



UNIVERSIDAD
Finis Terrae

UNIVERSIDAD FINIS TERRAE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

**Diseño de Un Sistema de Vigilancia Integrado Para La Ayuda a La
Protección del Parque Nacional Queulat con el Apoyo de Drones**

Fernanda Andrea Martínez Bravo

**Trabajo de Titulación Presentado a la Facultad de Ingeniería Civil
de la Universidad Finis Terrae, Para Optar al Título de Ingeniera
Civil Industrial**

Profesor Guía: Alfredo Candia Véjar

Santiago, Chile

2025



Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi familia quienes me demostraron su apoyo en todo momento, incluso cuando no veía salida siempre alguien me motiva a seguir.

A mi profesor guía Alfredo Candia, quien siempre me brindo consejos valiosos para desarrollar este proyecto con éxito. Su experiencia y dedicación hacia los estudiantes hacen que sea una persona muy grata con quien trabajar. Me ayudo a encontrar las mejores soluciones y como queríamos que fuera el enfoque de este proyecto.

A mis amigos que hice en el transcurso de mi vida universitaria, con los cuales pasamos noches sin dormir haciendo trabajos, que sin duda eran momentos de estrés, pero como nos acompañábamos hacían que el momento en vez de ser frustrante pasara a ser anécdotas de las que hoy nos reímos. Sin su apoyo y contención no habría podido superar esta etapa.

Agradezco a mi hermana Fran por su compañía en esas largas noches de trabajo o palabras de que **“si se puede”**.

Agradezco a mi papá, que a pesar de tener nuestras diferencias y de que no lo vea mucho, me da palabras de aliento y motivación de que **“si se puede”**.

Agradezco a mi mamá que siempre, me comprende, me ayuda y me da ánimo y motivación para seguir, sin importar lo duro que sea levantarse.

Finalmente, agradezco a todas las personas que fueron parte de este camino. Muchas Gracias.



Índice

Resumen	10
Abstract	11
1 Introducción.....	14
1.1 Descripción de la Situación Actual	14
1.2 Antecedentes	15
1.3 Planteamiento del Problema	17
1.4 Solución Propuesta.....	20
1.5 Objetivos	21
1.5.1 Objetivo General	21
1.5.2 Objetivos Específicos	21
1.6 Metodología a Emplear	22
1.7 Alcances y Limitaciones.....	25
1.7.1 Alcances	25
1.7.2 Limitaciones	26
2 Marco Teórico.....	28
2.1 Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados (RPAS)	28
2.2 Dron Atado	28
2.3 Clasificación de los Drones	30
2.3.1 Clasificación por Nombre de los Drones	30
2.3.2 Clasificación de Drones Según Tipo de Motor	30
2.3.3 Clasificación de Drones Según Cantidad de Hélices	31
2.3.4 Clasificación de Drones Según la Normativa Vigente en Chile	33
2.4 Aplicaciones de Drones.....	34
2.5 Herramientas Computacionales	35
2.5.1 Excel	35
2.5.2 IMB ILOG CPLEX.....	36
2.5.3 My Maps.....	37
2.6 Conceptos matemáticos.....	37
2.6.1 Programación Lineal	37
2.6.3 Optimización Combinada	38
2.7 Modelo de Localización.....	39
2.8 Modelo de Cubrimiento Conjunto	40
3 Investigación	42



3.1 Normativa de Operaciones de Drones en Chile	42
3.2 Características del Parque nacional Queulat	43
3.2.1 Mapa de Cada Cuadrante Parque Nacional Queulat.....	45
3.2.2 Mapas de Cada Cuadrante con sus Posibles puntos de riesgo	48
3.2.3 Calculo de distancia, entre las potenciales ubicaciones de las casetas y drones con los puntos de riesgo	50
3.2.4 Mapas de los Cuadrantes con posibles ubicaciones de drones atados y centros de operaciones	51
4. Desarrollo.....	55
4.1 Modelo de Optimización de Localización + Set Covering.....	55
4.1.1 Definición de Parámetros	55
4.1.2 Definición de Variables Binarias	56
4.1.3 Función Objetivo	56
4.1.4 Restricciones del Modelo	57
4.2 Costo de instalación de los drones atados y centros de operaciones	58
4.3 Modelo de optimización en OPL CPLEX	61
4.3.1 Definición de los conjuntos y parámetros del modelo de optimización	61
4.3.2 Definición las variables de decisión del modelo de optimización	63
4.3.3 Definición de función objetivo del modelo.....	64
4.3.4 Definición de las restricciones del modelo	65
4.3.5 Definición de las salidas de resultados	66
4.3.6 Definición de la entrada de datos al código en OPL CPLEX desde Excel	67
4.4 Resultados Obtenidos	68
4.4.1 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 1:	68
4.4.2 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 2:	70
4.4.3 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 3:	72
4.4.4 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 4:	73
4.5 Análisis de Sensibilidad	75
4.5.1 Resultados Observados en el Análisis de Sensibilidad	75
4.5.2 Resultados Observados en el Análisis de Sensibilidad	78
5 Conclusión	80
6 Referencias Bibliográficas.....	82
7 Anexos.....	85
7.1 Anexo 1 “Matrices de Distancia y Matrices Binarias en Cada Cuadrante”	85
7.2 Anexo 2 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 1”	95
7.3 Anexo 3 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 2”	96
7.4 Anexo 4 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 3”	97
7.5 Anexo 5 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 4”	98



Índice Figuras

Figura 1: "Dron o Aeronave No Tripulada"	28
Figura 2: "Dron Atado"	29
Figura 3: "Dron atado a un vehículo militar"	29
Figura 4: "Motor Brushless"	31
Figura 5: "Motor Brush/ed"	31
Figura 6: "Dron de tres hélices"	32
Figura 7: "Dron de cuatro hélices"	32
Figura 8: "Dron de seis hélices"	32
Figura 9: "Dron de ocho hélices"	33
Figura 10: "Dron coaxiales con 4 hélices"	33
Figura 11: Mapa del Parque Nacional Queulat" [Fuente: Elaboración Propia]	45
Figura 12: Mapa Parque Nacional Queulat en cuadrantes	46
Figura 13: Mapa Cuadrante 1	47
Figura 14: Mapa Cuadrante 2	47
Figura 15: Mapa Cuadrante 3	47
Figura 16: Mapa Cuadrante 4	48
Figura 17: Puntos de riesgo cuadrante 1	49
Figura 18: Puntos de riesgo cuadrante 2	49
Figura 19: Puntos de riesgo cuadrante 3	50
Figura 20: Puntos de riesgo cuadrante 4	50
Figura 21: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 1	52
Figura 22: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 2	52
Figura 23: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 3	53
Figura 24: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 4	54
Figura 25: "Definición de conjuntos en OPL CPLEX"	62
Figura 26: "Definición de conjuntos en OPL CPLEX"	62
Figura 27: "Definición de parámetros en OPL CPLEX"	63
Figura 28: "Definición de parámetros en OPL CPLEX"	63
Figura 29: "Definición de parámetros en OPL CPLEX"	63



<i>Figura 30: “Variables de decisión en OPL CPLEX”</i>	64
<i>Figura 31: “Definición de la función objetivo en OPL CPLEX”</i>	65
<i>Figura 32: “Restricción cobertura de puntos de riesgo en OPL CPLEX”</i>	65
<i>Figura 33: “Restricción de instalación de drones atados en OPL CPLEX”</i>	65
<i>Figura 34: “Restricción de un punto cubierto en OPL CPLEX”</i>	66
<i>Figura 35: “Restricción capacidad máxima de una caseta en OPL CPLEX”</i>	66
<i>Figura 36: “Restricción capacidad máxima de un dron atado en OPL CPLEX”</i>	66
<i>Figura 37: “Salida de resultados en OPL CPLEX”</i>	67
<i>Figura 38: “Importar y exportar datos hacia y desde un archivo Excel en OPL CPLEX”</i>	68
<i>Figura 39: Mapa Cuadrante 1 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos</i>	70
<i>Figura 40: Mapa Cuadrante 2 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos</i>	71
<i>Figura 41: Mapa Cuadrante 3 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos</i>	73
<i>Figura 42: Mapa Cuadrante 4 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos</i>	74
<i>Figura 43: Mapa Cuadrante 3 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos</i>	77
<i>Figura 44: Mapa Cuadrante 3 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos</i>	78



Índice Tablas

<i>Tabla 1: Información de Senderos Parque Queulat. [Fuente: Elaboración Propia].....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 2: Estimación Costo de Instalación de la Caseta.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3: Estimación Costo de instalación del Dron Atado</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4: Costo de Instalación de Casetas y Drones Atados Por Cuadrantes</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 5: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 1.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 6: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 1</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 7: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 2.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 8: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 2</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 9: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 3.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 10: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 3</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 11: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 4.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 12: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 4</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 13: Escenarios Posibles Para el Análisis de Sensibilidad</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 14: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 1.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 15: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 1</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 16: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 1.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 17: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 1</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 18: Matriz Distancia (m) Cuadrante 1.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 19: Matriz Binaria Vigilancia Caseta Cuadrante 1.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 20: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 1</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 21: Matriz Distancia (m) Cuadrante 2.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 22: Matriz Binaria Vigilancia Caseta Cuadrante 2.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 23: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 2</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 24: Matriz Distancia (m) Cuadrante 3.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 25: Matriz Binaria Vigilancia Caseta Cuadrante 3.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 26: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 3</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 27: Matriz Distancia (m) Cuadrante 4.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 28: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 4</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 29: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 4</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 30: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante 1.....</i>	<i>95</i>



<i>Tabla 31: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 1</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 32: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 33: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 2</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 34: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante 3.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 35: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 3</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 36: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante 4.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 37: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 4</i>	<i>99</i>



Índice Ecuaciones

<i>Ecuación 1: Ejemplo función objetivo</i>	38
<i>Ecuación 2: Ejemplo variables de decisión</i>	38
<i>Ecuación 3: Ejemplo restricciones.....</i>	38
<i>Ecuación 4: “Función Objetivo Modelo Localización”</i>	40
<i>Ecuación 5: Restricción Cobertura de Demanda</i>	40
<i>Ecuación 6: Restricción Asignación a Instalaciones Existentes</i>	40
<i>Ecuación 7: Restricción Variables Binarias</i>	40
<i>Ecuación 8: “Función Objetivo Set Covering”</i>	41
<i>Ecuación 9: Restricción Cobertura de Elementos</i>	41
<i>Ecuación 10: Restricción Variables Binarias</i>	41
<i>Ecuación 11: Función objetivo minimizar costo de instalación</i>	57
<i>Ecuación 12: Función objetivo minimizar costo de instalación</i>	58
<i>Ecuación 13: Restricción 1</i>	58
<i>Ecuación 14: Restricción 2</i>	58
<i>Ecuación 15: Restricción 3</i>	58
<i>Ecuación 16: Restricción 4</i>	58
<i>Ecuación 17: Restricción 5</i>	58
<i>Ecuación 18: Restricción 6</i>	58
<i>Ecuación 19: Restricción 7</i>	58
<i>Ecuación 20: Restricciones Binarias</i>	58



Resumen

Este trabajo de título se desarrolló un modelo de optimización con el objetivo de complementar el sistema de vigilancia actual que posee el Parque Nacional Queulat, esto mediante la localización eficiente de drones atados a casetas de vigilancia. El modelo formulado es una combinación del problema de localización y el problema de cubrimiento de conjuntos, el cual fue implementado en IBM ILOG CPLEX con el objetivo de identificar la solución óptima que maximice la cobertura de los puntos de riesgo y minimice el costo de instalación.

La solución considera restricciones de operación, como la capacidad máxima de vigilancia del dron atado y caseta de vigilancia, y límites de distancia de cobertura por distancia (hasta 399 metros para las casetas y desde 400 y 2000 metros para los drones atados). La combinación de estos parámetros permitió obtener resultados factibles y coherentes con la realidad geográfica del parque. Se logró cubrir los 101 puntos de riesgo definidos, utilizando el mínimo de casetas y drones atados instalados a lo largo de todo el territorio que se quería cubrir.

El análisis de sensibilidad realizado demostró que la capacidad de vigilancia de los drones atados es un parámetro crucial para mantener un equilibrio en el modelo que se desarrolló. Al aumentar la capacidad de los drones atados reduce la cantidad de recursos que se instalaron, pero esto generó una sobrecarga de vigilancia, lo que es poco aplicable a la realidad del Parque Nacional Queulat. A su vez, se demostró que las restricciones de los límites de distancia de cobertura influyen directamente en la distribución de los recursos, lo que generó una viabilidad del modelo que se desarrolló matemáticamente.

Por otro lado, se pudo observar que al momento de la implementación esta se puede ver afectada por limitaciones asociadas a datos estimados y/o simulados como costos de instalación, capacidad operativa, mapa del parque, los cuales podrían variar con el tiempo, cambiando los resultados finales. Asimismo, no se considera la implementación del modelo en terreno, ya que, si bien en términos matemáticos



el resultado es el óptimo, este se puede ver afectado por factores como condiciones climáticas, accesibilidad geográfica del parque, mantenimiento a los drones atados y casetas de vigilancia, o restricciones ligadas a la regulación del uso de drones en cada país.

En conclusión, el modelo propuesto establece una herramienta flexible y replicable a para apoyar a la gestión y vigilancia de áreas silvestres que se quieran complementar para mejorar la vigilancia de estos. La implementación del modelo de optimización no solo puede ayudar a aumentar la seguridad de los visitantes, sino también contribuye directamente en la preservación de la flora y fauna. El uso de tecnologías como los drones, combinados con modelos de optimización ayudan a obtener una solución a la conservación del patrimonio natural de cada país en un contexto de cambio climático, ya que este cumple un rol fundamental en la vida cotidiana de cada persona.

Palabras Claves: Drones, Drones Atados, Vigilancia, Optimización, Parques Nacionales, Problema de Localización, Cubrimiento de Conjuntos.

Abstract

This thesis developed an optimization model aimed at complementing the current surveillance system of Queulat National Park, by efficiently locating tethered drones and surveillance cabins. The formulated model is a combination of the facility location problem and the set covering problem, and was implemented in IBM ILOG



CPLEX with the objective of identifying the optimal solution that maximizes the coverage of risk points while minimizing installation costs.

The solution incorporates operational constraints, such as the maximum surveillance capacity of both tethered drones and surveillance cabins, as well as coverage distance limits (up to 399 meters for cabins and from 400 to 2000 meters for tethered drones). The integration of these parameters allowed for feasible and geographically consistent results for the park. A total of 101 identified risk points were successfully covered, using the minimum number of installations distributed across the territory.

The sensitivity analysis revealed that the surveillance capacity of tethered drones is a crucial parameter for maintaining balance in the model. Increasing the drone capacity reduced the number of resources installed; however, it caused a surveillance overload, which is not practically applicable to the context of Queulat National Park. Additionally, the analysis showed that the distance coverage limits directly influence the distribution of resources, which reinforces the viability of the mathematical model in real-world conditions.

On the other hand, potential implementation may be affected by limitations associated with estimated or simulated data, such as installation costs, operational capacity, and the park's mapping, which may vary over time and influence the final results. Furthermore, the model was not tested in the field, and although the solution is mathematically optimal, its implementation could be impacted by weather conditions, geographic accessibility, equipment maintenance, or regulatory restrictions related to drone use in each country.

In conclusion, the proposed model constitutes a flexible and replicable tool to support the management and surveillance of protected natural areas. Its implementation could not only enhance visitor safety but also directly contribute to the preservation of flora and fauna. The use of technologies such as drones, combined with mathematical optimization models, offers a viable solution to the conservation of



natural heritage, especially in the context of climate change, where protecting ecosystems plays a fundamental role in people's quality of life.

Keywords: Drones, Tethered Drones, Surveillance, Optimization, National Parks, Location Problem, Set Covering Problem.



1 Introducción

1.1 Descripción de la Situación Actual

La seguridad dentro de los parques nacionales cumple un rol fundamental para la preservación de la flora y fauna, como también para la correcta realización de actividades recreativas realizadas por las personas. En Chile, la cantidad de incendios forestales se ha incrementado de manera considerable en comparación a años anteriores, a consecuencia de la sequía que atraviesa el país, pocas precipitaciones, altas temperaturas y no menos importante provocados por el hombre ya sea por accidente, descuido o malas intenciones.

El director de Comunicaciones del Centro de Cambio Global UC en una entrevista en TVN señaló que existe una regla llamada por los expertos 'regla del 30', la cual consiste en que se deben cumplir ciertas condiciones climáticas para que el fuego se propague, debe haber una temperatura mayor o igual a 30°C, vientos de más de 30 kilómetros por hora y una humedad relativa del aire menor a 30%.

También Eduardo Bustos señaló lo siguiente "En el caso de Chile más del 90% de los incendios son causados por el hombre de manera directa o indirecta: por descuidos, por basura o por fogatas mal apagadas, por señalar algunas" (Jiménez, T. (s/f). En Chile la mayoría de los incendios son por causa humana). Si bien lo que señala Bustos es que debe de haber condiciones climáticas para que el fuego se propague de manera rápida, también es por la influencia del hombre. Esto nos da a entender que si se cumple la 'regla del 30' y existe una persona que causó un incendio de manera directa o indirecta, se puede ocasionar un desastre natural independiente del lugar geográfico, afectando así a la flora y fauna de la zona en la que se origine el incendio como también se pone en riesgo vidas humanas.

Por otro lado, los accidentes donde se ven involucradas personas se deben a tropiezos o caídas, mala toma de decisiones, mala planificación, imprudencia, extravío, condiciones climáticas repentinas, entre otros. En Chile, durante el mes de



enero de 2022 se registraron más de cinco accidentes de personas que se encontraban realizando actividades de senderismo y montañismo y tuvieron que ser rescatados por organismos de socorro (CONAF, Carabineros, etc.), los cuales señalaron que en la mayoría de los casos los accidentes se produjeron por apartarse de los senderos establecidos (Carrillo, A. (2022, enero 26). Expertos entregan consejos para practicar senderismo y montañismo).

El Sistema Nacional de Áreas Silvestre Protegidas del Estado (SNASPE) fue creado y actualmente es administrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), en donde actualmente se compone por 42 parques nacionales, 46 reservas nacionales y 18 monumentos naturales, que en su totalidad cubren una superficie de alrededor de 19 millones de hectáreas, distribuidos en todo el territorio nacional (CONAF. (s/f)).

Los encargados de resguardar la seguridad de las personas, el cumplimiento de las normas de las 106 unidades protegidas, son los guardaparques los cuales cuentan con una dotación de 432 funcionarios a lo largo de todo el país, incluyendo las zonas insulares que posee Chile. El rol que cumplen los funcionarios es fundamental para la conservación y protección, dentro de las actividades que realizan son; control y vigilancia sobre los visitantes, educativas, mantenimiento de las inmediaciones, entre otras (¿Cómo se administra el SNASPE? (s/f). Sistema Nacional de Áreas Silvestres del Estado.).

1.2 Antecedentes

Desde el año 2017, CONAF ha avanzado en la integración de nuevas tecnologías con el fin de mejorar los sistemas de monitoreo para la conservación de áreas silvestres protegidas del Estado. Esta organización incorporó el sistema multiespectral en los drones, el cual puede detectar cambios que pueden afectar a la flora y fauna, permite obtener imágenes infrarrojas de alta resolución e indetectables para el ojo humano, que entregan información en tiempo real acerca



de condiciones de vegetación entre otras. Rodrigo Munita, director ejecutivo de CONAF señaló lo siguiente “... la integración de tecnología en la que destaca el uso de cámaras trampa y de drones en áreas silvestres protegidas, nos permite reforzar la gran labor del guardaparques en acciones de conservación, ya que con estas herramientas se puede cubrir más espacio en cada acción de monitoreo y también detectar en forma más temprana cambios en los ecosistemas que se resguardan” (CONAF. (s/f). Conaf.cl).

De acuerdo con los beneficios que se obtienen con la incorporación de nuevas tecnologías como lo son los drones, se podrían utilizar como medida de prevención para la conservación de parques nacionales como también así evitar accidentes o extravíos de personas.

Existe información de la utilización que se le está dando a los drones, y principalmente es fiscalizar infracciones a la legislación forestal, conservación y protección de los recursos naturales, y apoyo al combate de incendios forestales (Martínez, R. (2019, febrero 27). “Fiscalización con drones en CONAF”).

En el año 2015, el Ministerio de Medio Ambiente de Brasil y WWF (World Wildlife Fund), tomaron medidas para salvar el Amazonas de la deforestación ilegal, para lo que están utilizando drones, los cuales captan coordenadas, y si es posible se hace un abordaje directo a las personas que están realizando deforestación ilegal. El uso de drones ha mejorado las planificaciones logísticas de operaciones. Las personas que están encargadas de fiscalizar son los mismos indígenas que habitan en el Amazonas, pudiendo así cubrir una mayor cantidad de territorio en caso de querer localizar incendios o talas ilegales (Franco, M. E. (2022, octubre 20). Drones para salvar la Amazonía: “La tecnología empodera a las comunidades indígenas para defender sus tierras”).



1.3 Planteamiento del Problema

La preservación de las áreas silvestres protegidas va de la mano con la vigilancia de estas mismas, ya que ayuda a fiscalizar y corroborar que todas las normas dispuestas por CONAF sean cumplidas, así como también que no se realicen acciones que están prohibidas.

La federación chilena de andinismo elaboró un catastro de maniobras de rescate y salvataje ocasionados durante el año 2016 en la Región Metropolitana. El catastro informó que alrededor del 67% de los senderistas se encuentran entre los 19 a 28 años, fallecen debido a extravíos y/o malas condiciones climáticas. A su vez la FEACH en conjunto con la Universidad Tecnológica Metropolitana realizaron un catastro con información proporcionada por el GOPE de Carabineros, informando que se efectuaron 57 operativos de rescate, de todas las personas involucradas un 92% se encontraban en las zonas bajas de las montañas, mientras que cuando se encontraban a las personas fallecidas un 62% se encontraba en las mismas zonas bajas de la montaña. Eduardo Aguirre señaló la siguiente reflexión "... Paradojalmente, en las zonas con mayor acceso no existe una gestión del riesgo asociada al entorno y eso es un tema que hay que entender a la brevedad" (El Mercurio S. A., P. (2017, mayo 25). "El 67% de los senderistas de montaña de hasta 28 años muere por extravío y malas condiciones climáticas".)

La reflexión de Aguirre tiene sentido ya que en la montaña baja es donde menos deberían ocurrir accidentes ya que es más accesible que en la montaña alta, por lo que es importante considerar la vigilancia dentro del parques nacionales o montañas en donde se pueden realizar actividades de senderismo con el fin de prevenir accidentes ya sean fatales o no fatales.

Por otro lado, la poca concientización y despreocupación con el medio ambiente, no ayuda al combate de incendios forestales ya que el ser humano es el causante del 90%-99% de los incendios. Es importante que no solo se tenga la información en la



página web de CONAF, sino que es necesario realizar campañas de concientización del daño que produce en el ecosistema y como eso puede afectar la calidad de vida de todas las personas. A su vez, es necesario tener en consideración las visitas a las áreas silvestres protegidas donde solamente se debe caminar por senderos señalizados y autorizados, no deben ingresar mascotas ya que pueden alterar la conservación de la fauna y flora local, no dejar basura, entre otras normas y prohibiciones. Si bien las normas y recomendación están establecidas por CONAF, siguen ocurriendo accidentes y se rompen las normas por la desinformación, malas decisiones o solo simplemente malas intenciones.

Los Parques Nacionales, cuentan con casetas de guardaparques, entrada al parque y distintas locaciones en donde si hay personal de CONAF, pero al ser un territorio extenso para cubrir, en muchas ocasiones no es que no se vigile, es que una persona a pie no puede cubrir todo el sector, por lo que se les pide a los visitantes que se informen y que actúen con responsabilidad.

Si bien, no hay suficiente información disponible para determinar qué Parque Nacional posee la mayor cantidad de accidentes e intervenciones del hombre que terminan en desastres naturales, se escogió el Parque Nacional Queulat por las siguientes razones:

- Cantidad de Senderos
- Senderos de todas las dificultades.
- Ubicado en una región en donde las condiciones climáticas pueden cambiar repentinamente.
- La Región de Aysén posee un reglamento especial, debido a las condiciones de los senderos y a condiciones climáticas.

A inicios de noviembre de 2022, se inició una movilización por parte del Cuerpo de Guardaparques del Parque Nacional Torres del Paine la cual consta de un paro indefinido, a causa de no obtener respuestas en favor de sus demandas por parte



de CONAF. Si bien las movilizaciones se iniciaron por parte los funcionarios de este parque nacional ubicado en la región de Aysén, Cuerpos de guardaparques de todas las regiones del país se adhirieron al paro indefinido. Las causas de las demandas se focalizan en el poco presupuesto destinado a la protección de áreas silvestres protegidas, siendo dos factores los más afectados, en primer lugar, los malos sueldos a los trabajadores y en segundo lugar infraestructura, bienes y servicios.

La Federación Nacional de Sindicatos de CONAF (FENASIC) sostuvo que el presupuesto destinado a la protección de áreas silvestres protegidas que entrega el Estado es de 19 mil millones de dólares, del cual el 80% se destina a remuneraciones de los funcionarios, y el otro restante a gastos relacionados con bienes, servicios, combustible, entre otros. El presupuesto que tienen disponible es lo mínimo para que los parques nacionales.

El director de la FENASIC señaló que “...se necesitan muchos más recursos para contratar más guardaparques permanentes y transitorios con sueldos decentes, además, aumentar recursos para el ítem de bienes y servicios, y para invertir en infraestructura” (El Mercurio S. A., P. (2022, noviembre 23). Baja inversión en Parques Nacionales: “Expertos entran al debate abierto por paro de guardaparques y urgen por más recursos”. Emol).

La vigilancia de las unidades protegidas por SNASPE, no se podría llevar a cabo sin la ayuda de los guardaparques. Es por esto por lo que es de suma importancia el aumento de presupuesto para que las condiciones laborales de los funcionarios sean adecuadas a su función, como también la incorporación de nuevas tecnologías. Marcia Vásquez, académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca señaló que “...la mantención de los parques es crucial desde muchos puntos de vista, en especial, desde el valor ambiental y social que ellos generan en nuestra sociedad” (El Mercurio S. A., P. 2022, noviembre 23). Baja inversión en Parques Nacionales: “Expertos entran al debate abierto por paro de guardaparques y urgen por más recursos”. Emol). La conservación y protección de



la flora y fauna trae efectos positivos para nuestra supervivencia, por lo que implementar medidas que ayuden a que este objetivo se cumpla es de vital importancia.

1.4 Solución Propuesta

En el presente trabajo se diseña un modelo de optimización para localizar drones atados con sus respectivos centros de operaciones(casetas). Estos centros albergaran a los guardaparques, quienes deben contar con la licencia de piloto de aeronaves no tripuladas otorgada por la Dirección de Aeronáutica Civil (DGAC), aparte contarán con los repuestos necesarios como baterías, controles, cables, etc. Esta propuesta busca complementar el sistema de vigilancia que actualmente posee el Parque Nacional Queulat, que contempla la protección y conservación de la flora y fauna, y al mismo tiempo la prevención de accidentes y desastres naturales que el visitante podría causar.

El modelo que se propone integra una tecnología no muy conocida como lo son los drones atados para garantizar la cobertura completa de los puntos críticos en el parque, como senderos habilitados, miradores, zonas de alto riesgo donde se podrían producir accidentes.

Se considera las ubicaciones de las actuales casetas que en su mayoría se encuentran al inicio de los senderos, puntos ciegos debido a la diversidad de flora que existe dentro del parque por su demografía, todo esto utilizando una combinación entre el problema de localización en conjunto con el problema de cubrimiento conjunto (Set Covering). Este modelo permitió identificar cuáles son los nodos óptimos para minimizar los costos y maximizar la cobertura de los puntos de riesgo.

Además, se evaluó factores como las condiciones climáticas de la región de Aysén, demografía del parque y por sobre todo que se cumplan la normativa DAN 151 de



la DGAC para garantizar la viabilidad técnica y lo más real posible a la realidad. La fundamentación del diseño se sistema de vigilancia con la integración de drones atados, es en base de antecedentes ya sea nacionales y/o internacionales, proyectos similares que hayan implementado este método de vigilancia con drones atados.

En relación con lo mencionado anteriormente, esta solución busca promover la importancia de la conservación del patrimonio natural y cultura de Chile, a su vez de la prevención de accidentes de personas que visiten el Parque Nacional Queulat, con la ayuda de una combinación de tecnología y un modelo de optimización combinado.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Diseñar un sistema integrado de vigilancia para la ayuda a la preservación de la flora y fauna, como también para el cuidado de las personas que visitan el Parque Nacional Queulat, mediante el uso de drones atados y casetas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Identificar los puntos peligrosos y las posibles ubicaciones de las casetas de vigilancia y drones atados
- Diseñar un modelo de optimización que permita la vigilancia de puntos de riesgo utilizando casetas y drones atados, con el objetivo de minimizar los costos de implementación.
- Analizar especificaciones necesarias que deben poseer los drones para cubrir las necesidades de vigilancia del Parque Nacional Queulat.



- Realizar una estimación de costos para los parámetros utilizados en el modelo diseñado.
- Validar el modelo matemático con datos asociados al Parque Nacional Queulat.
- Analizar resultados obtenidos.

1.6 Metodología a Emplear

La metodología que se utilizó para el correcto desarrollo del tema seleccionado en el presente trabajo de titulación será la metodología mixta en conjunto con la metodología PERT. Estas se complementan para desarrollar la solución propuesta con el fin de ser factible. A continuación, se explicará a el rol de cada una de estas:

- Metodología mixta: Esta metodología es la unión entre la metodología cualitativa y la cuantitativa. La primera de estas se utiliza para hipótesis que no son medibles, por lo que se centra en la búsqueda de información ya sea en bases de datos académicas, noticias, revistas académicas, entre otras. Por otro lado, se encuentra la segunda metodología, la que se centra en obtener datos cuantitativos y medibles, los cuales validan la hipótesis mediante modelos y principios científicos (Enago Academy. (2021, octubre 21).

La metodología mixta se utilizó con el fin de obtener información de antecedentes, proyectos similares estudiados anteriormente, modelos de optimización para la ubicación de nodos con respecto a las inmediaciones y necesidades del Parque Nacional Queulat, y la importancia de la



preservación de los Parques Nacionales ya sea a nivel nacional como internacional.

En el ámbito experimental, para la localización de los nodos en donde se ubicarán los drones atados y los centros para los drones tradicionales, se busca desarrollar un modelo de optimización el cual permite determinar los puntos críticos con relación a los senderos establecidos dentro del Parque Nacional Queulat, como también en lugares en donde no se tiene control de seguridad. Este modelo debe estar compuesto por parámetros, variables de decisión y restricciones.

- Metodología PERT: Esta herramienta es utilizada para definir el cronograma de la realización de tareas de un proyecto que se vaya a realizar desde el inicio hasta la finalización del proyecto (Asana. (s/f). El diagrama de PERT: qué es y cómo crearlo (incluye ejemplos)) (Enago Academy. (2021, octubre 21). ¿Cómo elegir la mejor metodología de investigación para su estudio?).

Esta metodología cuenta con cinco pasos para que se lleve a cabo de manera exitosa, los cuales se definirán a continuación:

- Paso 1: Identificar las tareas del proyecto
- Paso 2 Definir las dependencias entre las tareas ya identificadas
- Paso 3: Vincular las tareas del proyecto
- Paso 4: Establecer el cronograma del proyecto
- Paso 5: Gestionar el progreso de las tareas

Se utilizará esta metodología para definir el plan de trabajo, proponiendo las tareas a realizar durante toda la realización del proyecto, A continuación, se detalla cómo se abordó cada objetivo específico de este trabajo de título:

- **Objetivo 1: Identificar los puntos peligrosos y las posibles ubicaciones de las casetas de vigilancia**



- Se utilizó una extensión de Google My Maps y mapas del Parque Nacional Queulat. Donde se estipularon 101 puntos de riesgo a lo largo del parque que para efectos de obtener una cobertura real por la distancia que existe entre los senderos se agruparon en cuadrantes y 49 posibles ubicaciones de drones y casetas de vigilancia. Luego se construyeron matrices de distancia y matrices binarias de cobertura en Excel, las cuales indican la relación entre los puntos de riesgo y las posibles ubicaciones de las casetas y drones atados.

- **Objetivo 2: Diseñar un modelo de optimización que permita la vigilancia de puntos de riesgo utilizando casetas y drones atados, con el objetivo de minimizar los costos de implementación**
 - Se diseñó un modelo de optimización combinado, entre el problema de localización y el problema de cubrimiento de conjuntos. Este fue programado en IBM ILOG OPL CPLEX, utilizando como datos de entrada las matrices definidas en la fase anterior.

- **Objetivo 3: Analizar especificaciones necesarias que deben poseer los drones para cubrir las necesidades de vigilancia del Parque Nacional Queulat.**
 - Se realizó una investigación de las especificaciones que debe cumplir el dron atado para operar en Chile, regulada por la normativa DAN 151 de la DGAC, donde se analizaron modelos de drones, cámaras de vigilancia, etc. Se definieron los parámetros de alcance de vigilancia para las casetas de vigilancia (hasta 399 metros) y drones (de 400 a 2000 metros), y la cantidad de capacidad máxima de vigilancia que tiene cada dron atado y caseta.

- **Objetivo 4: Realizar una estimación de costos para los parámetros utilizados en el modelo diseñado.**
 - Se elaboró una hoja de cálculo en Excel, donde se estimó los costos de instalación de las casetas y drones atados, en conjunto con todos



los costos de operación y mantenimiento que tiene al instalar uno de estos recursos. Se realizó en pesos chilenos (CLP).

- **Objetivo 5: Validar el modelo matemático con datos asociados al Parque Nacional Queulat.**
 - Se ingresaron los datos obtenidos en las fases anteriores al programa de IBM ILOG OPL CPLEX. Se evaluó que las restricciones se cumplieran y que tan eficiente era el modelo, donde se obtuvo una solución matemáticamente óptima.
- **Objetivo 6: Analizar resultados obtenidos.**
 - Se analizaron los resultados de obtenidos en OPL CPLEX, donde se obtuvo la cantidad de casetas y drones atados que se instalaron y a que puntos cubre cada uno de ellos, el costo total de instalación en cada cuadrante. Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad, modificando la capacidad máxima de los drones atados, con el fin de observar como se comporta el modelo ante la variación en los parámetros de entrada, dando así distintos posibles casos operacionales.

1.7 Alcances y Limitaciones

1.7.1 Alcances

El desarrollo del modelo de optimización que combina el problema de set covering (cobrimiento conjunto) y de localización permite optimizar la vigilancia y preservación de la flora y fauna del Parque Nacional Queulat, en donde se concentran las zonas de riesgo y protección del ecosistema presente en dicho parque. El modelo no solo será diseñado para este parque en particular, sino que también se puede adaptar según las necesidades, condiciones geográficas de otros parques nacionales o áreas protegidas.



En esta propuesta se podría demostrar que la incorporación de nuevas tecnologías como sistemas automatizados y el uso de drones atados puede:

- Reducir el riesgo de accidentes tanto como de los visitantes, como los guardaparques de CONAF del Parque Nacional Queulat.
- Promover el sentido de conservación ambiental.
- Mejorar el área de vigilancia en áreas remotas o de difícil acceso.

Este trabajo de título no solo se enfoca en resolver un problema de vigilancia en el Parque Nacional Queulat, sino que también busca crear conciencia de la importancia del cuidado de estas zonas geográficas. A través esta propuesta de un modelo de optimización que combina el uso de casetas y drones atados estratégicamente ubicados, se busca visibilizar la necesidad de implementar soluciones con aporte tecnológico en la conservación del medioambiente.

Además, este trabajo servirá como ejemplo para estudiantes, instituciones gubernamentales, ONG, y organizaciones privadas dedicadas a la preservación de ecosistemas, demostrando que la integración de las nuevas tecnologías es viable y esencial para los desafíos que actualmente presenta la gestión de conservación de áreas protegidas.

1.7.2 Limitaciones

A pesar del objetivo planteado, pueden existir ciertas limitaciones que podría influir en el desarrollo y la obtención de resultados esperados. Dentro de estas se encuentran:

- Falta de acceso a datos precisos: La información sobre los puntos de riesgo o de mayor ocurrencia de accidentes es limitada o casi nula dentro del Parque Nacional Queulat lo que no permite obtener datos reales, sino que una estimación de donde estos puntos se podrían encontrar.



- **Factores impredecibles:** Si bien el modelo optimiza la localización de las casetas y drones atados hay factores que no se pueden predecir como las condiciones climáticas que podrían afectar el funcionamiento y el alcance de vigilancia de los drones atados. Además, los puntos de riesgo del parque podrían cambiar con el tiempo lo que requeriría una modificación constante al modelo de optimización.
- **Restricción económica:** La implementación de este proyecto podría tener un costo muy elevado por lo que podría exceder el presupuesto disponible, teniendo así que reducir la cantidad de casetas y drones atados, afectando la efectividad del sistema de vigilancia.
- **Geografía del parque y logística:** Las condiciones geográficas y meteorológicas del parque podrían dificultar las operaciones logísticas tanto como la poca accesibilidad a las zonas de riesgo, falta de infraestructura, falta de personal operativo, licencia de piloto de drones, factores que podrían poner en riesgo la implementación de la propuesta del modelo de vigilancia.
- **Implementación:** Este trabajo no considera una fase de prueba real por lo que es solamente una simulación y podría requerir pruebas adicionales para una futura implementación.

2 Marco Teórico

2.1 Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados (RPAS)

Se denominan drones o RPAS por su sigla en inglés (Remotely Piloted Aircraft System) a las “aeronaves no tripuladas” (Real Academia Española, RAE, 2020) que son operadas de manera remota o a distancias, en otras palabras, estas aeronaves no cuentan con tripulación o piloto a bordo, pero que de todas maneras necesitan un piloto que las maneje.



Figura 1: "Dron o Aeronave No Tripulada"

2.2 Dron Atado

El dron atado es una aeronave no tripulada la cual se encuentra conectada mediante un cable con diferentes tipos de anclaje físicamente hablando, estos pueden ser a una persona, al suelo o a un objeto en particular (embarcaciones, vehículos, entre otros). La base en donde se encuentra atado el dron también puede incluir una fuente de alimentación para la batería del dron y así este pueda operar más tiempo que la aeronave no tripulada no atada. (Tethered drones and remotely piloted aircraft. (s/f.))

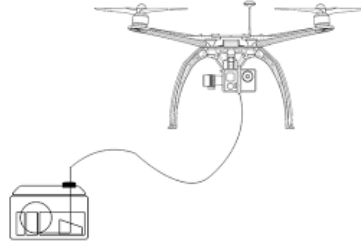


Figura 2: "Dron Atado"

El uso de esta nueva tecnología posee distintas aplicaciones, tanto en operaciones civiles como militares. Es importante recalcar que el uso de estos drones se rige por las mismas normativas que regulan el uso de aeronaves no tripuladas de acuerdo con cada país.

En el ámbito civil las aplicaciones que tienen los drones atados son por lo general para realizar operaciones de reconocimiento, vigilancia, monitoreo en áreas restringidas o cuando el tiempo de vuelo supera a la capacidad de un dron "tradicional" (no atado). Estos pueden alcanzar una altura que va desde los 50 metros hasta 300 metros aproximadamente. Sistema de drones atados CETC. (s/f.). China Military Drone Alliance). En el ámbito militar se utiliza para reconocimiento de campos, vigilancia y para ataques específicos en donde el área sea de difícil acceso para los vehículos, embarcaciones y/o aeronaves que posean las fuerzas armadas de cada país.



Figura 3: "Dron atado a un vehículo militar"



2.3 Clasificación de los Drones

Hoy en día, el mercado de drones ofrece una gran variedad de aparatos, los que se pueden clasificar dependiendo del vuelo que se realicen. En este sentido, por ejemplo, tenemos los drones para uso recreativo y para uso comercial.

2.3.1 Clasificación por Nombre de los Drones

Existen diferentes terminologías para referirse a los drones, cabe destacar las tres formas de referirse a estas aeronaves hacen referencia al mismo concepto de no tener un piloto al interior y son controladas de manera remota. Las terminologías se definirán brevemente a continuación (Tipos de drones. (2021, enero 4):

- Drone y Dron: La palabra dron proviene del inglés británico, la cual significa en español “zángano” (abeja macho). El origen de esta palabra proviene del uso militar que se le dio para los conflictos bélicos ocurridos en el siglo XX. Es el término que más se utiliza para referirse a las aeronaves no tripuladas.
- UAV y UAS: “Unmanned Aerial Vehicle” y “Unmanned Aerial System” respectivamente. El término “unmanned” se traduce como “no tripulado”, por lo que al referirse a uno de estos términos se entiende que cualquier vehículo es pilotado de forma remota, en otras palabras, no tiene piloto en su interior.
- RPA y RPAS: “Remotely Piloted Aircraft” y “Remotely Piloted Aircraft System” respectivamente. Al llevar estos dos términos al español hace referencia a que la aeronave no cuenta con un piloto a bordo.

2.3.2 Clasificación de Drones Según Tipo de Motor

Existen dos tipos de motores “brushless” y “brush/ed”, los cuales serán definidos brevemente a continuación:

- Dron con motor “brushless”: Si se traduce el nombre del español significa sin escobillas. La falta de escobillas produce que el mantenimiento del dron sea mínimo y su funcionamiento es muy eficiente y efectivo. Puede alcanzar una velocidad de 150-200 km/h. Normalmente los profesionales utilizan drones que tengan incorporado este motor.



Figura 4: “Motor Brushless”

- Dron con motor “brush/ed”: Si se traduce el nombre del español significa con escobillas. Estos motores son más económicos, pero necesitan más mantenimiento que el otro motor. Puede alcanzar una velocidad de 50-70 km/h. Se recomienda el uso de estos drones a principiantes ya que le da más estabilidad al dron.



Figura 5: “Motor Brush/ed”

2.3.3 Clasificación de Drones Según Cantidad de Hélices

Existen cinco tipos de drones con distintas cantidades de hélices, en donde cada brazo cuenta con su propio motor. A continuación, se definirán brevemente:

- Tres Hélices: Posee tres brazos, pero no tiene un motor en cada uno de estos. Está compuesto por 3 motores, 3 variadores, 1 servomotor y 4 hélices. Suele tener forma de T, esto ayuda a que se consiga la estabilidad del dron.



Figura 6: "Dron de tres hélices"

- Cuatro Hélices: Posee cuatro brazos con un motor en cada uno de estos. Está distribuido en forma de cruz por lo que ayuda a la estabilización de los drones. Es el más económico de los cinco tipos según el número de hélices.



Figura 7: "Dron de cuatro hélices"

- Seis hélices: Posee seis brazos con un motor en cada uno de estos. Suele ser utilizado para estabilizar las cámaras cuando se está realizando una toma aérea.



Figura 8: "Dron de seis hélices"

- Ocho Hélices: Posee ocho brazos con un motor en cada uno de estos. Por lo general no vienen montadas las piezas del dron por lo que se tiene que armar y configurar. Usualmente lo ocupan expertos en drones.



Figura 9: "Dron de ocho hélices"

- Coaxiales: Este dron posee doble motor en cada brazo, esto le da más potencia al dron para poder levantar peso. puede utilizarse en drones con tres, cuatro y seis hélices. Sus usos son en mayoría para filmaciones con cámaras grandes, paquetes para delivery y cualquier otro tipo de trabajo que involucre levantar peso



Figura 10: "Dron coaxiales con 4 hélices"

2.3.4 Clasificación de Drones Según la Normativa Vigente en Chile

En Chile, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), establece en la normativa asociada a este tipo de operaciones, una diferencia para autorizar y/o definir los requisitos para llevar a cabo la operación de drones. También, otra clasificación se puede establecer con el peso del dron. Mayor o menor a 750 grs.

En efecto, por ejemplo, si un dron pesa menos de 750 gramos y es utilizado para fines recreacionales o uso personal, no requiere autorización de la DGAC, según DAN 91, numeral 91,102 letra j (Normativa DAN 91, 2012. DGAC), esto siempre y cuando:

- El RPAS o dron, está fabricado con polietileno expandido (Plumavit).
- Peso hasta 750 gramos.



- Opere sólo en lugares privados con la autorización del propietario.
- Que no opere a más de 50 metros de altura.
- El operador debe responder ante cualquier daño a terceros que cause.

Si ese no es el caso deberá cumplir con la normativa DAN 151

2.4 Aplicaciones de Drones

Existen variados usos con drones, que van desde el uso recreacional o el uso profesional, a través de una empresa aérea que desarrolle este tipo de trabajos.

En la década de los 30' se utiliza por primera vez un dron, el cual era utilizado principalmente para fines militares y de inteligencia. Con el pasar de los años la tecnología evolucionó, integrando el desarrollo de esta tecnología a distintas industrias de la vida civil, gracias a la versatilidad, autonomía y eficiencia que proporciona el dron. Su uso se expandió rápidamente en áreas como el transporte productos en la última milla, agricultura, rápida respuesta ante desastres naturales, la recolección de datos, fumigación, fotografía, videos aéreos, apoyo fotográfico en emergencias, inspecciones a construcciones, entre otras.

Por ejemplo, el uso de drones se ha utilizado para entregar suministros médicos a zonas rurales, como es el caso de Ruanda, donde la empresa Zipline implemento un sistema el cual consiste en entregar suministros médicos mediante drones. Esto inicio debido a la dificultad de acceso de vehículos terrestres, sobre todo en épocas de lluvia, donde los caminos rurales quedan inhabilitados de esta. El sistema implementado permite la entrega de suministro de vacunas, medicamentos y otros insumos médicos en menos de 30 minutos, lo que reduce considerablemente el tiempo de transporte de paquetes vía terrestre que podía ser de horas hasta días. Según Otto, cada dron de la empresa Zipline puede realizar hasta 150 vuelos por días, en el cual cubre alrededor de 20 hospitales y centros de salud desde una base de operaciones. Con este sistema de entrega de suministros médicos se ha demostrado la reducción de muertes por hemorragias postparto y otras emergencias médicas. (Otto, A., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018)).



En términos logísticos, los drones han tomado un rol fundamental al problema de la última milla, que viene siendo el proceso más costoso y complejo para completar la entrega de paquetes. Según Boysen (Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021)), los costos que se asocian al problema de la última milla pueden llegar a representar el 50% del costo total de la entrega de un producto, sobre todo en el contexto urbano con alta densidad poblacional y congestión vehicular. Es por ello, que los drones ofrecen una alternativa con entregas más rápidas y eficientes, disminuyendo las distancias y tiempos de entrega. Es más, el uso de drones en el problema de la última milla puede reducir considerablemente las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2), en comparación con el uso de transportes tradicionales utilizado para las entregas de paquetes. Boysen, Fedtke y Schwerdfeger, plantean distintas combinaciones en operaciones logísticas ya sea modelos híbridos (camión-dron) y un modelo en donde solo se contempla el uso de drones. Si bien aún existen limitantes, como regulaciones, capacidad de carga, autonomía, los drones se proyectan como una solución para la cadena de suministro eficiente y más económica, sobre todo si se habla de áreas de difícil acceso.

En nuestro país, la aplicación del uso de drones dependerá del tipo de operación que se vaya a realizar, en conjunto con la correspondiente autorización de la DGAC.

2.5 Herramientas Computacionales

2.5.1 Excel

Excel es una herramienta computacional perteneciente a la compañía Microsoft, la cual permite obtener y ordenar información a partir de una gran cantidad de datos. Los datos están contenidos en celdas, las cuales pueden contener números, fórmulas, textos, valores monetarios, etc. Estos se agrupan mediante celdas y columnas, pudiendo así obtener información clara de lo que se necesite, organizar datos, crear gráficos, generar tablas dinámicas y se puede programar mediante



Visual Basic for Applications (VBA). (2025, Microsoft. Microsoft Excel: A powerful spreadsheet tool)

Posee funciones matemáticas, financieras, lógicas y estadísticas. Tiene la capacidad de análisis de datos mediante tablas dinámicas.

Es usado principalmente por empresas de cualquier nivel, académicos, estudiantes y personas que requieran gestionar datos.

2.5.2 IBM ILOG CPLEX

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio es un software de desarrollo integrado, diseñado con el fin de modelar y resolver problemas de optimización matemática que poseen alta complejidad (IBM. (2025). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Overview*.) Dentro de las principales características de este software se encuentran las siguientes:

- Se utiliza en distintos campos relacionados a la ingeniería como, logística, manufactura, finanzas, planificación, entre otros.
- Posee un lenguaje OPL que es de modelado declarativo el cual simplifica la formulación de los problemas de optimización al separar los datos de la lógica.
- Tiene la capacidad de manejar una gran cantidad de datos.
- Integra lenguajes de programación como Python, Java, C++ y MATLAB.
- Es compatible con Excel y SQL para la integración de datos.
- Soporta problema de optimización complejos como; Programación Lineal (LP), Programación Lineal Entera Mixta (MILP), Programación No Lineal (NLP), entre otros.



2.5.3 My Maps

My Maps es una extensión de Google que fue lanzada en el año 2007, con el fin de ayudar a las personas a crear sus propios mapas en donde se pueden personalizar mediante marcadores, líneas, formas, globos información, textos, globos, fotos y videos, todo esto sobre los mapas proporcionados por Google Maps (Google Crisis Response. (s/f). Respuesta A Emergencias de Google).

Es una herramienta versátil, que crea mapas al instante, no es necesario contar con información de GIS para empezar, también existe la posibilidad de importar los datos de tu mapa, como también se puede colaborar entre varios usuarios dentro de la misma plataforma.

2.6 Conceptos matemáticos

Para desarrollar la solución del problema planteado es necesario tener conocimiento en conceptos matemáticos que ayudan a entender de mejor manera los modelos de optimización que se realizan en este trabajo de titulación. Los conceptos matemáticos en conjunto con las herramientas computacionales descritas anteriormente, se podrá resolver de una forma correcta los dos modelos de optimización planteados.

2.6.1 Programación Lineal

La programación lineal es un método de solución de problemas en donde en base a una función objetivo se maximiza o se minimiza el resultado, de acuerdo con lo que se quiera resolver. Para definir problemas de programación lineal es necesario definir tres conceptos importantes, los cuales se definirán a continuación:

- **Función objetivo:** es aquella ecuación que se quiere maximizar o minimizar el valor de esta.



$$\min F.O. = \sum_{i=1}^n c_i * x_i$$

Ecuación 1: Ejemplo función objetivo

- Variables de decisión: son aquellos factores en donde se tiene control de los valores que se tomarán para resolver el problema.

$$x_i \in \mathbb{R}$$

$$x_i \geq 0, \forall i$$

Ecuación 2: Ejemplo variables de decisión

- Restricciones: Son normas que restringen los valores que pueden tomar las variables de decisión. Estas pueden representarse en forma de ecuaciones como también en ecuaciones.

$$\sum_{i=1}^n d_{i,j} * x_i \leq b_j, \forall j$$

Ecuación 3: Ejemplo restricciones

2.6.3 Optimización Combinada

La optimización combinada es una rama de las matemáticas, la cual consiste en descubrir soluciones que se encuentran dentro de un conjunto finito de combinaciones posibles (gran cantidad de datos), bajo una cierta cantidad de restricciones que ajusten el modelo ((s/f). “Modelado mediante Optimización Combinatoria”). Son problemas de alta complejidad computacional por lo que se no se puede resolver con métodos simples.

Es muy utilizado para la resolución de problemas complejos en el área de logística, ciencia de los datos, teoría de grafos investigaciones, etc.

Dentro de sus principales aplicaciones se encuentran:

- Problemas de secuenciación.
- Problemas de ruteo de vehículos.



- Problemas de asignación.
- Problema de localización.
- Problema de cubrimiento conjunto.
- Entre otros.

2.7 Modelo de Localización

El modelo de localización tiene como objetivo de determinar cuál es la ubicación optima que deben tener las instalaciones o recursos en un espacio geográfico determinado con el fin de maximizar la cobertura y minimizar los costos. Por lo general se utilizan para ubicar centros donde se prestan servicios a las personas.

Se debe de cumplir con ciertos criterios de cobertura, demanda y restricciones de capacidad máxima, para encontrar la mejor solución de un conjunto de potenciales ubicaciones. (Niño-Vargas, Lamos-Díaz (2014, 4 de diciembre). “Modelo matemático para determinar la ubicación de Centros de Distribución en un contexto real”)

El problema de localización se puede realizar mediante programación lineal y optimización combinatoria.

Donde:

Conjunto y parámetros:

- I : Conjunto de ubicaciones de demanda
- J : Conjunto de potenciales ubicaciones para instalar
- d_i : Demanda en la ubicación $i \in I$
- c_j : Costo de instalar una instalación o recurso en $j \in J$
- a_{ij} : Indicador binario que si es 1 la instalación en el punto j puede satisfacer la demanda en i , siendo el caso contrario un 0

Variables de Decisión:



- x_j : Variable binaria que toma el valor 1 si se instala en j , 0 en el caso contrario
- y_{ij} : Variable binaria que toma el valor 1 si la demanda en i es cubierta por la instalación en j , 0 en el caso contrario

Función objetivo:

Minimizar el costo de instalación:

$$\min \sum_{j \in J} c_j x_j$$

Ecuación 4: "Función Objetivo Modelo Localización"

Restricciones:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} y_{ij} \geq 1, \quad \forall i \in I$$

Ecuación 5: Restricción Cobertura de Demanda

$$y_{ij} \leq x_j, \quad \forall i \in I, j \in J$$

Ecuación 6: Restricción Asignación a Instalaciones Existentes

$$x_j, y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, i \in I$$

Ecuación 7: Restricción Variables Binarias

2.8 Modelo de Cubrimiento Conjunto

El modelo de cubrimiento conjunto o set covering (inglés), tiene como objetivo principal minimizar la cantidad total o el costo fijo de las instalaciones ((Delgado-Ávila, Ramírez-Melo, Montufar-Benítez. (2021, 5 de julio). "Un Modelo de Cobertura de Conjuntos Modificado para la Ubicación de Centros de Distribución: Un Estudio de Caso en México"), siendo muy importante que las ubicaciones de las instalaciones cubran toda la demanda, para luego llevarlo a una matriz binaria en



donde $X_i=1$ si está en la columna está en la solución, de no ser ese el caso $X_i=0$. A continuación se formula el problema de cubrimiento conjunto:

Donde:

Conjunto y parámetros

- I : Conjunto de elementos que deben ser cubiertos
- J : Conjunto de subconjuntos posibles para la cobertura
- a_{ij} : Indicador binario que es 1 si el subconjunto j cubre el elemento i , y siendo el caso contrario un 0
- c_j : Costo de seleccionar el subconjunto $j \in J$

Variables de Decisión:

- x_j : Variable binaria que toma el valor 1 si se selecciona el subconjunto j , 0 en el caso contrario
- y_{ij} : Variable binaria que toma el valor 1 si la demanda en i es cubierta por la instalación en j , 0 en el caso contrario

Función objetivo:

Minimizar el costo total de los subconjuntos:

$$\min \sum_{j \in J} c_j x_j$$

Ecuación 8: "Función Objetivo Set Covering"

Restricciones:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} y_{ij} \geq 1, \quad \forall i \in I$$

Ecuación 9: Restricción Cobertura de Elementos

$$x_j, y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, i \in I$$

Ecuación 10: Restricción Variables Binarias



3 Investigación

3.1 Normativa de Operaciones de Drones en Chile

El año 2012, la DGAC comenzó a autorizar las operaciones de drones/RPAS en áreas no pobladas, según la Norma DAN 91 “Reglas del Aire” numeral 91.102 “Aeronaves Pilotadas a Distancia”, no obstante, y dada la necesidad de utilizar este tipo de aeronaves en áreas pobladas, se crea la Norma DAN 151 “Operaciones de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) en Asuntos de Interés Público, que se efectúen sobre Áreas Pobladas” (Normativa DAN 91 y DAN 151, 2012-2020. DGAC).

Ambas normas se han ido modificando de acuerdo con las necesidades de los propios usuarios y adecuándose a la realidad actual.

Por otra parte, de acuerdo con lo que establece la normativa aeronáutica, desde agosto del 2019 y que se comenzó a aplicar desde el año 2021, toda entidad, empresa o persona que realice trabajos aéreos con RPAS y que éstos sean con fines comerciales, deben obtener su Certificado de Operador Aéreo (AOC), conforme a lo señalado en la Norma DAN 119 “Norma para la Obtención de un Certificado de Operador Aéreo”, Cap. "D".

En cambio, si la operación del dron RPA no es con fines de lucro, se debe dar cumplimiento al DAR 06, Vol. IV 2.3.4 y 2.5, toda vez que se considera un Trabajo Aéreo, para lo cual se le otorgará un Certificado Especial de Operación, debiendo presentar la siguiente documentación:

- Manual de Operaciones.
- Especificaciones Operativa
- Manual de Operaciones del RPA.
- Autorización de la Junta de Aeronáutica Civil

3.2 Características del Parque nacional Queulat

El 13 de octubre de 1983 se creó el Parque Nacional Queulat, ubicado en la Región de Aysén, posee una superficie aproximada de 154 mil hectáreas, su clima es templado frío y precipitaciones al año son entre 3.500 a 4.000 mm. Está abierto durante todo el año (Parque Nacional Queulat. (2018, junio 10). La Ruta de los Parques)

Posee 13 senderos habilitados que se describirán sus características a continuación:

Nombre Sendero	Dificultad	Duración	Distancia	Habilitado
Sendero Mirador Ventisquero Colgante	Difícil	2 horas ida y vuelta	5,6 km	Si
Sendero Laguna Témpanos	Fácil-Media	20-30 min ida y vuelta	1,3 km	Si
Sendero Salto El Cóndor	Fácil	20 minutos ida y vuelta	0,3 km	Si
Sendero Laguna de los Pumas	Difícil	5 horas ida y vuelta	10 km	Si
Sendero Bosque Encantado-Laguna Los Gnomos	Media	1 hora 40 minutos ida y vuelta	3,5 km	Si
Sendero Mirador Laguna Témpanos	Fácil	20 min ida y vuelta	0,5 km	Si
Sendero Interpretativo El Aluvión	Fácil	10 min ida y vuelta	0,3 km	Si
Sendero Río Ventisquero Queulat	Fácil	10 min ida y vuelta	0,2 km	Si
Sendero El Paso de los Colonos	Fácil	10 min ida y vuelta	0,6 km	Si
Sendero Mirador Los Canelos	Fácil	1 hora ida y vuelta	2,4 km	Si



Sendero Mirador Puyuhuapi	Fácil-Media	3 horas 30 min ida y vuelta	11,6 km	Si
Sendero Mirador de Puyuhuapi	Fácil	1 hora ida y vuelta	2,1 km	Si
Sendero Mirador Piedra del Gato	Fácil	10 min ida y vuelta	0,2 km	Si

Tabla 1: Información de Senderos Parque Queulat. [Fuente: Elaboración Propia]

El parque también cuenta con los siguientes servicios:

- Baños
- Camping
- Centro de Informaciones
- Senderos
- Zonas de Picnic

A continuación, se muestra el mapa de Parque Nacional Queulat:

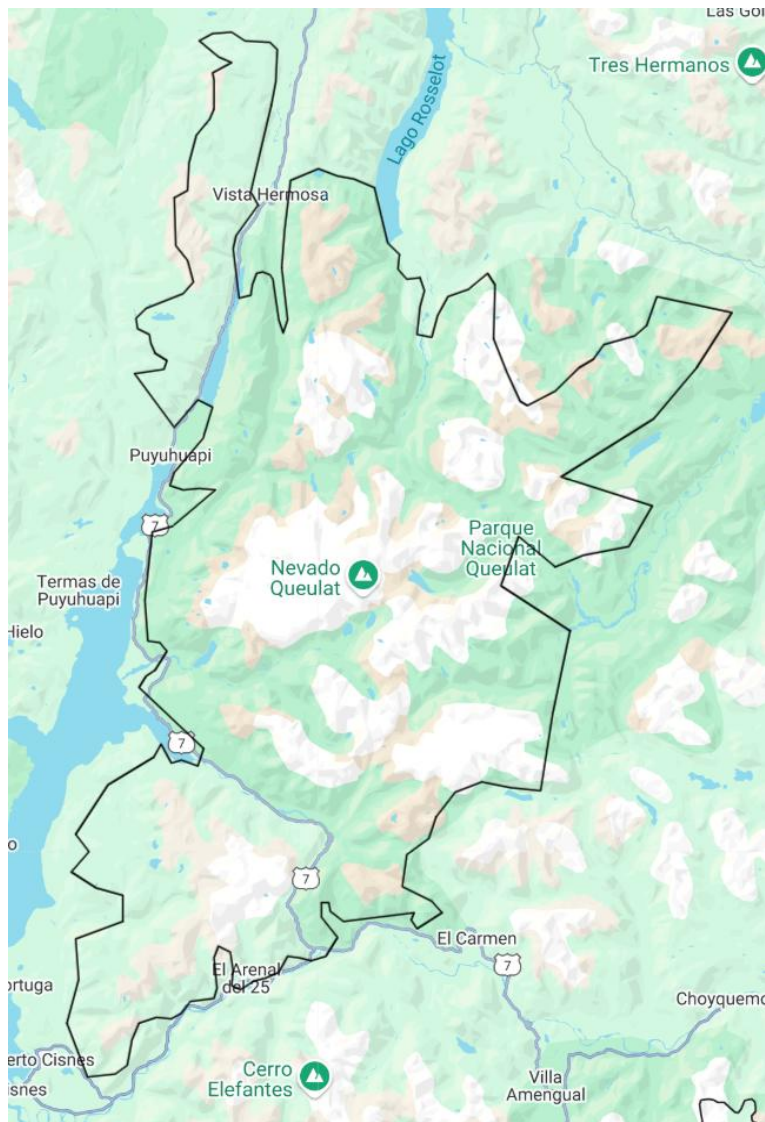


Figura 11: Mapa del Parque Nacional Queulat” [Fuente: Elaboración Propia]

3.2.1 Mapa de Cada Cuadrante Parque Nacional Queulat

El Parque Nacional Queulat si bien tiene aproximadamente 154 mil hectáreas de longitud, los senderos habilitados al público se encuentran en 4 diferentes zonas a lo largo de esta área protegida por lo que para efectos de obtener resultados reales el parque se dividió en cuatro cuadrantes, como se puede apreciar a continuación:

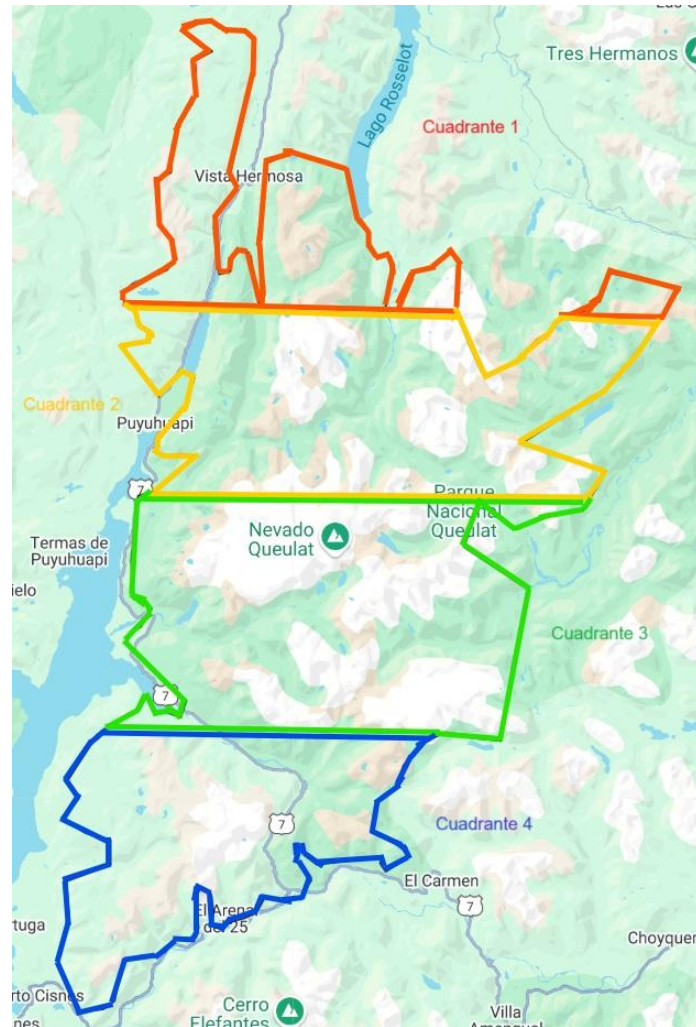


Figura 12: Mapa Parque Nacional Queulat en cuadrantes

- Cuadrante 1: Se compone de dos senderos, representado en la figura 15 está representado por el color rojo; Sendero Laguna de Los Pumas y Sendero Paso de los Colonos.



Figura 13: Mapa Cuadrante 1

- Cuadrante 2: Se compone de tres senderos, representado en la figura 15 por el color amarillo; Sendero Mirador Los Canelos, Sendero Mirador Puyuhuapi y Sendero Mirador de Puyuhuapi.

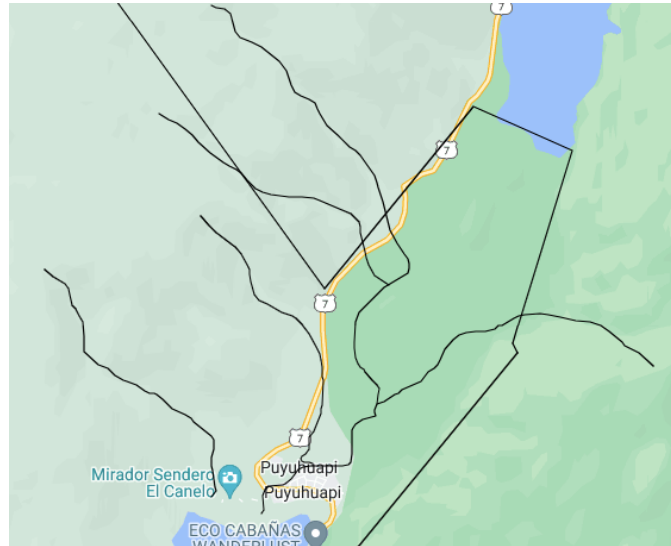


Figura 14: Mapa Cuadrante 2

- Cuadrante 3: Se compone de cinco senderos, representado en la figura 15 está representado por el color verde; Sendero Mirador Ventisquero Colgante, Sendero Laguna Témpanos, Sendero Mirador Laguna Témpanos, Sendero Interpretativo El Aluvión y Sendero Río Ventisquero Queulat.

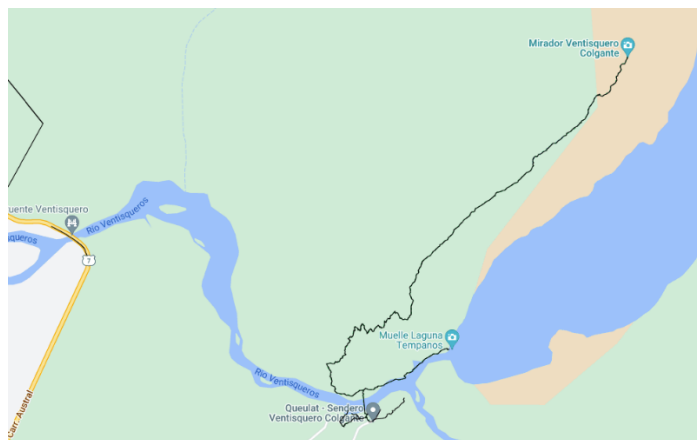


Figura 15: Mapa Cuadrante 3

- Cuadrante 4: Se compone de tres senderos, representado en la figura 15 por el color azul; Sendero Salto El Cóndor, Sendero Bosque Encantado-Laguna Los Gnomos y Sendero Mirador Piedra de Gato.

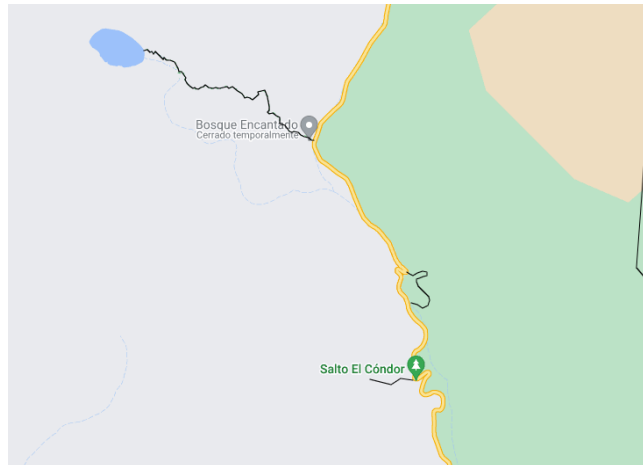


Figura 16: Mapa Cuadrante 4

3.2.2 Mapas de Cada Cuadrante con sus Posibles puntos de riesgo

En la tabla 2 se especifican las características que poseen los senderos del Parque Nacional Queulat, si bien en su mayoría la dificultad que poseen es fácil y de corta distancia estos senderos poseen quebradas y miradores, por lo que se definen los puntos de riesgo en donde se encuentre en altura, una curva peligrosa o mirador, con el fin de determinar posibles ubicaciones de los drones atados y sus respectivos centros de operación. Se muestra a continuación los puntos de riesgo en cada cuadrante del Parque Nacional Queulat, donde la línea negra delimita el camino del sendero y los puntos rojos representan los puntos de riesgo:

- Cuadrante 1: El sendero Laguna de Los Pumas y el sendero El Paso de los Colonos.



Figura 17: Puntos de riesgo cuadrante 1

- Cuadrante 2: El sendero Mirador de Puyuhuapi, el sendero de Mirador Los Canelos y el sendero Mirador Puyuhuapi.

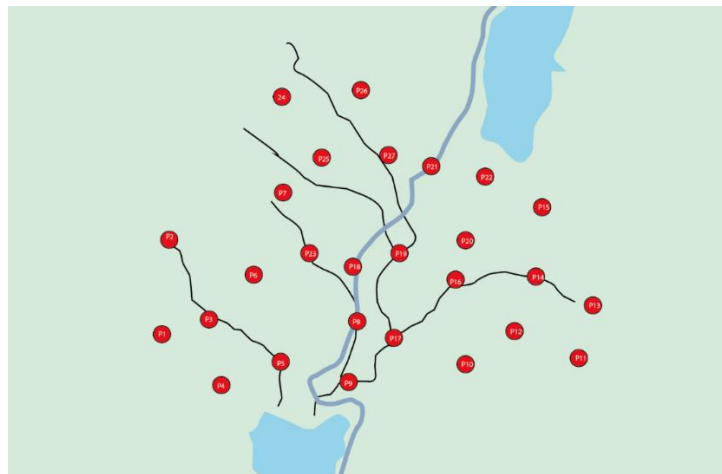


Figura 18: Puntos de riesgo cuadrante 2

- Cuadrante 3: El sendero Río Ventisquero Queulat, el sendero Mirador Ventisquero Colgante, el sendero Laguna Témpanos, el sendero Interpretativo El Aluvión, y el sendero Mirador Laguna Témpanos

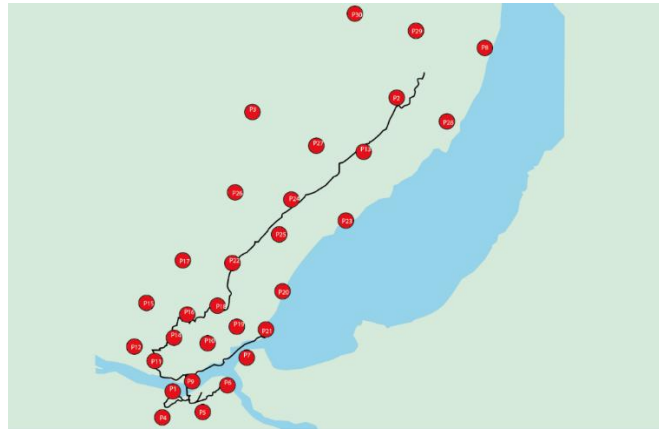


Figura 19: Puntos de riesgo cuadrante 3

- Cuadrante 4: El sendero Bosque Encantado- Laguna de los Gnomos

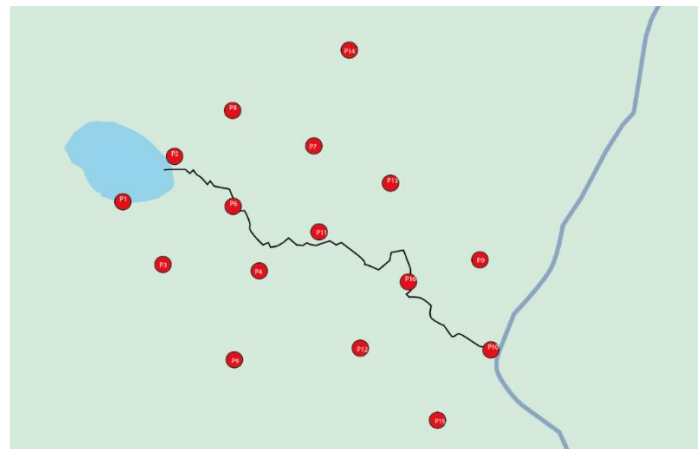


Figura 20: Puntos de riesgo cuadrante 4

3.2.3 Cálculo de distancia, entre las potenciales ubicaciones de las casetas y drones con los puntos de riesgo

El cálculo de las distancias permite conocer cuáles son los puntos que pueden ser cubiertos por una caseta o por un dron atado, esto considerando que se determinó un alcance máximo de vigilancia para ambos:



- Casetas: Pueden cubrir un punto de riesgo dentro de un radio máximo de 399 metros.
- Drones Atados: Pueden cubrir un punto de riesgo dentro de un rango entre 400 metros y 2000 metros.

Por lo que para que el modelo de optimización respete estas restricciones, se crearon matrices de distancia real utilizando la herramienta computacional My Maps de Google, con el fin de que la solución represente la realidad.

A continuación, se presentan las tablas que contienen las matrices de distancia, como también las matrices binarias, siendo 1 si el punto está cubierto por la caseta o el dron atado, 0 en el caso contrario, se pueden encontrar en el Anexo N°1

3.2.4 Mapas de los Cuadrantes con posibles ubicaciones de drones atados y centros de operaciones

Para definir las posibles ubicaciones de los drones atados se tomó en consideración los puntos de riesgo definidos anteriormente, y se graficaron de manera digital los cuales posee las siguientes especificaciones por colores y formas:

1. Circulo color rojo: Representa el punto de riesgo
 2. Triangulo color verde: Representa el dron atado
 3. Rombo color azul: Representa el centro de operaciones
 4. Línea color negra: Representa el/los senderos
- Cuadrante 1: En el cuadrante 1 hay 28 puntos de riesgo y se ubicaron 14 potenciales casetas y 14 potenciales drones atados (los cuales esta ubicados en la misma posición). Y es así como se vería representado en la siguiente imagen:

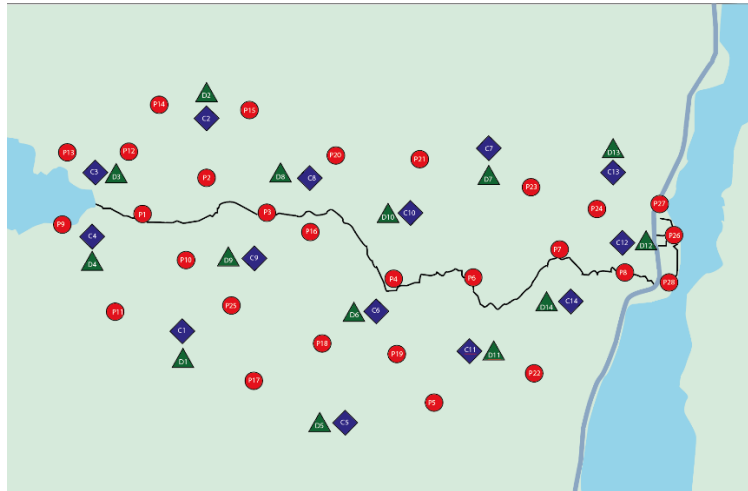


Figura 21: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 1

Los puntos cubiertos en el cuadrante 1 por cada caseta y dron atado se pueden encontrar en el Anexo N°2.

- Cuadrante 2: En el cuadrante 2 hay 27 puntos de riesgo y se ubicaron 13 potenciales casetas y 13 potenciales drones atados (los cuales se encuentran ubicados en el mismo punto). Y es así como se ve representado en la siguiente imagen:

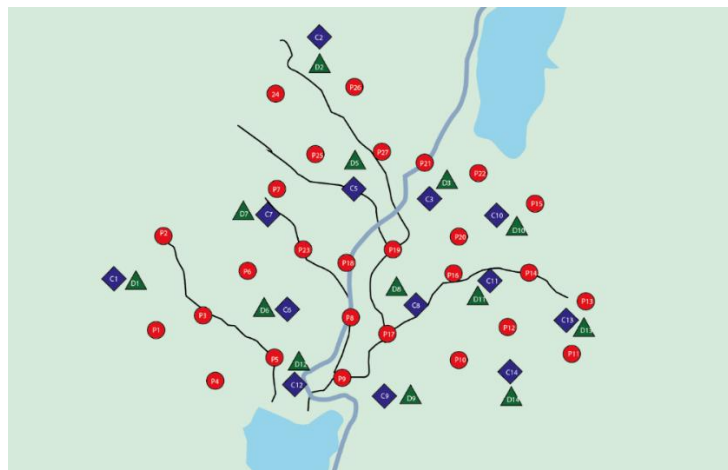


Figura 22: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 2

Los puntos cubiertos en el cuadrante 2 por cada caseta y dron atado se pueden encontrar en el Anexo N°3.

- Cuadrante 3: En el cuadrante 3 hay 30 puntos de riesgo y se ubicaron 14 potenciales casetas y 14 potenciales drones atados (los cuales esta ubicados en la misma posición). Y es así como se vería representado en la siguiente imagen:

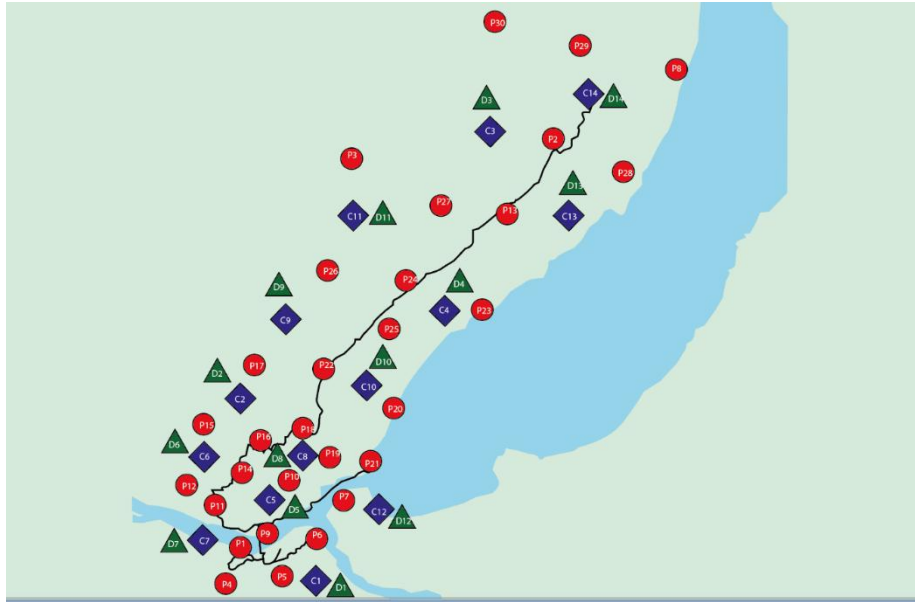


Figura 23: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 3

Los puntos cubiertos en el cuadrante 3 por cada caseta y dron atado se pueden encontrar en el Anexo N°4.

- Cuadrante 4: En el cuadrante 4 hay 16 puntos de riesgo y se ubicaron 8 potenciales casetas y 8 potenciales drones atados (los cuales esta ubicados en la misma posición). Y es así como se vería representado en la siguiente imagen:

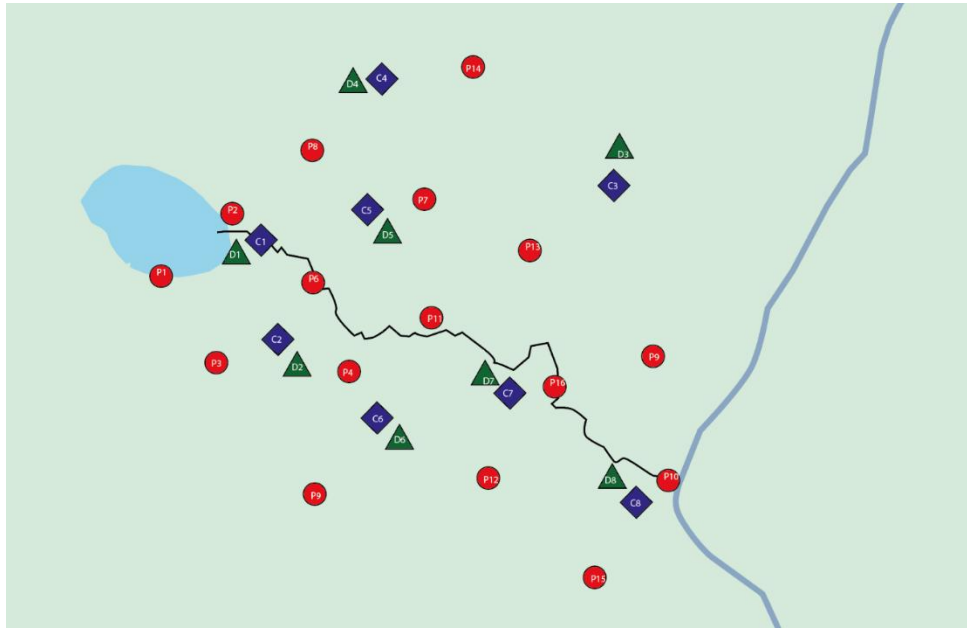


Figura 24: Mapa gráfico con posibles ubicaciones en el cuadrante 4

Los puntos cubiertos en el cuadrante 4 por cada caseta y dron atado se pueden encontrar en el Anexo N°5.



4. Desarrollo

4.1 Modelo de Optimización de Localización + Set Covering

A continuación, se presenta la formulación matemática del problema de localización de casetas y drones atados para complementar el sistema de vigilancia actual del Parque Nacional Queulat, con el fin de ayudar a la preservación de la flora y fauna de la zona como también a la prevención de accidentes humanos. Para dar solución a este problema se propone un modelo de optimización combinado que contemple el Problema de Localización y el Problema de Cubrimiento Conjunto (Set Covering).

El objetivo del modelo es determinar la ubicación óptima de potenciales ubicaciones en las que se encuentran casetas y drones atados, minimizando los costos de instalación y que todos los puntos de riesgo estén cubiertos ya sea por una caseta o por un dron atado.

4.1.1 Definición de Parámetros

Definición de parámetros para el modelo de localización de drones atados y centros de operaciones para aportar a la vigilancia, prevención de accidentes, desastres naturales causados por el hombre y que se conserve y proteja la fauna y flora del Parque Nacional Queulat. Para esto se contempla m potenciales ubicaciones que deben cubrir una máxima cantidad de puntos de riesgo n . Por lo que se busca determinar cuáles son las casetas y drones atados que deben ser instalados para cubrir todos los puntos de riesgo al menor costo posible.

A continuación, están definidos los conjuntos y parámetros que serán utilizados para resolver el modelo planteado.

Definición de Conjuntos:

- $I = \text{Conjunto de puntos de riesco, } i \in I, \text{ con } I = n$
- $J = \text{Conjunto de ubicaciones potenciales para casetas y drones atados, } i \in j, \text{ con } J = m$

Definición de Parámetros:



- cC_j : Costo de instalación de una caseta en la ubicación j
- cD_j : Costo de instalación de un dron atado en la ubicación j
- b_j : Capacidad máxima de vigilancia de una caseta en la ubicación j
- t_j : Capacidad máxima de vigilancia de un dron atado en la ubicación j
- $N_c[i][j]$: Matriz binaria donde es 1 si la caseta en j cubre el punto i , 0 en el caso contrario
- $N_d[i][j]$: Matriz binaria donde es 1 si el dron atado en j cubre el punto i , 0 en el caso contrario

4.1.2 Definición de Variables Binarias

A continuación, se presentan las variables de decisión en donde indican cuales son las casetas y drones atados que se instalan, y que puntos de riesgo están cubiertos por cada uno de ellos:

- x_j : 1 si se instala una caseta en la ubicación j , 0 en el caso contrario
- y_j : 1 si se instala un dron atado en la ubicación j , 0 en el caso contrario
- z_{ij} : 1 si el punto i es cubierto por una caseta o un dron atado en la ubicación j , 0 en el caso contrario
- z_{ij}^{caseta} : 1 si el punto es cubierto por una caseta en la ubicación j , 0 en el caso contrario
- $z_{ij}^{dron\ atado}$: 1 si el punto es cubierto por un dron atado en la ubicación j , 0 en el caso contrario

4.1.3 Función Objetivo

El objetivo del modelo de optimización de localización + cubrimiento conjunto es minimizar el costo de instalación de casetas y drones atados en sus respectivas ubicaciones m y está representado por la siguiente función:



$$\min \sum_{j \in J} cC_j x_j + \sum_{j \in J} cD_j y_j$$

Ecuación 11: Función objetivo minimizar costo de instalación

4.1.4 Restricciones del Modelo

En los modelos de optimización es clave definir correctamente las definiciones para que la solución sea factible, eficiente y se ajuste a todos los requisitos que se tienen que cumplir, estableciendo condiciones obligatorias.

Para el caso del modelo que se planteó anteriormente para la instalación de las casetas y drones en las potenciales ubicaciones para complementar la vigilancia en el Parque Nacional Queulat es necesario que se deba contemplar que las restricciones contemplen lo siguiente:

- Todos los puntos de riesgo obtenidos en la fase de recolección de datos deben ser vigilados por una caseta o un dron atado.
- Las casetas y drones atados no pueden exceder una cierta capacidad máxima de vigilancia.
- Solo se puede instalar un dron atado si es que previamente hay una caseta instalada en el punto m .
- Cada punto debe ser cubierto exactamente una vez ya sea por la caseta o por el dron atado, para así evitar que el punto sea vigilado por más de una caseta o dron atado innecesariamente.

Teniendo en consideración las directrices que deben tener las restricciones y que se minimicen los costos de instalación, a continuación, se presentan las restricciones del modelo de optimización del problema de localización + set covering para el Parque Nacional Queulat:

$$\min \sum_{j \in J} cC_j x_j + \sum_{j \in J} cD_j y_j$$

Ecuación 12: Función objetivo minimizar costo de instalación

$$\sum_{j \in J} z_{ij} * (N_c[i][j] + N_d[i][j]) \geq 1, \quad \forall i \in I$$

Ecuación 13: Restricción 1

$$y_j \leq x_j, \quad \forall j \in J$$

Ecuación 14: Restricción 2

$$z_{ij} = z_{ij}^{caseta} + z_{ij}^{dron\ atado}, \quad \forall i \in I, j \in J$$

Ecuación 15: Restricción 3

$$z_{ij}^{caseta} \leq x_i, \quad \forall i \in I, j \in J \text{ con } N_c[i][j] = 1$$

Ecuación 16: Restricción 4

$$z_{ij}^{dron\ atado} \leq y_i, \quad \forall i \in I, j \in J \text{ con } N_d[i][j] = 1$$

Ecuación 17: Restricción 5

$$\sum_{i \in I} N_c[i][j] * z_{ij} \leq b_j x_j, \quad \forall j \in J$$

Ecuación 18: Restricción 6

$$\sum_{i \in I} N_d[i][j] * z_{ij} \leq t_j y_j, \quad \forall j \in J$$

Ecuación 19: Restricción 7

$$x_j, y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J$$

$$z_{ij}, z_{ij}^{caseta}, z_{ij}^{dron\ atado} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J$$

Ecuación 20: Restricciones Binarias

4.2 Costo de instalación de los drones atados y centros de operaciones

Los costos de instalación de drones atados y casetas para el Parque Nacional Queulat, requieren un análisis detallado de este. Se deben considerar factores como la construcción de las casetas, la compra de los drones atados con sus respectivas



cámaras de vigilancia, la logística y transporte que implica este tipo de aparatos y casetas, costos de operación, costo de mantenimiento, compra de repuestos, la licencia de piloto de aeronave no tripulada y la remuneración del personal del parque.

Para mantener un orden de cuáles son los costos asociados a las casetas y a los drones estos se dividirán en 2, costo por instalar una caseta y costo por instalar un dron atado, los cuales están representados en las siguientes tablas respectivamente:

Costo instalación por cada caseta:

Categoría	Descripción	Valor Aproximado (CLP)
Construcción de caseta	Estructura de 10m ² .	1.000.000
Instalación	Costo por la instalación y traslado necesario para la caseta.	300.000
Equipamiento	Inmobiliario necesario para la estadía de un guardaparque.	840.000
Mantenimiento anual e insumos operativos	Reparaciones y gastos básicos.	850.000
Sueldo anual Guardaparques (promedio)	Sueldo mensual de guardaparques aproximadamente de 1.000.000 pesos.	12.000.000
Total, aproximado		14.000.000

Tabla 2: Estimación Costo de Instalación de la Caseta



Se debe de tener en consideración que el valor puede aumentar debido al costo de logística que se requiere para poder realizar una instalación de una caseta en un lugar que no es de fácil acceso, por lo que los costos de todas las casetas varían.

Costo instalación por cada dron atado:

Categoría	Descripción	Valor Aproximado (CLP)
Dron atado (unidad)+ instalación	Dron con cámara térmica y sensores de vigilancia.	9.600.000
Mantenimiento anual	Revisión, actualizaciones, etc.	850.000
Licencia de piloto	Licencia otorgada por la Dirección de Aeronáutica Civil	180.000
Repuestos	Baterías, cables, etc.	300.000
Total, Aproximado		11.000.000

Tabla 3: Estimación Costo de instalación del Dron Atado

Al igual que la instalación de las casetas el valor total de la instalación de los drones atados puede variar dependiendo de su ubicación debido al costo de logística.

Costos de instalación de casetas y drones atados para el parque nacional Queulat



Costo de Instalación de Casetas y drones Atados por cuadrantes								
Numero de Casetas y Dron Atado	Cuadrante 1		Cuadrante 2		Cuadrante 3		Cuadrante 4	
	Casetas	Dron Atado	Casetas	Dron Atado	Casetas	Dron Atado	Casetas	Dron Atado
1	14.340.000	10.630.000	14.390.000	12.230.000	14.290.000	9.030.000	14.365.000	11.430.000
2	14.340.000	10.630.000	14.390.000	12.230.000	14.340.000	10.630.000	14.340.000	10.630.000
3	14.315.000	9.830.000	14.365.000	11.430.000	14.390.000	12.230.000	14.365.000	11.430.000
4	14.365.000	11.430.000	14.390.000	12.230.000	14.365.000	11.430.000	14.365.000	11.430.000
5	14.390.000	12.230.000	14.340.000	10.630.000	14.315.000	9.830.000	14.340.000	10.630.000
6	14.315.000	9.830.000	14.365.000	11.430.000	14.340.000	10.630.000	14.315.000	9.830.000
7	14.390.000	12.230.000	14.365.000	11.430.000	14.315.000	9.830.000	14.340.000	10.630.000
8	14.315.000	9.830.000	14.340.000	10.630.000	14.340.000	10.630.000	14.290.000	9.030.000
9	14.340.000	10.630.000	14.340.000	10.630.000	14.365.000	11.430.000	-----	-----
10	14.340.000	10.630.000	14.365.000	11.430.000	14.340.000	10.630.000	-----	-----
11	14.315.000	9.830.000	14.390.000	12.230.000	14.365.000	11.430.000	-----	-----
12	14.290.000	9.030.000	14.315.000	9.830.000	14.315.000	9.830.000	-----	-----
13	14.315.000	9.830.000	14.390.000	12.230.000	14.390.000	12.230.000	-----	-----
14	14.290.000	9.030.000	-----	-----	14.390.000	12.230.000	-----	-----

Tabla 4: Costo de Instalación de Casetas y Drones Atados Por Cuadrantes

4.3 Modelo de optimización en OPL CPLEX

4.3.1 Definición de los conjuntos y parámetros del modelo de optimización

Para definir los conjuntos parámetros en OPL CPLEX, se utilizó el comando “**int**” que se usa para definir variables o parámetros de tipo entero y “**range**” que se aplica para definir un conjunto de valores enteros consecutivos, principalmente para matrices. También se emplea el comando “**float**”, el cual define variables de tipo decimal, que sirven para determinar variables de decisión, parámetros, etc.

Conjuntos:

- “int n” es un número entero que representa la cantidad de puntos de riesgo que hay en el cuadrante correspondiente al Parque Nacional Queulat.
- “int m” es un número entero que representa la cantidad de posibles ubicaciones de casetas y drones que hay en el cuadrante correspondiente al Parque Nacional Queulat.

```
7 //Parametros y conjuntos
8
9 int n = ...; // Número de puntos de riesgo
10
11 int m = ...; // Número de casetas posibles
12
13
```

Figura 25: “Definición de conjuntos en OPL CPLEX”

- “range puntos”: Conjunto de valores de puntos de riesgo de 1...n
- “range casetas”: Conjunto de valores de potenciales ubicaciones posibles de 1...m

```
14
15 range puntos = 1..n; // Conjunto de puntos de riesgo
16
17 range casetas = 1..m; // Conjunto de ubicaciones para casetas
18
```

Figura 26: “Definición de conjuntos en OPL CPLEX”

Parámetros:

- “float cC[jj]”: Es el costo de instalación de una caseta en el punto j.
- “float cD[jj]”: Es el costo de instalación de un dron atado en el punto j.

```
20
21 float cC[casetas] = ...; // Costos de casetas
22
23 float cD[casetas] = ...; // Costos de drones
24
```

Figura 27: “Definición de parámetros en OPL CPLEX”

- “int b[j]”: Es la capacidad máxima de vigilancia de una caseta ubicada en el punto j.
- “int t[j]”: Es la capacidad máxima de vigilancia de un dron atado ubicado en el punto j.

```
26
27 int b[casetas] = ...; //Capacidad de vigilancia de cada caseta
28
29 int t[casetas] = ...; // Capacidad de vigilancia de cada dron atado
30
```

Figura 28: “Definición de parámetros en OPL CPLEX”

- “int N_c[i][j]”: Es la matriz binaria (tabla) que indica si la caseta ubicada en j cubre al punto i, siendo un 1 si la cubre, 0 el caso contrario.
- “int N_d[i][j]”: Es la matriz binaria (tabla) que indica si el dron atado ubicado en j cubre al punto i, siendo un 1 si la cubre, 0 el caso contrario.

```
31
32
33 int N_c[puntos][casetas] = ...; // Matriz Binaria vigilancia caseta
34
35 int N_d[puntos][casetas] = ...; // Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado
36
```

Figura 29: “Definición de parámetros en OPL CPLEX”

4.3.2 Definición las variables de decisión del modelo de optimización

Las variables de decisión que se definen a continuación nos permiten modelar el modelo para que el resultado tome un valor 1 o 0, para eso se usara el comando “dvar boolean” que se utiliza para definir variables binarias.

- “**dvar boolean x[j]**”: Es la matriz binaria que indica un 1 si se instala una caseta en j, 0 en el caso contrario.
- “**dvar boolean y[j]**”: Es la matriz binaria que indica un 1 si se instala un dron atado en j, 0 en el caso contrario.
- “**dvar boolean z[i][j]**”: Es la matriz binaria que indica un 1 si el punto i es cubierto por una caseta o un dron atado en el punto j, 0 en el caso contrario.
- “**dvar boolean z_dron[i][j]**”: Es la matriz binaria que indica un 1 si el punto i es cubierto por un dron atado en el punto j, 0 en el caso contrario.
- “**dvar boolean z_caseta[i][j]**”: Es la matriz binaria que indica un 1 si el punto i es cubierto por una caseta en el punto j, 0 en el caso contrario.

```
39 // Variables de decisión
40
41 dvar boolean x[casetas]; // 1 si se instala una caseta en j, 0 en caso contrario
42
43 dvar boolean y[casetas]; // 1 si se instala un dron en j, 0 en caso contrario
44
45 dvar boolean z[puntos][casetas]; // 1 si el punto i es cubierto por un dron en j, 0 en caso contrario
46
47 dvar boolean z_dron[puntos][casetas]; // 1 si el punto es cubierto por un dron
48
49 dvar boolean z_caseta[puntos][casetas]; //1 si el punto i es cubierto por una caseta
50
```

Figura 30: “Variables de decisión en OPL CPLEX”

4.3.3 Definición de función objetivo del modelo

El objetivo de este modelo es minimizar los costos de instalación de casetas y drones atados garantizando que todos los puntos de riesgo sean vigilados por uno de estos por lo que para hacer más sencilla la función en OPL CPLEX se definió el costo total de las casetas y el costo total de los drones atados.

- “**dexpr float FC**”: Es la definición del costo total de las casetas.
- “**dexpr float FD**”: Es la definición del costo total de las casetas
- “**minimize FC + FD**”: Es la definición de la función objetivo, la cual minimiza la suma del costo total de las casetas y drones atados.

```
53 // Función objetivo
54
55 dexpr float FC = sum(j in casetas) cC[j] * x[j]; // Costo de casetas
56
57 dexpr float FD = sum(j in casetas) cD[j] * y[j]; // Costo de drones
58
59 minimize FC + FD;
60
--
```

Figura 31: “Definición de la función objetivo en OPL CPLEX”

4.3.4 Definición de las restricciones del modelo

Las restricciones son parte fundamental del modelo, ya que le da las directrices a seguir para que se asemeje lo más posible a la realidad

- Restricción cobertura de puntos de riesgo: Cada punto de riesgo debe de estar cubierto al menos una vez, ya sea por una caseta o por un dron.

```
52
53 // Restricciones
54
55 subject to {
56
57 forall (i in puntos) //Cada punto debe ser cubierto por al menos una caseta o un dron atado
58
59     sum(j in casetas) (N_c[i][j] * z[i][j] + N_d[i][j] * z[i][j]) >= 1; // Cada punto debe ser cubierto
60
61 }
```

Figura 32: “Restricción cobertura de puntos de riesgo en OPL CPLEX”

- Restricción instalación de drones atados: Un dron atado solo puede ser instalado si es que previamente hay una caseta instalada en el punto j.

```
72
73 forall (j in casetas)
74
75     y[j] <= x[j]; // Un dron solo puede instalarse si hay una caseta
76
```

Figura 33: “Restricción de instalación de drones atados en OPL CPLEX”

- Restricción punto cubierto: Un punto cubierto implica que hay una caseta o un dron atado que lo cubre

```
78
79 forall (i in puntos, j in casetas) { //Un punto cubierto implica que hay una caseta o un dron atado en esa ubicacion
80   z[i][j] == z_dron[i][j] + z_caseta[i][j];
81   if (N_c[i][j] == 1)
82     z[i][j] <= x[j];
83
84   if (N_d[i][j] == 1)
85     z[i][j] <= y[j];
86
87
88
89 }
```

Figura 34: "Restricción de un punto cubierto en OPL CPLEX"

- Restricción capacidad máxima de vigilancia de una caseta: Una caseta puede cubrir un máximo de $b[j]$ puntos de riesgo.

```
96
97 forall (j in casetas) // Capacidad de vigilancia de las casetas
98
99   sum(i in puntos) N_c[i][j] * z[i][j] <= b[j] * x[j]; // Una caseta puede cubrir como máximo k puntos
100
```

Figura 35: "Restricción capacidad máxima de una caseta en OPL CPLEX"

- Restricción capacidad máxima de vigilancia de un dron atado: Un dron atado puede cubrir un máximo de $t[j]$ puntos de riesgo.

```
102
103 forall (i in puntos, j in casetas) // Capacidad de vigilancia de los drones atados
104
105   sum (i in puntos) N_d[i][j] * z[i][j] <= t[j] * y[j];
106
107 }
108
```

Figura 36: "Restricción capacidad máxima de un dron atado en OPL CPLEX"

4.3.5 Definición de las salidas de resultados

Los resultados se pueden visualizar en el mismo programa de OPL CPLEX mediante el "execute" y el "writeln"



- “**x**”: Representa las casetas instaladas en el punto j.
- “**y**”: Representa los drones atados instalados en el punto j.
- “**z**”: Representa los puntos cubiertos por los drones atados y casetas en el punto j.

```
111 // Salida de resultados
112
113 execute {
114
115     writeln("Casetas instaladas: ", x);
116
117     writeln("Drones instalados: ", y);
118
119     writeln("Cobertura de puntos: ", z);
120
121 }
```

Figura 37: “Salida de resultados en OPL CPLEX”

4.3.6 Definición de la entrada de datos al código en OPL CPLEX desde Excel

Para que OPL CPLEX importe los datos desde un archivo Excel hay que ocupar el archivo “.dat”, en el cual se debe establecer la conexión mediante el comando “SheetConnection” y “SheetRead”, a su vez el archivo Excel se debe encontrar en la misma carpeta que el proyecto de OPL CPLEX. Y para importar los resultados desde OPL CPLEX a Excel se utiliza el comando “SheetWrite”.

```
6 SheetConnection Sheet("Cuadrante3.xlsx");
7
8 n from SheetRead(Sheet, "n");
9
10 m from SheetRead(Sheet, "m");
11
12 cC from SheetRead(Sheet, "cC");
13
14 cD from SheetRead(Sheet, "cD");
15
16 b from SheetRead(Sheet, "b");
17
18 t from SheetRead(Sheet, "t");
19
20 N_c from SheetRead(Sheet, "N_c");
21
22 N_d from SheetRead(Sheet, "N_d");
23
24
25
26 x to SheetWrite(Sheet, "x");
27
28 y to SheetWrite(Sheet, "y");
29
30 z to SheetWrite(Sheet, "z");
31
32 FC to SheetWrite(Sheet, "FC");
33
34 FD to SheetWrite(Sheet, "FD");
```

Figura 38: "Importar y exportar datos hacia y desde un archivo Excel en OPL CPLEX"

4.4 Resultados Obtenidos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras haber implementado el modelo de optimización diseñado para ubicar casetas y drones atados en el Parque Nacional Queulat con el fin de complementar el sistema de vigilancia actual para la preservación de la flora y fauna, como a su vez la prevención de accidentes humanos.

La ejecución del modelo se realizó mediante IBM ILOG CPLEX OPL el cual identificó cuales son las ubicaciones optimas de las casetas y drones atados, para que se cubran todos los puntos al menor costo posible.

4.4.1 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 1:

De los 14 drones atados y casetas que se propuso para vigilar a los 28 puntos de riesgo que posee este cuadrante se obtuvo el siguiente resultado:

- Se instalaron 6 casetas y 5 drones atados.

- No supero la capacidad máxima de vigilancia del dron atado ni de la caseta.
- El costo total de abrir estas 11 instalaciones es de 133.390.000 pesos

Caseta	3	6	8	12	13	14
Puntos Vigilados	12, 13	4, 18, 19	3, 16	8, 26, 28	24, 27	7

Tabla 5: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 1

Dron Atado	3	6	8	12	14
Puntos Vigilados	9, 11, 15	1, 17, 25	2, 10, 14	21, 22, 23	5, 6, 20

Tabla 6: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 1

La imagen a continuación representa el resultado del modelo de optimización de la ubicación de drones atados y casetas en el Parque Nacional Queulat, en la sección del cuadrante 1.

Elementos de la imagen:

- Puntos de Riesgo: Círculos de color rojos los cuales están identificados con su respectivo número de punto de riesgo y son los puntos que requieren ser vigilados.
- Caseta de Vigilancia: Rombos de color azul los cuales están identificados con su respectivo número y son las casetas seleccionadas para vigilar a los puntos de riesgo.
- Dron Atado: Triángulos de color verde los cuales están identificados por sus respectivos números y son los drones atados seleccionados para vigilar a los puntos de riesgo
- Líneas Azules: Representa los puntos de riesgo cubiertos por la caseta.

- Líneas Verdes: Representan los ´puntos de riesgo cubierto por el dron atado.

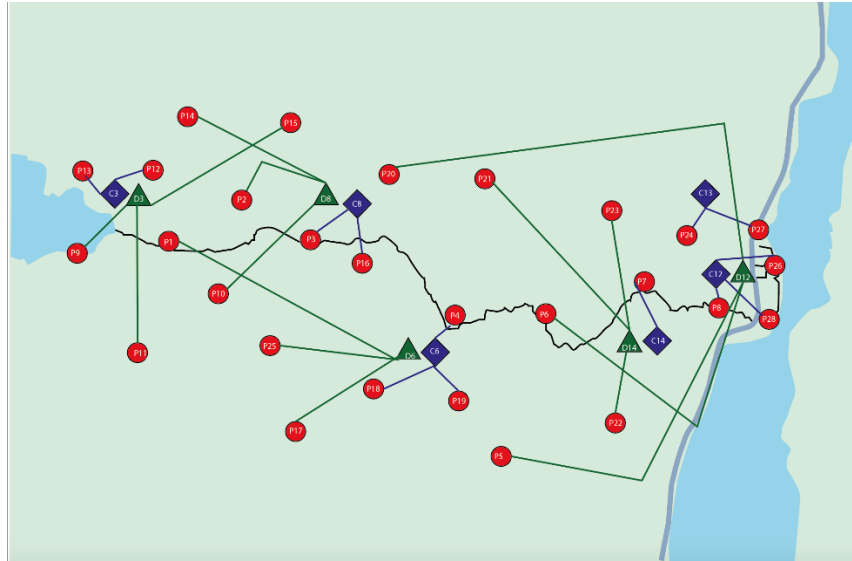


Figura 39: Mapa Cuadrante 1 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos

4.4.2 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 2:

De los 13 drones atados y casetas que se propuso para vigilar a los 27 puntos de riesgo que posee este cuadrante se obtuvo el siguiente resultado:

- Se instalaron 6 casetas y 6 drones atados.
- No supero la capacidad máxima de vigilancia del dron atado ni de la caseta.
- El costo total de abrir estas 12 instalaciones es de 155.595.000 pesos

Caseta	2	6	7	8	10	13
Puntos Vigilados	26	5	7	16, 17	15, 20, 22	11, 13

Tabla 7: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 2

Dron Atado	2	6	7	8	10	13
Puntos Vigilados	24, 25,	1, 4, 23	2, 3, 6	8, 9, 18	19, 21	10, 12, 14

Tabla 8: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 2

Elementos de la imagen:

- Puntos de Riesgo: Círculos de color rojos los cuales están identificados con su respectivo número de punto de riesgo y son los puntos que requieren ser vigilados.
- Caseta de Vigilancia: Rombos de color azul los cuales están identificados con su respectivo número y son las casetas seleccionadas para vigilar a los puntos de riesgo.
- Dron Atado: Triángulos de color verde los cuales están identificados por sus respectivos números y son los drones atados seleccionados para vigilar a los puntos de riesgo
- Líneas Azules: Representa los puntos de riesgo cubiertos por la caseta.
- Líneas Verdes: Representan los puntos de riesgo cubierto por el dron atado.

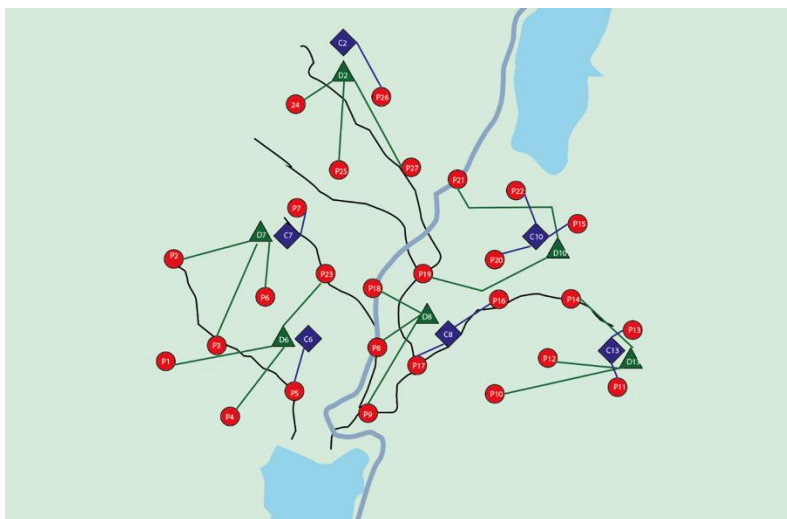


Figura 40: Mapa Cuadrante 2 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos

4.4.3 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 3:

De los 14 drones atados y casetas que se propuso para vigilar a los 30 puntos de riesgo que posee este cuadrante se obtuvo el siguiente resultado:

- Se instalaron 6 casetas y 6 drones atados.
- No supero la capacidad máxima de vigilancia del dron atado ni de la caseta.
- El costo total de abrir estas 12 instalaciones es de 145.695.000 pesos

Caseta	1	2	5	7	10	12
Puntos Vigilados	14, 16	10, 22	11, 15	9, 12	18, 25	19, 21

Tabla 9: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 3

Dron Atado	1	2	5	7	10	12
Puntos Vigilados	26, 27, 28	20, 23, 30	3, 5, 13	6, 17, 24	2, 7, 8	1, 4, 29

Tabla 10: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 3

Elementos de la imagen:

- Puntos de Riesgo: Círculos de color rojos los cuales están identificados con su respectivo número de punto de riesgo y son los puntos que requieren ser vigilados.
- Caseta de Vigilancia: Rombos de color azul los cuales están identificados con su respectivo número y son las casetas seleccionadas para vigilar a los puntos de riesgo.
- Dron Atado: Triángulos de color verde los cuales están identificados por sus respectivos números y son los drones atados seleccionados para vigilar a los puntos de riesgo
- Líneas Azules: Representa los puntos de riesgo cubiertos por la caseta.
- Líneas Verdes: Representan los puntos de riesgo cubierto por el dron atado.

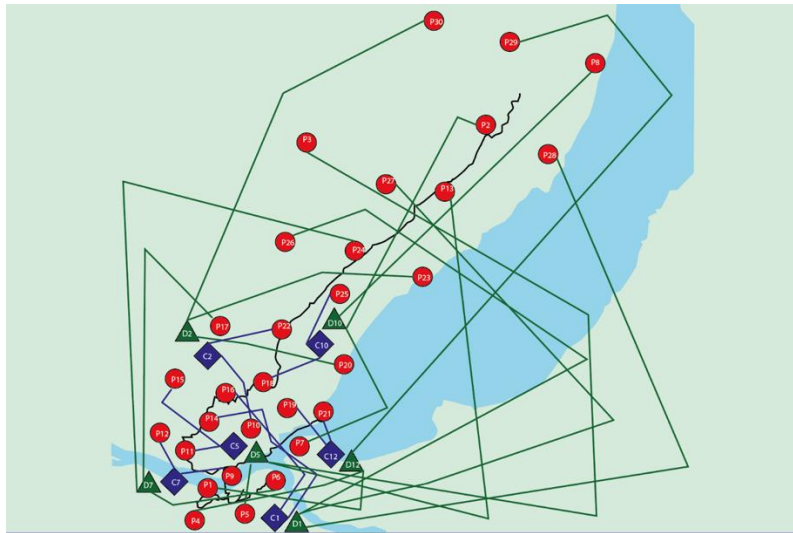


Figura 41: Mapa Cuadrante 3 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos

4.4.4 Resultado Obtenidos para el Cuadrante 4:

De los 8 drones atados y casetas que se propuso para vigilar a los 16 puntos de riesgo que posee este cuadrante se obtuvo el siguiente resultado:

- Se instalaron 3 casetas y 3 drones atados.
- No supero la capacidad máxima de vigilancia del dron atado ni de la caseta.
- El costo total de abrir estas 6 instalaciones es de 72.435.000 pesos

Caseta	6	7	8
Puntos Vigilados	4, 5, 11	12, 13, 16	10, 15

Tabla 11: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 4

Dron Atado	6	7	8
Puntos Vigilados	1, 2, 3	6, 9	7, 8, 14

Tabla 12: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 4

Elementos de la imagen:

- Puntos de Riesgo: Círculos de color rojos los cuales están identificados con su respectivo número de punto de riesgo y son los puntos que requieren ser vigilados.
- Caseta de Vigilancia: Rombos de color azul los cuales están identificados con su respectivo número y son las casetas seleccionadas para vigilar a los puntos de riesgo.
- Dron Atado: Triángulos de color verde los cuales están identificados por sus respectivos números y son los drones atados seleccionados para vigilar a los puntos de riesgo
- Líneas Azules: Representa los puntos de riesgo cubiertos por la caseta.
- Líneas Verdes: Representan los puntos de riesgo cubierto por el dron atado.

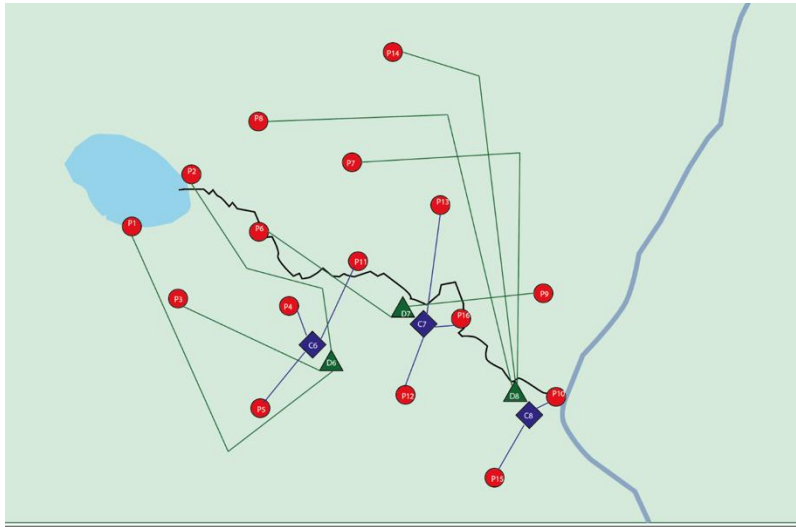


Figura 42: Mapa Cuadrante 4 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos

En conclusión, de los 49 drones atados y casetas que en un principio se ubicaron para poder cubrir los 101 puntos de riesgo a lo largo del Parque Nacional Queulat, se instalaron 21 casetas, 20 drones atados y se cubrieron ya sea por un dron atado o por una caseta los 101 puntos de riesgo que determinaron en la etapa de investigación, teniendo así un costo total de 507.115.000 pesos.

4.5 Análisis de Sensibilidad

Se realizará un análisis de sensibilidad para la capacidad máxima de vigilancia para casetas y drones atados, una vez ya implementado y validado el modelo para el cuadrante 1.

El objetivo de este análisis es evaluar cómo se comporta el modelo ante la definición del criterio de capacidad de vigilancia que poseen las casetas y drones atado, para determinar si es que esta restricción en la que incide directamente en la distribución final de la cobertura de los puntos de riesgo y que tan viable es la solución que se obtuvo.

Para poder hacer el análisis se establecieron 2 escenarios posibles en donde varían los valores de capacidad de vigilancia:

Escenario	Capacidad máxima de vigilancia de la caseta	Capacidad máxima de vigilancia del dron atado
1 (Implementado en el modelo)	3 puntos de riesgo	3 puntos de riesgo
2	2 puntos de riesgo	7 puntos de riesgo

Tabla 13: Escenarios Posibles Para el Análisis de Sensibilidad

4.5.1 Resultados Observados en el Análisis de Sensibilidad

4.5.1.1 Resultado Obtenido para el Cuadrante 1 con el Escenario Implementado

De los 14 drones atados y casetas que se propuso para vigilar a los 28 puntos de riesgo que posee este cuadrante con capacidad máxima de vigilancia para las casetas 3 puntos de riesgo y para el dron atado 3 puntos de riesgo se obtuvo el siguiente resultado:



- Se instalaron 6 casetas y 5 drones atados.

Caseta	3	6	8	12	13	14
Puntos	12, 13	4, 18,	3, 16	8, 26,	24, 27	7
Vigilados		19		28		

Tabla 14: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 1

Dron Atado	3	6	8	12	14
Puntos	9, 11, 15	1, 2, 10	14, 17, 25	21, 22, 23	5, 6, 20
Vigilados					

Tabla 15: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 1

Elementos de la imagen:

- Puntos de Riesgo: Círculos de color rojos los cuales están identificados con su respectivo número de punto de riesgo y son los puntos que requieren ser vigilados.
- Caseta de Vigilancia: Rombos de color azul los cuales están identificados con su respectivo número y son las casetas seleccionadas para vigilar a los puntos de riesgo.
- Dron Atado: Triángulos de color verde los cuales están identificados por sus respectivos números y son los drones atados seleccionados para vigilar a los puntos de riesgo
- Líneas Azules: Representa los puntos de riesgo cubiertos por la caseta.
- Líneas Verdes: Representan los puntos de riesgo cubierto por el dron atado.

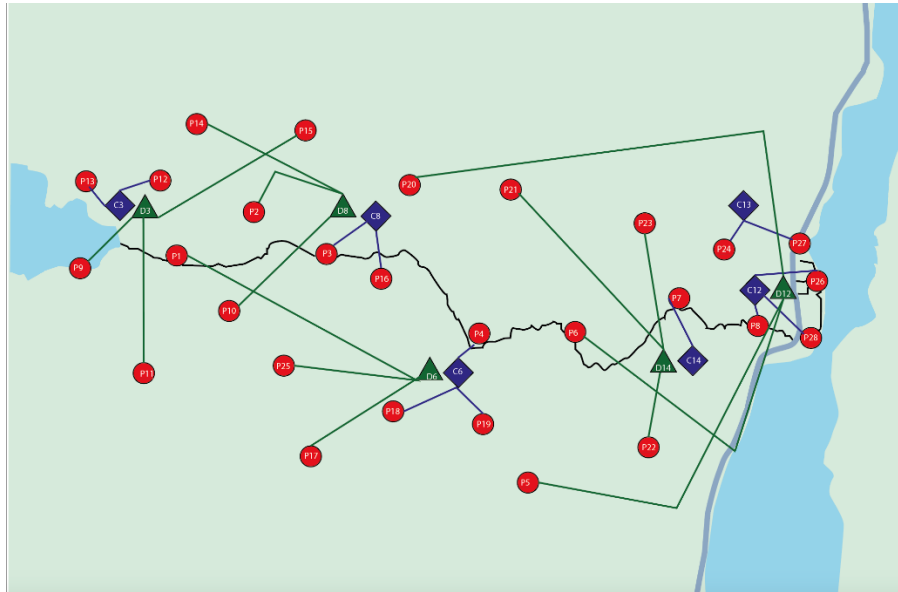


Figura 43: Mapa Cuadrante 3 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos

4.5.1.2 Resultados Obtenidos para el Cuadrante 1 con el Escenario 2

De los 14 drones atados y casetas que se propuso para vigilar a los 28 puntos de riesgo que posee este cuadrante con capacidad máxima de vigilancia para las casetas 2 puntos de riesgo y para el dron atado 7 puntos de riesgo se obtuvo el siguiente resultado:

- Se instalaron 4 casetas y 3 drones atados.

Caseta	3	6	12	14
Puntos Vigilados	12, 13	4, 19	26, 27	7

Tabla 16: Puntos Vigilados por Casetas Instaladas en el Cuadrante 1

Dron Atado	3	6	14
Puntos Vigilados	1, 2, 3, 9, 14, 15, 16	6, 10, 11, 17, 18, 20, 25	5, 8, 21, 22, 23, 24, 28

Tabla 17: Puntos Vigilados por Drones Atados Instalados en el Cuadrante 1

Elementos de la imagen:

- Puntos de Riesgo: Círculos de color rojos los cuales están identificados con su respectivo número de punto de riesgo y son los puntos que requieren ser vigilados.
- Caseta de Vigilancia: Rombos de color azul los cuales están identificados con su respectivo número y son las casetas seleccionadas para vigilar a los puntos de riesgo.
- Dron Atado: Triángulos de color verde los cuales están identificados por sus respectivos números y son los drones atados seleccionados para vigilar a los puntos de riesgo.
- Líneas Azules: Representa los puntos de riesgo cubiertos por la caseta.
- Líneas Verdes: Representan los puntos de riesgo cubierto por el dron atado.

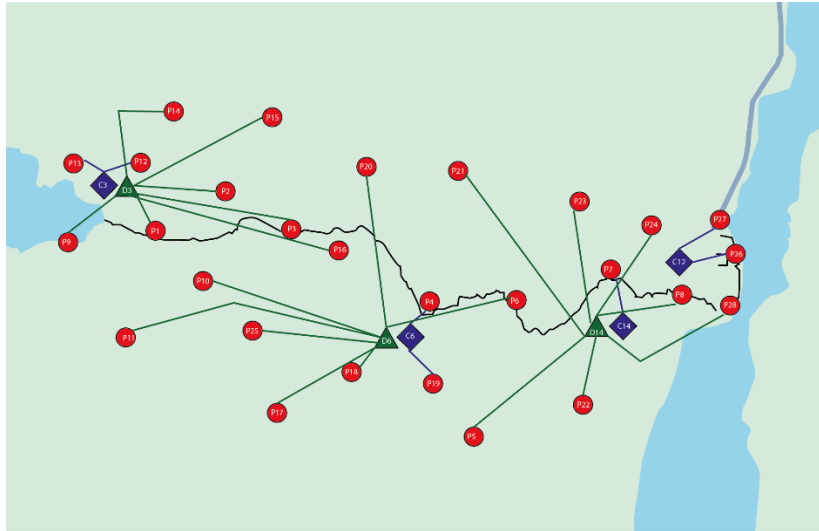


Figura 44: Mapa Cuadrante 3 Con Casetas y Drones Atados Instalados, y Todos los Puntos Cubiertos

4.5.2 Resultados Observados en el Análisis de Sensibilidad

Se pudo observar que cuando se aplica el escenario 2, donde se aumenta la capacidad de vigilancia de los drones atados y a su vez se disminuye la capacidad máxima de vigilancia de las casetas, el modelo logra cumplir con el objetivo de cubrir todos los puntos de riesgo, instalando la menor cantidad de casetas y drones atados que en el escenario base. Esto también implica una reducción de costos de instalación.



Sin embargo, el escenario genera una clara sobrecarga de vigilancia en los drones atados, en donde le asigna el máximo de vigilancia a cada uno de estos. Si bien se encuentra dentro de los rangos que se le asigno al modelo, esto resulta poco viable operativamente.

Estos resultados demuestran la importancia de establecer un rango adecuado para la capacidad máxima de vigilancia de los drones atados y casetas, ya que esto permite equilibrar la vigilancia de los puntos de riesgo con los recursos disponibles.



5 Conclusión

En este trabajo de título aborda una problemática de gran relevancia para la gestión de los parques nacionales: la vigilancia en las zonas de preservación del Parque Nacional Queulat. El objetivo de este proyecto fue plantear un sistema integrado de vigilancia, a través del diseño y aplicación de un modelo de optimización combinado que contempla el problema de cubrimiento conjunto y de localización, para determinar cuáles eran las ubicaciones en las que se debían instalar las casetas y drones atados, que permitirían realizar la cobertura de los puntos de riesgo minimizando el costo de instalación.

Dentro de los principales resultados se puede concluir lo siguiente:

- Se logró establecer la mínima cantidad de casetas y drones atados necesario para cubrir los 101 puntos de riesgo que tiene el Parque Nacional Queulat.
- La importancia de determinar la restricción de capacidad de vigilancia en distancia y en cantidad de puntos que puede cubrir cada dron atado y caseta, lo que permitió que fuera una cobertura real sin sobrecargar los recursos, aplicables y una distribución equilibrada según las condiciones geográficas del parque.
- La toma de datos reales de distancia medidos con la herramienta Google My Maps, permitió que el modelo tenga precisión y se pueda aplicar en el Parque Nacional Queulat.
- La incorporación de la tecnología más el modelo matemático diseñado para la gestión de vigilancia de los parques nacionales, perfecciona la capacidad de vigilancia para disminuir los desastres naturales provocados por el ser humano, y también ayuda a la preservación de la flora y fauna evitando accidentes. Asimismo, mejora el trabajo de los encargados de la seguridad del parque para ubicar a las personas que se desvían de los senderos habilitados las cuales al no poder regresar muchas veces terminan en una tragedia.



- Si bien, el modelo en términos matemáticos e ilustrativos se puede efectuar, su implementación puede verse afectada por las condiciones climáticas y geográficas que posee la Región de Aysén.
- No se incluyen más medidas o restricciones a los drones atados, debido a que actualmente no están regulados bajo el nombre de dron atado, lo que determina que se le considere como un dron tradicional. Este tipo de dron necesita un permiso especial para realizar vuelos en áreas protegidas de acuerdo con las limitaciones reguladas por la Dirección de Aeronáutica Civil.

En conclusión, el desarrollo de este trabajo de título demuestra que el uso de un modelo de optimización combinada utilizando tecnologías innovadoras puede generar soluciones eficientes y realizables. Además, la complementación al sistema de vigilancia actual con casetas y drones atados permitiría mejorar la gestión de las áreas protegidas, reduciendo los costos y maximizando la seguridad tanto para el ecosistema como para las personas que visitan el Parque Nacional Queulat.



6 Referencias Bibliográficas

1. CONAF.(s/f).Conaf.cl.<https://www.conaf.cl/parques-nacionales/visitanos/normas-y-recomendaciones/>
2. Jimenez, T. (s/f). “En Chile la mayoría de los incendios son por causa humana”. <https://agronomia.uc.cl/noticias/en-chile-la-mayoria-de-los-incendios-son-por-causa-humana>
3. Carrillo, A. (2022, enero 26). “Expertos entregan consejos para practicar senderismo y montañismo”. Diario Sustentable. <https://www.diariosustentable.com/2022/01/expertos-entregan-consejos-para-practicar-senderismo-y-montanismo/>
4. CONAF.(s/f).Conaf.cl. <https://www.conaf.cl/parques-nacionales/parques-de-chile/>
5. Cómo se administra el SNASPE? (s/f). Sistema Nacional de Áreas Silvestres del Estado. <https://www.parquesnacionales.cl/como-se-administra-el-snaspe/>
6. Martínez, R. (2019, febrero 27). “Fiscalización con drones en CONAF”
7. Franco, M. E. (2022, octubre 20). Drones para salvar la Amazonía: “La tecnología empodera a las comunidades indígenas para defender sus tierras”. <https://www.telemundo.com/noticias/noticias-telemundo/medio-ambiente/desforestacion-amazonia-drones-tecnologia-rcna53189>
8. El Mercurio S. A., P. (2017, mayo 25). “El 67% de los senderistas de montaña de hasta 28 años muere por extravío y malas condiciones climáticas.” Emol. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2017/05/25/860020/EI-67-de-los-senderistas-de-montana-muere-por-extravio-y-malas-condiciones-climaticas.html>
9. (Mellado, Munita. (2022, noviembre 23). Baja inversión en Parques Nacionales: “Expertos entran al debate abierto por paro de guardaparques y urgen por más recursos” .Emol). <https://www.emol.com/noticias/Economia/2022/11/23/1079114/areas-silvestres.html>



10. Tipos de drones.(2021, Enero 4). Novodrone.
<https://novodrone.com/tipos-de-drones/>
11. Normativa DAN 91 y DAN 151, (2012-2022). Direccion de Aeronautica Civil.
<https://www.dgac.gob.cl/normativa/reglamentacion-aeronautica/normas-dan/>
12. Jesús, M., Patricia, G.-L., & Román, R. (n.d.). Tema 8: Programación No Lineal. Ugr.Es. https://www.ugr.es/~proman/IO1Grado/PDF/Tema_8.pdf
13. Enago Academy. (2021, octubre 21). “¿Cómo elegir la mejor metodología de investigación para su estudio?”. Enago Academy Spanish.
<https://www.enago.com/es/academy/choose-best-research-methodology/>
14. Asana. (s/f). “El diagrama de PERT: qué es y cómo crearlo (incluye ejemplos)”. Asana. <https://asana.com/es/resources/pert-chart>
15. “Cómo determinar objetivos de ahorro con el método SMART”.(2020, 8 de diciembre).Raisin <https://www.raisin.es/ahorro/metodos-ahorro/metodo-smart/>
16. Parque Nacional Queulat. (2018, junio 10). La Ruta de los Parques.
<https://www.rutadelosparques.org/parque-nacional-queulat/>
17. Python: qué es, para qué sirve y cómo se programa. (2020, Octubre 8). aula21 | Formación para la Industria; aula21. <https://www.cursosaula21.com/que-es-python/>
18. Tareas básicas en Excel. (s/f). Microsoft.com
<https://support.microsoft.com/es-es/office/tareas-b%C3%A1sicas-en-excel-dc775dd1-fa52-430f-9c3c-d998d1735fca>
19. Tethered drones and remotely piloted aircraft. (s/f.). Caa.co.uk.
<https://www.caa.co.uk/drones/rules-and-categories-of-drone-flying/tethered-drones-and-remotely-piloted-aircraft/>
20. Sistema de drones atados CETC. (s/f). China Military Drone Alliance.
<https://es.militarydrones.org.cn/cetc-tethered-drone-system-p00216p1.html>
21. Otto, A., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). “Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective”
22. Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles(UAVs): A survey.



23. Cabrera, Diaz. (s/f). "Manual de Uso de Jupyter Notebook".
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/48304/1/ManualJupyter.pdf>
24. Yosoytuprofe, A. (2016, junio 3). Sistema de ecuaciones.
<https://yosoytuprofe.20minutos.es/2016/06/03/sistema-de-ecuaciones/>
25. Sistema de ecuaciones lineales. (2011). "Introducción al álgebra"
<https://www.matesfacil.com/ESO/Ecuaciones/no-lineales/sistema-ecuaciones-ejemplos-explicados.html>
26. Matriz Booleana. (s/f). Wikidat.com.
<https://es.wikidat.com/info/matriz-booleana>
25. Microsoft. (2025). Microsoft Excel: A powerful spreadsheet tool.
<https://www.microsoft.com/excel>
26. IBM. (2025). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Overview*.
<https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>
27. Google Crisis Response. (s/f). Respuesta A Emergencias de Google.
<https://crisisresponse.google/intl/es/my-maps/#:-:text=Desde%20su%20lanzamiento%20en%202007,con%20texto%2C%20fotos%20y%20v%C3%ADdeos>
28. Niño-Vargas, Lamos-Diaz (2014, 4 de diciembre). "Modelo matemático para determinar la ubicación de Centros de Distribución en un contexto real"
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4974566.pdf>
29. Delgado-Ávila, Ramírez-Melo, Montufar-Benítez. (2021, 5 de julio). "Un Modelo de Cobertura de Conjuntos Modificado para la Ubicación de Centros de Distribución: Un Estudio de Caso en México"
<https://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5952727018/html/>
30. García. (s/f). "Modelado mediante Optimización Combinatoria"
<https://personales.upv.es/jpgarcia/LinkedDocuments/MCOIOptimizacionCombinatoria.pdf>

7 Anexos

7.1 Anexo 1 “Matrices de Distancia y Matrices Binarias en Cada Cuadrante”

- Cuadrante 1:

Cuadrante 1: Matriz distancia en metros														
Puntos	Posible Ubicación de Caseta y Dron Atado													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	852	736	504	359	874	853	1920	1650	2360	1950	2340	3340	3220	3050
2	807	695	931	831	476	430	1640	1170	1820	1450	1850	2940	2800	2580
3	924	788	1250	1150	288	310	1520	944	1510	1140	1600	2580	2480	2240
4	1410	1760	2220	2050	1050	864	993	256	1060	402	638	1670	1710	1250
5	1720	2520	2840	2570	1940	1550	627	794	1800	1180	383	1750	2060	1270
6	1930	2180	2720	2590	1580	1420	1330	742	957	412	522	1180	1260	746
7	2530	2570	3250	3160	2130	2030	1940	1390	920	918	1010	523	658	341
8	2990	3100	3730	3640	2590	2490	2300	1810	1370	1380	1240	139	714	402
9	2980	1150	424	234	1440	1380	2280	2140	2860	2400	2780	3830	3840	3550
10	460	950	943	647	844	508	1450	1240	2130	1670	1920	3050	2980	2710
11	566	1520	1050	600	1500	1160	1650	1720	1780	2250	2370	3670	3890	3230
12	1227	493	306	577	947	1160	2280	1930	1770	2140	2590	3580	3400	3240
13	1420	882	167	595	1350	1440	2520	2250	2740	2490	2920	3940	3770	3620
14	1550	295	647	981	890	1300	2450	1980	2210	2080	2630	3400	3160	3180
15	1530	317	1180	1340	336	959	2180	1570	1600	1500	2140	2870	2600	2540
16	789	1250	1580	1370	746	275	996	582	1490	931	1190	2370	2420	1980
17	518	1820	1840	1440	1460	844	614	935	2190	2560	2380	2790	2900	2340
18	864	1760	2000	1730	1250	741	509	384	1650	1040	881	2280	2400	1810
19	1380	2070	2400	2170	1510	1100	609	346	1540	848	431	1810	2010	1320
20	1480	968	1700	1720	491	830	1800	1050	962	863	1520	2220	1960	1970
21	1910	1560	2260	2260	1050	1260	1860	1100	394	489	1270	1680	1390	1420
22	2380	2800	3350	3080	2330	2090	1390	1290	1620	1190	622	993	1430	525
23	2480	2320	3010	2960	1790	1870	2090	1380	472	728	1200	876	568	862
24	2860	2780	3480	3390	2260	2270	2300	1720	937	1140	1360	461	358	615
25	313	1260	1340	1030	928	403	1040	876	1970	1440	1570	2830	2860	2390
26	3320	3250	3940	3900	2820	2820	2680	2140	1460	1650	1670	234	537	712
27	3290	3200	3910	3840	2730	2780	2620	2070	1230	1450	1620	346	388	755
28	3230	3420	4040	3920	2870	2750	2480	2120	1640	1630	1540	358	915	606

Tabla 18: Matriz Distancia (m) Cuadrante 1



Cuadrante 1: Matriz Binaria Vigilancia Caseta														
Puntos	Ubicación de Posible Caseta													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Tabla 19: Matriz Binaria Vigilancia Caseta Cuadrante 1



Cuadrante 1: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado														
Puntos	Posible Dron Atado													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
4	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
5	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
6	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
9	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
12	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
13	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
15	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
16	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
18	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1
19	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
21	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
22	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
23	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
24	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
25	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
27	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1

Tabla 20: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 1



- Cuadrante 2:

Cuadrante 2: Matriz distancia en metros													
Puntos	Posible Ubicación de Dron Atado y Caseta												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	842	5050	5210	6040	3770	1930	2650	4330	4000	6100	5770	2660	7010
2	1020	3800	4590	6140	3170	2320	1800	4200	4360	5580	5490	3190	7000
3	1360	4440	4360	5220	2950	1080	1860	3490	3220	5230	4880	1980	6200
4	2090	5230	4710	4970	3420	1170	2600	3430	2680	5410	4910	1450	5970
5	2760	4660	3730	3940	2540	515	2160	2380	1890	4440	3820	619	4960
6	2070	3390	3360	4620	1930	1060	810	2760	2370	4290	4020	1990	5460
7	3010	1980	2590	4730	1460	2200	504	2930	3590	3710	3800	3050	5280
8	3840	4090	2340	2710	1590	1450	1990	998	1120	2960	2420	1380	3620
9	3880	4910	3280	2830	2500	1440	2720	1680	708	3680	4180	883	2970
10	5750	5220	2660	864	2920	2360	3880	1370	1330	2560	1480	2710	1870
11	7610	6200	3430	1070	4250	5120	5480	2850	3310	2720	1810	4620	528
12	6050	5150	2410	665	3150	4080	4440	1860	2330	1870	821	3640	1030
13	7640	5430	2980	1480	4050	5160	5450	2810	3470	2140	1540	4880	286
14	6710	4660	1950	1530	3080	4440	4410	2000	3010	1160	642	4220	1140
15	6980	4150	1630	2680	3120	4720	4430	2620	3890	679	1250	4930	1910
16	5200	3170	1330	1790	1730	2910	2830	548	2070	1470	983	2870	2420
17	4490	4570	2440	2130	1980	2000	2710	780	765	2860	1960	1740	3090
18	3670	3210	1940	3270	822	1640	1400	1320	2210	2720	2350	1990	3970
19	4440	2830	1370	2610	944	2410	1980	893	2220	1840	1760	1820	3270
20	5680	3470	780	2350	1860	3780	3330	1280	2810	766	813	3490	2270
21	5340	2430	312	3670	1490	3580	2690	1950	3490	1270	1990	3930	3250
22	6170	3150	814	3030	2170	4410	3450	2150	3600	513	1540	4370	2820
23	3050	2910	2390	3920	847	1380	806	1860	2520	3300	3200	2030	4530
24	4020	890	2160	5860	2580	3860	2210	4060	5070	4090	4670	4610	6050
25	3770	1440	2140	4830	1260	2960	1830	3260	3990	3220	3590	3670	5050
26	5030	641	2200	5120	1980	4120	2610	3600	5230	3710	3880	4830	5100
27	4750	1690	1070	4040	1210	3340	2220	2500	3910	2230	2640	3920	4270

Tabla 21: Matriz Distancia (m) Cuadrante 2



Cuadrante 2: Matriz Binaria Vigilancia Caseta													
Puntos	Posible Ubicación de la Caseta												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
21	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 22: Matriz Binaria Vigilancia Caseta Cuadrante 2



Cuadrante 2: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado													
Puntos	Posible Ubicación de Dron Atado												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
7	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0
9	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
10	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
14	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
16	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
17	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
18	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0
19	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
20	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
21	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0
22	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
23	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 23: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 2



- Cuadrante 3:

Cuadrante 3: Matriz distancia en metros														
Puntos	Posible Ubicación de Caseta y Dron Atado													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	114	591	1850	1180	183	372	98	673	843	756	1320	488	1800	2190
2	1880	1570	243	762	1780	1820	2020	1540	1240	1190	804	1520	240	301
3	1520	1070	552	994	1370	1290	1550	1100	714	1010	215	1270	801	1010
4	264	712	2030	1320	421	528	121	626	1050	920	1520	609	2350	1960
5	232	757	1940	1240	425	585	292	556	982	790	1020	780	2270	1850
6	226	641	1770	1030	386	574	488	416	803	617	1230	247	2020	1590
7	315	521	1530	829	355	527	503	285	665	423	1090	73	1840	1460
8	2360	2080	776	1290	2270	2320	2520	1990	1760	1690	1350	2040	370	681
9	114	408	1750	1080	386	404	198	371	827	552	1290	369	2130	1740
10	257	373	1540	864	170	340	433	148	668	441	1050	239	1950	1540
11	180	506	1820	1170	166	272	119	405	747	726	1290	501	2150	1810
12	353	418	1880	1160	255	142	224	448	730	787	1260	638	2220	1850
13	1520	1220	391	420	1450	1510	1710	1180	918	876	599	1160	598	249
14	275	305	1690	1010	115	164	262	273	608	576	1080	456	2010	1660
15	510	273	1560	997	329	183	527	406	480	611	967	624	1970	1590
16	365	212	1450	824	298	230	431	151	454	507	957	418	1880	1520
17	556	186	1320	578	477	418	640	265	726	767	805	550	1730	1420
18	485	234	1330	792	412	404	585	134	421	239	853	331	1730	1350
19	401	344	1360	704	321	747	529	123	572	297	965	226	1340	1770
20	713	594	1080	376	629	767	418	395	503	177	794	396	1030	1420
21	494	553	1370	634	492	656	702	321	605	222	941	172	1190	1620
22	517	309	1180	541	456	567	720	252	296	173	405	453	1180	1580
23	1140	979	704	229	1110	1270	1380	907	745	592	654	900	493	921
24	918	728	716	156	942	1010	1200	688	477	427	734	811	708	1130
25	756	548	886	260	749	876	991	515	378	235	498	650	901	1270
26	869	561	833	429	855	868	1120	663	297	430	257	844	945	1230
27	1280	1120	437	341	1280	1330	1520	1030	744	719	369	1080	459	728
28	1840	1710	504	873	1860	1920	2110	1600	1400	1280	1050	1590	212	430
29	2180	1840	415	1090	2080	2150	2320	1830	1550	1520	1060	1090	539	140
30	2130	1710	362	1010	1990	1970	2240	1760	1400	1480	922	1830	725	408

Tabla 24: Matriz Distancia (m) Cuadrante 3



Cuadrante 3: Matriz Binaria Vigilancia Caseta														
Puntos	Posible Ubicación de Caseta													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
10	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
11	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
15	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
17	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
18	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
19	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
20	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
22	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
23	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
27	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
30	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 25: Matriz Binaria Vigilancia Caseta Cuadrante 3



Cuadrante 3: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado														
Puntos	Posible Ubicación del Dron Atado													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
2	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
4	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
5	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
6	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
7	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
8	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
9	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
10	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
11	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
12	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
13	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
14	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
15	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
16	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
17	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
18	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1
19	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
20	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1
22	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
23	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
27	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
29	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
30	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 26: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 3



- Cuadrante 4:

Cuadrante 4: Matriz distancia en metros								
Puntos	Posible Ubicación de Caseta y Dron Atado							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	222	460	1370	729	650	800	1060	1550
2	101	440	1130	491	431	737	909	1480
3	329	230	1330	810	614	538	851	1290
4	482	222	1010	754	435	155	446	969
5	707	398	1290	1080	771	303	653	1030
6	231	210	936	522	266	496	619	1200
7	584	542	585	364	169	643	522	1070
8	358	587	942	250	276	778	819	1400
9	1260	1100	563	1160	882	810	451	429
10	1420	1220	939	1470	1140	878	599	118
11	625	426	689	678	334	314	273	847
12	1010	676	986	1130	814	340	333	516
13	860	762	372	700	491	657	300	775
14	850	961	516	339	518	1010	836	1270
15	1360	1120	1150	1480	1170	746	634	306
16	1010	806	588	995	702	488	212	462

Tabla 27: Matriz Distancia (m) Cuadrante 4

Cuadrante 4: Matriz Binaria Vigilancia Caseta								
Puntos	Posible Ubicación de la Caseta							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	1	0	0
5	0	1	0	0	0	1	0	0
6	1	1	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	1	1	0	0	0
8	1	0	0	1	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	1	1	1	0
12	0	0	0	0	0	1	1	0
13	0	0	1	0	0	0	1	0
14	0	0	0	1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0	1	0

Tabla 28: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 4



Cuadrante 4: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado								
Puntos	Posible Ubicación del Dron Atado							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1
4	1	0	1	1	1	0	1	1
5	1	0	1	1	1	0	1	1
6	0	0	1	1	0	1	1	1
7	1	1	1	0	0	1	1	1
8	0	1	1	0	0	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	0
11	1	1	1	1	0	0	0	1
12	1	1	1	1	1	0	0	1
13	1	1	0	1	1	1	0	1
14	1	1	1	0	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	0
16	1	1	1	1	1	1	0	1

Tabla 29: Matriz Binaria Vigilancia Dron Atado Cuadrante 4

7.2 Anexo 2 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 1”

Caseta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Puntos Cubiertos	25	14, 15	12, 13	1, 9	3, 15	3, 16	---	4, 18, 19	21	---	5	8, 26, 27, 28	24, 27	7

Tabla 30: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante 1



Dron Atado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Puntos	1, 2,	1, 2,	1, 2,	2, 3,	1, 2,	1, 2,	1,	1,	2,	1,	2,	4,	4,	4,
Cubiertos	3, 4,	3, 4,	3,	10,	4, 5,	4, 5,	2,	2,	3,	2,	3,	5,	6,	5,
	5,	9,	9,	11,	6,	6,	3,	3,	4,	3,	4,	6,	7,	6,
	6,	10,	10,	12,	9,	9,	4,	5,	5,	4,	6,	7,	8,	8,
	10,	11,	11,	13,	10,	10,	5,	6,	6,	5,	7,	19,	20,	16,
	11,	12,	14,	14,	11,	11,	6,	7,	7,	6,	8,	21,	21,	18,
	12,	13,	15,	15,	12,	12,	7,	8,	8,	7,	10,	22,	22,	19,
	13,	16,	16,	16,	13,	13,	10,	10,	11,	8,	16,	23,	23,	20,
	14,	17,	17,	17,	14,	14,	11,	11,	12,	10,	18,	24	26,	21,
	15,	18,	18,	18,	16,	15,	16,	12,	15,	15,	19,		28	22,
	16,	20,	20,	20,	17,	17,	17,	14,	16,	16,	20,			23,
	17,	21,	25	25	18,	18,	18,	15,	17,	18,	21,			24,
	18,	25			19,	19,	19,	16,	18,	19,	22,			25,
	19,				20,	20,	20,	17,	19,	20,	23,			26,
	20,				21,	21,	21,	20,	20,	21,	24,			27,
	21				23,	23,	22,	21,	22,	22,	25,			28
					25	25	25	22,	23,	23,	26,			
								23,	24,	24,	27,			
								24,	25,	25,	28			
								25	26,	26,				
									27,	27,				
									28	28				

Tabla 31: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 1

7.3 Anexo 3 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 2”

Caseta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Puntos Cubiertos	---	26	20, 21	12	---	5	7	16, 17	9, 17	15, 20, 22	14	5	11, 13

Tabla 32: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante



Dron Atado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Puntos Cubiertos	1,	7,	14,	10,	6,	1,	2,	8,	5,	12,	10,	3,	10,
	2,	24,	15,	11,	7,	3,	3,	9,	8,	14,	11,	4,	12,
	3	25,	16,	13,	8	4,	6,	10,	10	16,	12,	6,	14,
		27	18,	14,		6,	8,	12,		19,	13,	8,	15
			19,	16		8,	18,	14,		21	15,	9,	
			22,			9,	19,	18,			16,	17,	
			27			17,	20,	19,			17,	18,	
						18,	21,	20,			19,	19	
						23	23	21,			20,		
								23			21,		
											22		

Tabla 33: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 2

7.4 Anexo 4 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 3”

Caseta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Puntos Cubiertos	1,	10,	2,	20,	1,	1,	1,	7,	22,	18,	3,	6,	2,	2,
	4, 5,	14,	13,	23,	6,	10,	4,	9,	25,	19,	26,	7,	8,	13,
	6,	15,	30	24,	7,	11,	5,	10,	26	20,	27	9,	28	29
	7,	16,		25,	9,	12,	9,	14,		21,		10,		
	9,	17,		27	10,	14,	11,	16,		22,		18,		
	10,	18,			11,	15,	12,	17,		25		19,		
	11,	19,			12,	16	14	18,				20,		
	12,	22			14,			19,				21		
	14,				15,			20,						
	16				16,			21,						
					18			22						

Tabla 34: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante 3



Dron Atado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Puntos	2, 3,	1, 2,	1, 3,	1,	2,	2,	3,	1,	1	1,	1,	1,	1,	3,
Cubiertos	13,	3, 4,	5,	2, 3,	3,	3,	6,	2,	2,	2,	2,	2,	3,	4,
	15,	5,	6,	4, 5,	4, 5,	4,	7,	3,	3,	3,	4,	3,	7,	5,
	17,	6,	7,	6,	13,	6,	10,	4,	4,	4,	5,	4,	10,	6,
	18,	7,	8,	7,	17,	7,	13,	5,	5,	5,	6,	5,	13,	7,
	19,	9,	9,	8,	18,	9,	15,	6,	6,	6,	7,	11,	14,	8,
	20,	11,	10,	9,	20,	13,	16,	8,	7,	7,	8,	12,	15,	9,
	21,	12,	11,	10,	21,	17,	17,	11,	8,	8,	9,	13,	16,	10,
	22,	13,	12,	11,	22,	18,	18,	12,	9,	9,	10,	14,	17,	11,
	23,	20,	14,	12,	23,	19,	19,	13,	10,	10,	11,	15,	18,	12,
	24,	21,	15,	13,	24,	20,	20,	15,	11,	11,	12,	16,	19,	14,
	25,	23,	16,	14,	25,	21,	21,	23,	12,	12,	13,	17,	20,	15,
	26,	24,	17,	15,	26,	22,	22,	24,	13,	13,	14,	22,	21,	16,
	27,	25,	18,	16,	27,	23,	23,	25,	14,	14,	15,	23,	22,	17,
	28	26,	19,	17,	28,	24,	24,	26,	15,	15,	16,	24,	23,	18,
		27,	20,	18,	29,	25,	25,	27,	16,	16,	17,	25,	24,	19,
		28,	21,	20,	30	26,	26,	28,	17,	17,	18,	26,	25,	20,
		29,	23,	21,		27,	27	29,	18,	23,	19,	27,	26,	21,
		30	24,	22,		28,		30	19,	24,	20,	28,	27,	22,
			25,	26,		30			20,	26,	21,	29,	29,	23,
			26,	28,					21,	27,	22,	30	30	24,
			27,	29,					23,	28,	23,			25,
			28,	30					24,	29,	24,			26,
			29						27,	30	25,			27,
									28,		28,			28,
									29,		29,			30
									30		30			

Tabla 35: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 3

7.5 Anexo 5 “Puntos de Riesgo Cubiertos por cada Caseta y Dron Atado en El Cuadrante 4”

Caseta	1	2	3	4	5	6	7	8
Puntos de Riesgo	1,	3,	13	7,	6,	4,	11,	10,
	2,	4,		8,	7,	5,	12,	15
	3,	5,		14	8	11,	13,	
	6,	6				12	16	
	8							

Tabla 36: Puntos de riesgo cubiertos por cada caseta en el cuadrante 4



Dron Atado	1	2	3	4	5	6	7	8
Puntos de Riesgo	4,	1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,
	5,	2,	2,	2,	2,	2,	2,	2,
	7,	7,	3,	3,	3,	3,	3,	3,
	9,	8,	4,	4,	4,	6,	4,	4,
	10,	9,	5,	5,	5,	7,	5,	5,
	11,	10,	6,	6,	9,	8,	6,	6,
	12,	11,	7,	9,	10,	9,	7,	7,
	13,	12,	8,	10,	12,	10,	8,	8,
	14,	13,	9,	11,	13,	13,	9,	9,
	15,	14,	10,	12,	14,	14,	10,	11,
	16	15,	11,	13,	15,	15,	14,	12,
		16	12,	15,	16	16	15	13,
			14,	16				14,
			15,					16
			16					

Tabla 37: Puntos de Riesgo Cubiertos por cada dron atado en el Cuadrante 4