinas.
- Se supondrá la no ocurrencia de eventos catastróficos que generen una necesidad de adelantar el mantenimiento, como pueden ser inundaciones o el robo de los equipamientos. Además, los atrapanieblas no sufrirán daños tales que impliquen un reemplazo total del equipo.
- Las principales características de la niebla como humedad, densidad se toman como un promedio de todo el año.
- Existe suficiente material en el mercado para poder construir cualquier sistema de atrapanieblas.
- Se supondrá que la realización de mantención por cantidad de litros recolectados, no generará un cambio en el tiempo en el que se realizará la mantención por periodicidad, y viceversa.
- Se supondrá que el costo de realizar la mantención, independiente de si es por periodicidad o por superar la recolección de agua (similar a vida útil), será el mismo.
- Se hace el supuesto de que cada atrapanieblas, de una región específica, y de material y dimensión específicos, recolectarán la misma cantidad de agua por período de tiempo.
- Se supondrá que el estanque de almacenamiento es lo suficientemente grande como para alojar una cantidad arbitraria de agua.

2.2. Conjuntos

- $m \in \{1, \dots, 5\}$, los tipos de material.
- $i \in \{1, \dots, 7\}$, las regiones a considerar.
- $d \in \{1, 2, 3\}$, las tres dimensiones posibles de los atrapanieblas.
- $t \in \{1, \dots, 50\}$, el año de funcionamiento desde la implementación del proyecto.

2.3. Parámetros

- d_{it} : Demanda de agua consuntiva anual en la región i en el mes t en m^3 .
- Cm_{midt} : Costo de mantención de los atrapanieblas de material m y dimensión d , en la región i , en el período t .
- Ci_{midt} : Costo de instalación de los atrapanieblas de material m y dimensión d , en la región i , en el período t .
- M_{mid} : Capacidad máxima de recolección de agua en condiciones ideales, de un atrapanieblas de material m , dimensión d y región i .
- H_{it} : Humedad porcentual promedio de la niebla de la región i en el año t .
- E_m : Porcentaje de eficiencia de recolección de agua por el material m .
- S_i : Superficie efectiva en la región i para instalar atrapanieblas.
- A_d : Área ocupada por un atrapanieblas de dimensión d .
- Per_i : Número de años máximo hasta la siguiente mantención según la región i .
- γ_{mid} : Cantidad máxima de litros recolectados admisible, por un conjunto de atrapanieblas de material m , región i y dimensión d , en un período de tiempo antes de una mantención.

2.4. Variables

Las variables a utilizar para modelar el problema atingente, corresponderán a las siguientes:

- X_{midt} = cantidad de atrapanieblas de material m y dimensión d , en la región i y en el período t
- Y_{midt} = cantidad de atrapanieblas de material m y dimensión d , en la región i , que deben recibir mantención en el período t
- I_{it} = cantidad de agua almacenada en m^3 en la región i al final del período t
- $Z_{midt} = \begin{cases} 1, & \text{si la cantidad de agua recolectada por los atrapanieblas de material } m, \text{ dimensión } d, \\ & \text{de la región } i, \text{ luego de la última mantención, supera el límite } \gamma_{mid} \\ & \text{establecido, en el período } t \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $Q_{midt} = \begin{cases} 1, & \text{si se debe hacer mantenimiento al conjunto de atrapanieblas } X_{midt} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

2.5. Función objetivo

La función objetivo que viene a modelar este problema responde a minimizar los costos asociados a la implementación y mantención de conjuntos de atrapanieblas en las 7 regiones descritas, en un horizonte de 50 años. Estos dispositivos variarán según material y dimensiones, permitiendo diferentes capacidades de recolección y, a su vez, distintos costos.

$$\min \sum_{t=1}^{50} \sum_{i=1}^7 \sum_{m=1}^5 \sum_{d=1}^3 (Cm_{midt} \cdot Y_{midt} + Ci_{midt} \cdot (X_{midt} - X_{mid(t-1)}))$$

2.6. Restricciones

Las restricciones que serán consideradas para modelar este problema, apuntan a generar un sistema de atrapanieblas funcional que respete una determinada demanda de agua anual para cada región, con la posibilidad de seguir instalando equipos a lo largo de los años y considerando la mantención del sistema. De esta forma, las restricciones a utilizar son las siguientes:

1. **Se debe satisfacer la demanda anual de agua de cada región, respetando el almacenamiento disponible:**

$$I_{i,t-1} + \sum_m \sum_d E_m \cdot H_{it} \cdot M_{mid} \cdot X_{midt} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall t \in \{2, \dots, 50\}$$

$$0 + \sum_m \sum_d E_m \cdot H_{i1} \cdot M_{mid} \cdot X_{mid1} = I_{i,1} + d_{i1} \quad \forall i \in \{1, \dots, 7\}$$

La primera ecuación estipula el inventario para los años t y regiones i , considerando la recolección de agua como un producto entre la eficiencia propia del material, la humedad porcentual promedio anual, la capacidad máxima de recolección del atrapanieblas (en condiciones ideales) y la cantidad de atrapanieblas. La segunda ecuación viene a regular el inventario en el primer año, inventario inicial, que es 0.

2. **En el período 0, no habrán atrapanieblas contruidos previamente a considerar en el modelo, lo que implica también que no se relizará mantención ni habrá almacenamiento en los estanques:**

$$\begin{aligned} X_{mid0} &= 0 \\ Y_{mid0} &= 0 \\ I_{mid0} &= 0 \\ Q_{mid0} &= 0 \\ Z_{mid0} &= 0 \\ \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall d \in \{1, 2, 3\} \end{aligned}$$

3. **Los atrapanieblas se mantienen contruidos y funcionales de año en año:**

$$X_{midt} \geq X_{mid(t-1)} \quad \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall t \in \{1, \dots, 50\}$$

4. **La mantención de los atrapanieblas (distinguidos por material, dimensiones y región) cuando sea realizada, ha de considerar la mantención de X_{midt} unidades.**

$$\begin{aligned} Y_{midt} &\leq M \cdot Q_{midt} \quad , M \gg 0 \\ Y_{midt} &\geq 0 \\ Y_{midt} &\leq X_{midt} \\ Y_{midt} &\geq X_{midt} - M \cdot (1 - Q_{midt}) \\ \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall m \in 1, \dots, 5, \forall d \in \{1, 2, 3\}, \forall t \in \{1, \dots, 50\} \end{aligned}$$

Como se observa, la idea es forzar a que Y tome como valores 0 o X_{midt} . Por motivos estéticos y de espacio, aplíquese cada \forall a cada línea de restricción de esta restricción 4.

5. Una condición para la mantención es que cada conjunto de atrapanieblas de material m y dimensión d , en la región i , luego de haber recolectado una cantidad de γ_{mid} litros, ha de recibir mantenimiento. Además, este mantenimiento no se podrá realizar antes de los primeros 3 años luego de una mantención:

$$\gamma_{mid} + Z_{midt} \cdot M \geq \sum_{r=t}^{t+s} E_m \cdot H_{ir} \cdot M_{mid} \cdot X_{midr}$$

$$\forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall d \in \{1, 2, 3\}, \forall t \in \{3, \dots, 50\}, \forall s \in \{2, \dots, Per_i - 1\}$$

$$X_{midt} = 0 \quad \forall t > 50, \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall d \in \{1, 2, 3\}$$

Con esta restricción, se considera que el llamado a mantención por litros acumulados, sólo puede ocurrir entre los 3 y $Per_i - 1$ años luego de una mantención, dado que al año Per_i va a haber mantención de forma definitiva.

Dejamos estipulado que la cantidad de atrapanieblas pasados los 50 años será 0, para evitar la interferencia en la determinación de Z_{midt} cercano a este período.

6. La activación del mantenimiento en base a la condición anterior, es la siguiente:

$$Z_{midt} \leq Q_{midt} \quad \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall d \in \{1, 2, 3\}, \forall t \in \{1, \dots, 50\}$$

7. Otra condición para el mantenimiento es que pueden pasar hasta un límite de Per_i años para la siguiente mantención, por región:

$$\sum_{j=3}^{Per_i} Q_{mid(t-Per_i+j)} \geq 1 \quad \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall d \in \{1, 2, 3\}, \forall t \in \{1, \dots, 50\}$$

$$Q_{midt} = 0 \quad \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall d \in \{1, 2, 3\}, \forall t < 0$$

Se establece que Q_{midt} es igual a 0 para los años previos al inicio del proyecto, de forma tal que no presente conflictos.

8. Se puede instalar un máximo de atrapanieblas, limitado por la superficie efectiva disponible en cada región:

$$\sum_m \sum_d (A_d \cdot X_{midt}) \leq S_i \quad \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall t \in \{1, \dots, 50\}$$

9. Naturaleza de las variables:

$$X_{midt}, Y_{midt}, I_{midt} \geq 0 \quad \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall d \in \{1, 2, 3\}, \forall t \in \{1, \dots, 50\}$$

$$Q_{midt}, Z_{midt} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in \{1, \dots, 5\}, \forall i \in \{1, \dots, 7\}, \forall d \in \{1, 2, 3\}, \forall t \in \{1, \dots, 50\}$$

3. Definición de datos

3.1. Costos

Se asumieron iguales para las regiones y años. Se encuentran en `data/costo_instalacion.csv` y `data/costo_mantenion.csv`.

- Cm_{midt} : Costo de mantención de los atrapanieblas de material m y dimensión d , en la región i , en el período t . El costo de mantención de los atrapanieblas contempla el cambio de malla de los mismos. El precio por metro cuadrado de las mallas raschel se obtuvo en la página que comercializa las mismas (Mallas Raschel, 2023), y los otros materiales se calcularon según su proporción a los precios de mallas raschel (Mora, K., 2020). Tomando esos precios, se pondera según los metros cuadrados de cada dimensión de atrapanieblas a considerar (48 m^2 , 100 m^2 y 150 m^2). Posteriormente, se estandarizó el costo obtenido de CLP a UF (35.988 CLP a 22 de mayo)

- $C_{i_{midt}}$: Costo de instalación de los atrapanieblas de material m y dimensión d , en la región i , en el período t .

En este caso, se usaron los datos por costos de cada material m por los metros cuadrados correspondientes a su dimensión d , al igual que el costo de mantención desarrollado anteriormente. Además, se agregó un valor fijo arbitrario que contempla los gastos adicionales a la malla, que aumentan proporcional al tamaño del atrapanieblas. El valor obtenido se estandarizó de CLP a UF.

3.2. Superficie efectiva y área ocupada

- S_i : Superficie efectiva en la región i para instalar atrapanieblas.
Para obtener la superficie efectiva para instalar atrapanieblas en cada región, se hace el supuesto que el área efectiva corresponde a un 15 % del área de la región. Los datos de las superficies regionales se obtienen del Observatorio Logístico del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Se considera constante a través del tiempo. Se encuentra en `data/superficie.csv`.
- A_d : Área ocupada por un atrapanieblas de dimensión d .
Para hacer el cálculo del área ocupada por un atrapanieblas, se toma la proporción utilizada en uno de 150 m² implementado por el Ministerio de Agricultura y se aplica en las otras dos dimensiones a utilizar. (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2023). Estos valores se encuentran en `data/area.csv`.

3.3. Demanda de agua y humedad por región

- d_{it} : Demanda de agua consuntiva anual en la región i en el mes t en m^3 .
Se obtienen las demandas consuntivas anuales por región para el 2015, 2030 y 2040 (Dirección General de Aguas, 2017) y se hace una regresión lineal para obtener los datos para los años del 2025 a 2075. En cuanto a la cifra correspondiente a la Región del Ñuble, como esta región no existía en el momento en donde se extrajeron los datos, se hizo una regla de tres con la población y la demanda de la Región del Biobío, de la que antes formaba parte. Esta información se encuentra en `data/demanda.csv`.
- H_{it} : Humedad porcentual promedio de la niebla de la región i en el año t .
Los datos de la humedad promedio por región se obtuvieron de la Dirección Meteorológica de Chile, promediando las humedades mensuales desde el 2018 al 2022 de una ciudad representativa por región (Dirección Meteorológica de Chile, 2022). En el caso de la Región de O'Higgins, donde no hay centro de registro, se calculó el promedio entre las humedades de la Región Metropolitana y la Región del Maule. De esta manera, se asume que las humedades son constantes para los distintos años y para el cálculo se utiliza el promedio obtenido para cada región. Estos valores se encuentran en `data/humedad.csv`.

3.4. Frecuencia de mantención

- Per_i : Número de años máximo hasta la siguiente mantención según la región i . La mantención se realiza aproximadamente cada 7 años, pero debe ser más frecuente en zonas de mayor humedad y puede ser menos frecuente en zonas más secas, como el norte de Chile. Tomando eso en cuenta, en las regiones de Atacama y Coquimbo, se debe hacer mantención cada 8 años, en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, cada 7 años, y en las regiones del Maule y Ñuble cada 6 años (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2023). El archivo que contiene los valores es `data/plazo_mantenimiento.csv`.

3.5. Recolección de agua

- E_m : Porcentaje de eficiencia de recolección de agua por el material m .
La eficiencia se calcula dividiendo el volumen de agua capturada por el área de la malla del

material m por el tiempo empleado. La malla raschel tiene una mayor eficiencia respecto a las otras mallas consideradas (Vásquez - Ramírez et.al. , 2020). Sin embargo, no se pudo obtener con precisión la eficiencia de las mismas, por lo que se asignan valores proporcionales según lo averiguado.

- M_{mid} : Capacidad máxima de recolección de agua diaria de un atrapanieblas de material m , dimensión d y región i .

La capacidad máxima de recolección diaria de agua del atrapanieblas (L) se obtuvo mediante los datos de la misma por metro cuadrado de cada material (Mora,K., 2020) y los datos que no se encontraron se escogieron proporcionalmente a la eficiencia asociada. Luego, se multiplicaron esos valores por los metros cuadrados correspondientes a las dimensiones de la malla.

4. Implementación de Gurobi y resultados obtenidos

La implementación computacional del modelo se realizó en Gurobi, que permitió obtener un valor óptimo para el modelo planteado. Se obtiene una cantidad de atrapanieblas construidos acordes a la demanda de agua establecida y al espacio destinado para su construcción, minimizando los costos asociados. Luego, se demostró que la realización de este modelo es viable y puede ayudar a solventar la problemática de la crisis hídrica en sectores rurales de siete regiones del país.

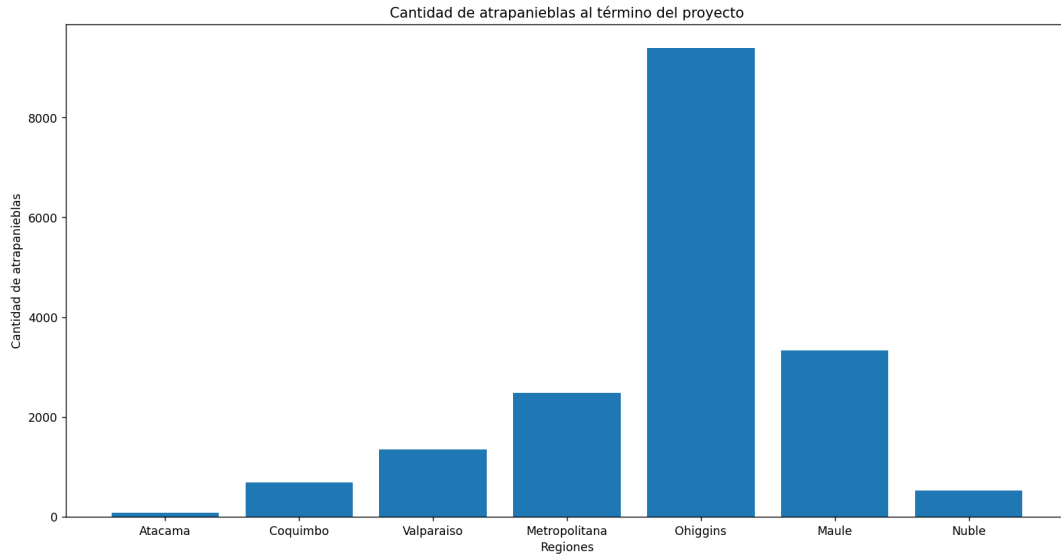


Figura 1: Gráfico sobre la cantidad de atrapanieblas al término del proyecto.

En términos prácticos, se obtuvo que el valor óptimo de este proyecto de minimización de costos es 32.117.951,5 UF, con 17838 unidades de atrapanieblas cubriendo la demanda establecida. Además, como se aprecia en la Figura 3, se observa que constantemente existen mantenimientos. Esto es natural, debido a que así como el proyecto permite seguir instalando atrapanieblas, también es necesario hacerle la mantención adecuada, y las restricciones del modelo implican esta realización.

Así también, se puede resaltar que en la región de O'Higgins, el material predominante es Raschel 35 % con 2966 unidades, y hay una nula presencia del material guata. Esto resulta plausible, teniendo en cuenta que es la región con menos demanda hídrica y el material es el más barato (menos eficiente también). Más aún, el material Raschel 35 % es utilizado en el 44,37 % de las regiones, y la dimensión con menor frecuencia es la de $48m^2$.

Además, analizando el gráfico de la cantidad de agua almacenada a lo largo del proyecto (figura 2), se puede notar que esta tiene un comportamiento similar a una función cuadrática. Esto adquiere sentido considerando que la cantidad de atrapanieblas deben ser las suficientes para suplir la demanda total, y el almacenamiento le permite, desde cierto período de tiempo, empezar a depender más del agua almacenada.

Por otro lado, este sistema se presenta como una opción menos contaminante por litro generado, frente a otras formas de obtención de agua como la desalinización de agua. Esta última, contempla una inversión inicial de 100 a 120 millones de dólares y produce agua a un costo aproximado de US\$0,5 por m^3 de agua desalada (La Tercera, 2021), es decir, 0.4 pesos por litro. Si se compara con los atrapanieblas en términos de costo, es efectivo que la solución de los atrapanieblas es ligeramente más cara, al ser un monto aproximado de 7 pesos por litro.

No obstante, por un lado, es fundamental tener en consideración que el costo promedio de este proyecto se hizo considerando costos fijos (asociados a instalación de atrapanieblas) y costos variables (asociados a mantención). Por otro lado, la implementación de una planta desalinizadora de agua trae consigo ciertas desventajas. Estas consumen grandes cantidades de energía eléctrica y tienen una vida útil limitada, por lo que, cuando dejan de ser de utilidad, generan importantes volúmenes de desechos contaminantes.

En el proceso de desalinización, la sal extraída del agua de mar se vuelve a depositar en el mar, lo que afecta fuertemente la flora y fauna marina. Además, se requiere implementar las infraestructuras necesarias para trasladar el agua desalada a su lugar de consumo. Con todo esto en mano, se puede concluir que, pese a que la desalinización de agua es una solución más barata de la crisis hídrica, esta perjudica al medioambiente en muchos otros aspectos, con lo que los atrapanieblas son una mejor solución a la problemática, porque generan muy pocos desechos, no presentan costos asociados al consumo de energía y no afectan a la biodiversidad, aprovechando agua que ya existe y que, de no ser utilizada, se perderá.

Otra posible solución al déficit de agua son las carreteras hídricas. Pese a que con esta opción se puede lograr cubrir la demanda de agua, esta tiene grandes efectos en el medioambiente, además de altos costos de su aplicación. Genera importantes movimientos de tierra y utiliza grandes infraestructuras, más aún, esta solución toma el agua subterránea de otra región, sacando agua de su ciclo natural y moviéndola de lugar, lo que afecta al ecosistema. Tomando en cuenta lo anterior, los atrapanieblas son la mejor manera de diversificar los métodos de obtención de agua, aliviando así la explotación de aguas subterráneas.

5. Análisis de Sensibilidad

Con el objeto de analizar el comportamiento de la solución y el valor obtenido frente a cambios en recursos clave y relajación de restricciones, se realizó una serie de iteraciones variando parámetros. Esto nos permite, además, analizar otros casos sobre los que podría aplicarse el modelo planteado, como son cambios en las demandas de agua (permitiendo, a su vez, enfocarse en otro tipo de demanda, como demanda de agua industrial), cambios en los costos de mantención (considerando, por ejemplo, efectos de inflación o cambio en la oferta de materiales) y cambios en los límites admisibles de tiempo sin una mantención.

5.1. d_{it} : demanda de agua potable rural por año en la región i y en el año t, en litros

Demanda de agua	Costo final (UF)	Cambio porcentual (costo)	Relación costo (CLP) por litro
80 %	25.145.664	-11.23 %	7.03325
90 %	28.599.462,5	-23.05 %	7.11047
Valor original	32.117.951,5	0	7.18673
110 %	35.721.872,5	+10.97 %	7.26649
120 %	39.538.181,0	+21.74 %	7.37257

Cuadro 1: Sensibilidad según variación de la demanda de agua potable rural.

Generando una variación en la cantidad de demanda de agua por región y por período, aplicándole a cada valor un determinado factor, podemos ver cómo genera un cambio en el costo final del proyecto. Se puede concluir, entonces, que frente a valores de variación de la demanda, mayores a la original considerada, se genera una variación positiva de la relación de costo por litro. Esto puede explicarse porque puede existir un margen donde la cantidad de atrapanieblas es cercana a la cantidad arrojada por otro valor de demanda. Entonces, existirá una cantidad de atrapanieblas capaz de satisfacer la demanda de "mejor manera", aprovechando, o dándole un uso más cercano a la recolección efectiva de los atrapanieblas. Es decir, se tienen ciertos valores de demanda, dentro de un rango para los cuales la demanda a suplir calza mejor con la recolección efectiva de cada atrapanieblas elegido a construir, de forma tal que no se es tan dependiente del almacenaje de agua entre períodos, ni de la construcción de más atrapanieblas para cubrir valores que queden muy alejados de la recolección efectiva.

5.2. C_{midt} : costo de mantención de los atrapanieblas de material m y dimensión d, en la región i en el año t, en UF

Costo de mantención	Costo final (UF)	Cambio porcentual (costo)	Relación costo (CLP) por litro
80 %	27.601.093,0	-14 %	6,17603
90 %	29.859.499,2	-7 %	6,68137
Original	32.117.951,5	-	7,18673
110 %	34.376.383,8	7 %	7,69207
120 %	36.630.225,6	+14 %	8,19639

Cuadro 2: Sensibilidad según variación de los costos de mantención.

Analizando la tabla, aplicando una metodología similar a la anterior, puede notarse una evolución de los costos finales, de forma que con un aumento de los costos de mantención, aumenta el costo final del proyecto. Esto es un resultado esperable, dado que el modelo se verá obligado a suplir la demanda establecida. De igual manera, llama la atención la variación resultante sobre la relación en el costo por litro, porque, si bien las variaciones de los cambios porcentuales son menores que cuando se varía la demanda, la relación de costo por litro presenta una mayor diferencia. En ese sentido, se puede decir que la mantención incide mucho más en el precio final del litro de agua que la demanda propiamente tal. Hay un margen menor para aumentar el precio de mantención sin que resienta el valor del agua. Asimismo, reducirlo mejora enormemente el costo del litro.

5.3. Per_i : número de años máximo hasta la siguiente mantención según la región i

Variación de años	Costo final (UF)	Cambio porcentual (costo)	Relación costo (CLP) por litro
-2	31.112.803,0	-3,1 %	6,96181
-1	31.618.506,0	-1.6 %	7,07497
Original	32.117.951,5	-	7,18673
+1	32.659.245,0	1.7 %	7,518238
+2	33.599.483,01	4.6 %	7,51823

Cuadro 3: Sensibilidad según variación del número de años hasta la próxima mantención.

Haciendo variar la cantidad de años máxima antes de la siguiente mantención, se puede notar que se genera una disminución en los costos finales. Esto se debe a que la mantención por estrés del sistema (dada por el parámetro γ_{mid}), presenta un valor elevado que en pocas ocasiones genera una mantención antes de este período de tiempo. Por lo tanto, se puede notar también que, reduciendo γ_{mid} , se puede llegar a un sistema de mayores costos.

5.4. Desactivación de la restricción 5, correspondiente a la condición de mantención por cantidad recolectada

Restricción	Costo final (UF)	Cambio porcentual (costo)	Relación costo por litro (CLP)
No Presente	10.973.710,5	-65.8330 %	2,45548
Presente	32.117.951,5	-	7,18673

Cuadro 4: Sensibilidad al eliminar la restricción 5.

Notar que el gap de optimalidad de la desactivación fue de 25.6213 %. Esto quiere decir que los datos no necesariamente son un buen estimador para comparar con el caso original. Aún así, se podría inferir que la mantención por cantidad recolectada provoca un gasto que el modelo busca evitar, y así lo hace cuando se desactiva. Se puede ver que el modelo privilegia justamente mantener todos los atrapanieblas casi al mismo tiempo y en el último año, como se observa en la figura 4.

5.5. Desactivación de la restricción 8, correspondiente a la condición de construcción bajo superficie disponible

Restricción	Costo final (UF)	Cambio porcentual (costo)	Relación costo por litro (CLP)
No Presente	32.103.896,2	-0.0437 %	7.18677
Presente	32.117.951,5	-	7,18673

Cuadro 5: Sensibilidad al eliminar la restricción 8.

A partir de este resultado, se puede concluir que los atrapanieblas no son un factor que repercuta necesariamente de forma negativa en el uso de suelo, ya que el resultado prácticamente no varía respecto de su original.

6. Conclusión

Este modelo busca acercarse a la realidad. Esto es porque se consideran variables relevantes y restricciones abordables. Por ejemplo, se estima la eficiencia y recolección de los atrapanieblas en

base a datos de las diversas iniciativas encargadas de estudiar la factibilidad de implementar estos dispositivos. Se considera la oportunidad de que exista un superávit de agua y así se almacene para el año siguiente. Además, el modelo resguarda la posibilidad de que los atrapanieblas pierdan eficiencia, producto de fatiga de material o por condiciones relativamente adversas. Esto se ve representado en la restricción de fatiga de material. Asimismo, se considera que estos sistemas tienen un ciclo de vida útil, y es necesario mantenerlos por tiempo. También, se considera el uso de suelo por parte de estos equipos. De este modo, el modelo busca aproximarse a una representación fidedigna de lo que podría ser una solución real y valiosa para muchas familias en Chile.

En efecto, los valores así lo demuestran, obteniendo un costo de 32.117.951,5 UF. Esto, a día de hoy, equivale a 1.431.908.672,1 \$ US. Con esto, se podrían instalar 17838.0 atrapanieblas durante el proyecto. El gasto es alrededor de 1.74 % del presupuesto nacional (DIPRES, 2022). Considerando que es un proyecto a 50 años, resulta bastante abordable desde el punto de vista de un diseñador de políticas públicas, como lo es la Dirección de Aguas. Esto puede ser un buen comienzo para alivianar la matriz hídrica, al ser sustento de un 3 % de los hogares del sector rural. Esta cifra no es menor, ya que es una solución que no implica un gasto energético ni emisiones de gases nocivos. No hay externalidades negativas asociadas. Luego, este modelo es funcional, y podría eventualmente ayudar en la toma de decisiones, pero es necesario poseer los datos correctos para esto. Lo anterior proviene del hecho de que para la realización del informe, el modelo fue provisto de datos obtenidos mediante proyecciones y supuestos.

Estos, bajo un control con una mayor base científica o desarrollando algún otro tipo de modelo predictivo que pueda considerar la variación de los parámetros en el futuro como es realizado con, por ejemplo, modelos de calentamiento global, se podría llevar a que arroje resultados más concretos y reales. Además, hay otros elementos que se podrían considerar dentro de la formulación, como es un almacenamiento finito y fijo, y costos por mantención e instalación de los sistemas de tuberías por donde se transportaría el agua recolectada desde los estanques a las ciudades. También sería necesario considerar la posición geográfica en la que se encontrarían los atrapanieblas, porque, por ejemplo, tener un caso en el que los atrapanieblas sean muy distantes unos de otros en una región, implicaría construir un mayor número de tuberías y almacenes.

Siguiendo lo anterior, otra restricción que podría implementarse es una para regular el tiempo que pasa entre cada mantención de cada grupo de atrapanieblas. Ya teniendo un máximo de tiempo establecido, sería interesante poder establecer un mínimo de períodos que hayan de cursar antes de que se permita una nueva mantención. Lo anterior cobra sentido considerando que, para demandas más elevadas y menor número de atrapanieblas, el sistema llamará a realizar mantención por la restricción 5 una cantidad elevada de veces, dando lugar a un no completo aprovechamiento de las capacidades de los materiales. Por otro lado, el modelo presenta una cierta capacidad para aceptar cambios frente a parámetros de relevancia. Esto resulta importante considerando que, por ejemplo, en casos de que se aplique este modelo en la vida real, y se busque recalcular el resultado aplicando cambios en los parámetros, se podría obtener una solución que probablemente siga siendo factible.

Por último, llegamos a la conclusión de que este proyecto es inaplicable a una mayor escala como para, por ejemplo, cubrir la demanda de agua potable urbana. Esto se debe a que los costos serían excesivos por la inmensa cantidad de atrapanieblas requerida, junto con el hecho de que el espacio utilizado por estos atrapanieblas podría ser eventualmente disruptivo del medioambiente. De igual manera, debe mantenerse la atención pública por sobre estos sistemas, dado que frente a la aparición o consideración de más diseños que resulten ser más efectivos, junto con la generación de materiales con mayores capacidades y un mejor manejo de información, podrían convertirse en una opción más plausible a futuro. Tal vez cubrir la demanda de ciudades enteras resulte quedar fuera del alcance de estos sistemas de atrapanieblas, pero podría sugerirse su aplicación para otros tipos de funciones. Ejemplo de esto podría ser el llevar agua a elevadas alturas, lo que podría dar lugar también a ideas de generación de energía mediante el movimiento del agua, similar a las hidroeléctricas pero a menor escala.

7. Bibliografía

- Atrapanieblas. Consultado el 13 de mayo de 2023
- Cereceda, P., Schemenauer, R.S., Valencia, R. (1992). Posibilidades de abastecimiento de agua de niebla en la Región de Antofagasta, Chile.
- Chile, N. U. (2021). Escasez hídrica en Chile: Desafíos Pendientes. Naciones Unidas Chile. Consultado el 5 de abril de 2023
- Dirección Meteorológica de Chile. Consultado el 21 de mayo de 2023
- Dirección General de Aguas (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. Ministerio de Obras Públicas. Consultado el 5 de abril de 2023
- Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. 2017. Dirección General de Aguas. Consultado el 16 de mayo de 2023
- Figueroa, R. (2020). Por qué la carretera hídrica no es un Proyecto Sustentable. CIPER Chile. Consultado el 5 de abril de 2023
- Informe ejecución mensual periodo 2023. Dirección de Presupuestos de Chile. Consultado el 16 de mayo de 2023
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Consultado el 17 de mayo de 2023
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). Síntesis de resultados - Censo 2017. Censo 2017. Consultado el 5 de abril de 2023
- La Tercera, 2021. La desalación toma fuerza en el norte, aunque aún es costosa para la RM. Consultado el 21 de junio de 2023
- Mallas Raschel. Consultado el 17 de mayo de 2023
- Mora, K.(2020). Análisis de viabilidad para la implementación de mallas atrapanieblas en la vereda San Antonio bajo el Municipio de Arbeláez - Cundinamarca
- Observatorio Logístico. Consultado el 17 de mayo de 2023
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2020). Informe de Gestión del sector sanitario. Consultado del 13 de mayo de 2023
- Teletrece 2022. Cuatro alarmantes datos sobre la escasez del agua potable en zonas rurales chilenas. Consultado el 23 de junio de 2023
- Vásquez-Ramírez, L., Cieza-León, L., & Cieza-León, D. (2020). Eficiencia de captación de agua con tres tipos de malla atrapanieblas en zonas rurales altoandinas de la sierra norte del Perú.
- Vivanco, E. (2020). Energías renovables y no renovables. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Consultado el 5 de abril de 2023

8. Anexo

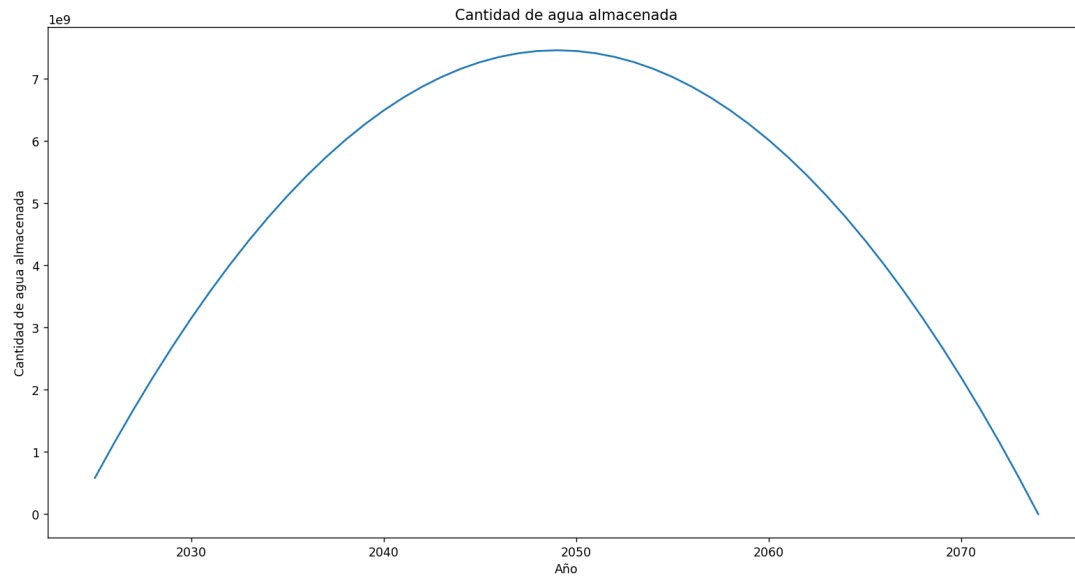


Figura 2: Gráfico sobre la cantidad de agua almacenada a lo largo del proyecto.

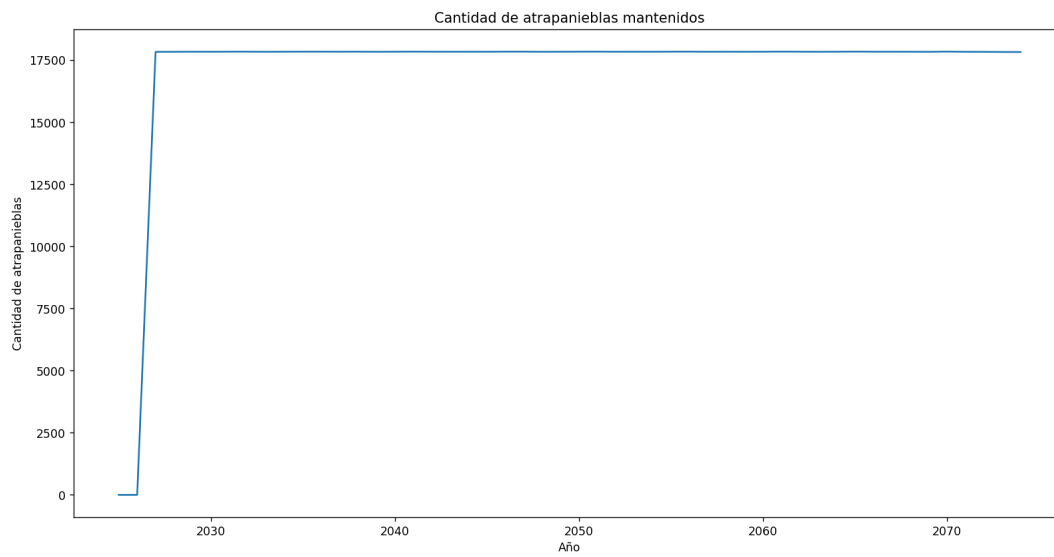


Figura 3: Gráfico sobre la cantidad de atrapanieblas mantenido a lo largo del proyecto.

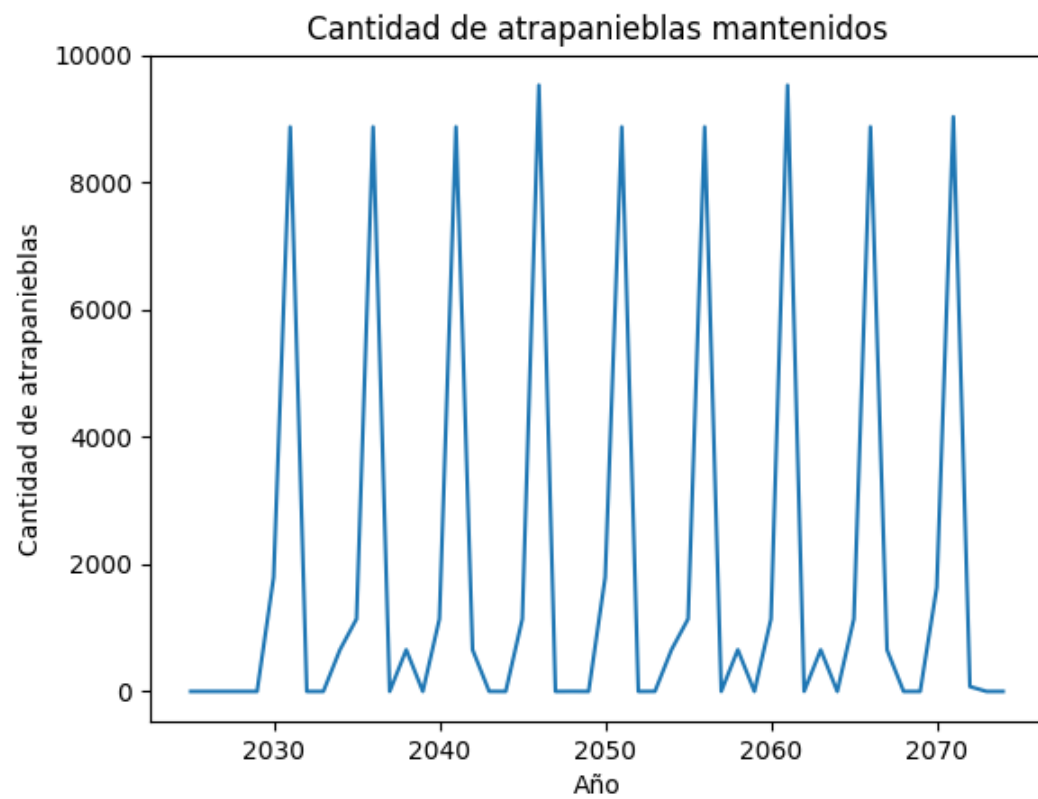


Figura 4: Gráfico sobre la cantidad de atrapanieblas mantenidos a lo largo del proyecto al eliminar la restricción 5.