

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Diseño de modelos logísticos para trasportar muestras de sangre mediante el uso de drones**

**Roland Ruiz Fagua**

**Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2022**



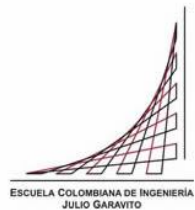
**Diseño de modelos logísticos para transportar muestras de sangre mediante el uso de drones**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Tránsito y Transporte**

**Maritza Cecilia Villamizar Ropero**

**Director**

**Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2022**



La tesis de maestría titulada “Diseño de modelos logísticos para transportar muestras de sangre mediante el uso de drones”, presentada por Roland Ruiz Fagua, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

Director de la tesis



Maritza Cecilia Villamizar Ropero



Jurado

José Ignacio Nieto García



Jurado

Mónica Marcela Suárez Pradilla

Bogotá, D.C., enero 31 de 2023.

Dedicado a

Mi mamá Jeannette, mi papá Alfonso, mi novia Fiorella; a mi familia, Maribel, Juliana y Victoria. El resultado de años de estudio e investigación, como motivación a la academia, a los temas que nos apasionan y aportan un cambio, bienestar a la sociedad, crecimiento personal y profesional.

Los sueños saben el camino...solo síguelos.

Agradecimientos a

Mi familia por el apoyo incondicional, a mis amigos y colegas que me escucharon, aconsejaron y alentaron a desarrollar este documento. A la Escuela Colombiana de Ingeniería por impulsar mi espíritu investigativo. A mi directora y profesores por transmitirme nuevos aprendizajes y conocimientos cada día.

## **Abstract**

Around two billion people worldwide (25% of the total population) lack access to essential medical products, such as blood or vaccines, due to a lack of infrastructure or adverse topographical conditions (World Health Organization, 2004). In Colombia, the low accessibility to health services is due, amongst other causes, to the difficulty of mobilization to service centers, the system's coverage, and the population's socioeconomic conditions. This paper evaluates a logistic operation for transporting blood samples to increase the range and accessibility to clinical analysis facilities, decreasing associated travel times and costs. As a result, a 2-stage model is obtained, evaluated at a strategic and tactical-operational level, and simulated in the departments of Guainía and Valle del Cauca, with an estimated cost per sample of \$46,718 COP for the mobilization of specimens in rural areas without service and road infrastructure, and a cost per sample of \$1,764 COP for rural areas with a higher level of development. These indicators were defined based on the resolution of problems related to service areas, location, allocation, and routing of vehicles. The conclusion is a decrease in the costs associated with transportation, increased accessibility, coverage, and feasibility of implementing logistics operations with drones in the short or medium term.

Keywords: Drone, Drone Logistics, Health Access and Coverage, Location-allocation problem with drones, UAVs, Unmanned Aircraft System Traffic Management UTM, Vehicle routing problem with Drones VRP-D.

## **Resumen**

A nivel mundial, alrededor de dos mil millones de personas (25% del total de la población) carecen de acceso a productos médicos esenciales, como sangre o vacunas, por falta de infraestructura o condiciones topográficas adversas (World Health Organization, 2004). En Colombia, la baja accesibilidad a los servicios de salud se debe, entre otras causas, a la dificultad de movilización hacia los centros de servicio, la cobertura del sistema y las condiciones socioeconómicas de la población. El presente documento evalúa una operación logística para el transporte de muestras de sangre con el fin de aumentar la cobertura y accesibilidad a las instalaciones de análisis clínico, disminuyendo los tiempos y costos de viaje asociados. Como resultado, se obtiene un modelo de 2 etapas, evaluado a nivel estratégico y táctico-operativo, simulado en los departamentos de Guainía y Valle del Cauca, con un costo estimado por muestra de \$46.718 COP para la movilización de ejemplares en áreas rurales sin infraestructura de servicios y vial, y un costo por muestra de \$1.764 COP para áreas rurales con un mayor nivel desarrollo. Estos indicadores se definieron a partir de la resolución de problemas de relacionados con áreas de servicio, localización, asignación y ruteo de vehículos. Se concluye una disminución de los costos asociados al transporte, el aumento de la accesibilidad, cobertura y viabilidad de implementar las operaciones logísticas con drones en el corto o mediano plazo.

Palabras Clave: Acceso y cobertura a la salud, Drones, Gestión del tráfico de sistemas de aeronaves no tripuladas UTM, Logística de Drones, Problema de localización - asignación con drones, UAVs, Problema de ruteo de vehículos con drones VRP-D.

## Índice General

Capitulo I Introducción .....	13
Capitulo II Problema de Investigación.....	15
2.1    Pregunta de Investigación .....	15
2.2    Descripción del Problema .....	15
2.3    Importancia, relevancia y pertinencia del proyecto para la maestría .....	15
2.4    Diagnostico general del problema.....	16
Capitulo III Objetivos .....	17
3.1    Objetivo general:.....	17
3.2    Objetivos específicos: .....	17
Capitulo IV Estado del arte.....	18
4.1    Drones y operación del espacio aéreo.....	18
4.1.1    Operación del espacio aéreo .....	18
4.1.2    UTM.....	18
4.2    Transporte de muestras de sangre.....	20
4.2.1    Calidad de las muestras de sangre.....	20
4.2.2    Modelos de transporte con drones.....	21
4.2.3    Problemas logísticos en la resolución del transporte de mercancías con drones .....	23
4.2.4    Principios para una buena programación y diseño de rutas .....	25
Capitulo V Marco Teórico .....	26
5.1    Redes de grafos .....	26
5.1.1    Operaciones y logística del transporte .....	26
5.2    Drones .....	29
5.2.1    Tecnologías esenciales.....	29
5.2.2    Aspectos fundamentales.....	30
5.3    Operación del espacio aéreo .....	31
5.3.1    Regulación-Reglamentación .....	31
5.3.2    Arquitectura y gestión del espacio aéreo .....	33
5.4    Sistema de salud.....	38
5.4.1    Tipos de muestras de sangre .....	38
5.4.2    Procedimiento para la toma, conservación y transporte de muestras de laboratorio .....	38
5.5    Marco geoestadístico .....	40

Capitulo VI Resultados y Contribución .....	41
6.1  Diagnostico .....	41
6.1.1  Determinación de los servicios relacionados con el transporte de pruebas de laboratorio a evalua.....	41
6.1.2  Demanda de los servicios del sistema de salud.....	41
6.1.3  Población.....	42
6.1.4  Laboratorios clínicos del sistema de salud.....	48
6.1.5  Red vial colombiana.....	50
6.1.6  Cobertura y acceso al servicio de toma de muestras de laboratorio clínico.....	54
6.1.7  Determinación de área de estudio a modelar .....	59
6.2  Entorno de operación .....	62
6.2.1  Operación del espacio aéreo .....	62
6.2.2  Flota .....	62
6.2.3  Número de operaciones al día por vehículo.....	66
6.3  Planteamiento de modelos logísticos .....	68
6.3.1  Etapa 1 estratégica: Acceso a servicios de grandes áreas, con poca infraestructura vial ....	69
6.3.2  Etapa 2 táctica-operativa: Cobertura de servicios en áreas rurales. ....	75
6.3.3  Evaluación económica .....	80
6.4  Casos de estudios, línea base y modelación.....	82
6.4.1  Estudio del modelo en la etapa 1 estratégica en el departamento de Guainía.....	82
6.4.2  Estudio del modelo en la etapa 2: cobertura de servicios en el departamento de Valle del Cauca.....	98
6.5  Análisis de resultados .....	117
6.5.1  Modelo etapa 1, evaluado en el departamento de Guainía.....	117
6.5.2  Modelo etapa 2, evaluado en el departamento de Valle del Cauca.....	120
6.5.3  Análisis de Resultados Económicos .....	124
6.5.4  Análisis generales .....	131
Capitulo VII Conclusiones.....	134
Capitulo VIII Anexos.....	137
Capitulo IX Bibliografía.....	138



## Índice de Imágenes

Imagen 1. Áreas de servicio.....	27
Imagen 2. Localización-Asignación. ....	28
Imagen 3. VRP.....	28
Imagen 4. Dron de ala fija.....	30
Imagen 5. Dron multirotor. ....	30
Imagen 6. Dron VTOL.....	31
Imagen 7. Líneas de vuelo .....	34
Imagen 8. Aerovías. ....	34
Imagen 9. Esquema de la estructura de capas del espacio aéreo.....	36
Imagen 10. Tubo-Margen de seguridad. ....	36
Imagen 11. Secuencia táctica de solución de conflictos. ....	37
Imagen 12. Número de personas por departamento.....	43
Imagen 13. Densidad poblacional por departamento.....	44
Imagen 14. Número de muertes por diabetes mellitus tipo 2.....	45
Imagen 15. Número de muertes por diabetes mellitus tipo 2.....	46
Imagen 16. Número de eventos de malaria.....	47
Imagen 17. Número de eventos de malaria por millón de habitantes. ....	48
Imagen 18. Número de laboratorios clínicos. ....	49
Imagen 19. Número de laboratorios clínicos por millón de Habitantes.....	50
Imagen 20. Densidad vial y estado de la superficie de rodadura. ....	53
Imagen 21. Red de grafos. ....	54
Imagen 22. Áreas de servicio para los diferentes espacios de tiempo. ....	55
Imagen 23. Sectores rurales que cuentan con accesibilidad a los laboratorios hasta en un tiempo de 15 minutos.....	56
Imagen 24. Accesibilidad de los laboratorios en el sector rural.....	57
Imagen 25. Accesibilidad de los laboratorios en el sector urbano. ....	58
Imagen 26. Enfoques estratégicos de prevención y control.....	59
Imagen 27. Resultado de la función valor para el escenario de la diabetes tipo 2.....	61
Imagen 28. Resultado de la función valor para el escenario de la malaria. ....	61
Imagen 29. Dron Zipline.....	63
Imagen 30. Dron Matternet.....	63
Imagen 31. Dron MissionGO's.....	64
Imagen 32. Dron Phantom 4 Pro.....	64
Imagen 33. Dron FOXTECH Whale 360.....	65
Imagen 34. Unidad Refrigerante.....	66
Imagen 35. Etapa 1- Instancia 1: modelo de asignación-localización. ....	70
Imagen 36. Etapa 1- Instancia 2: modelo de asignación-localización a instalaciones de servicio.....	72
Imagen 37. Etapa 2- Instancia 1: modelo de asignación-localización de instalaciones de servicio.....	76
Imagen 38. Etapa 2- Instancia 2: modelo de VRP-ruteo de vehículos.....	78
Imagen 39. Tamaño de la muestra. ....	83
Imagen 40. Resultado de caracterización y agrupación demográfica. ....	83
Imagen 41. Identificación de las instalaciones de servicio. ....	84
Imagen 42. Creación de la red. ....	84
Imagen 43. Resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 1.....	85
Imagen 44. Extracto del resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 1.....	85

Imagen 45. Resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 2.....	86
Imagen 46. Extracto del resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 2.....	86
Imagen 47. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-30.....	87
Imagen 48. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-30.....	87
Imagen 49. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-60.....	89
Imagen 50. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-60.....	89
Imagen 51. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-90.....	91
Imagen 52. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-90.....	91
Imagen 53. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-120.....	93
Imagen 54. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-120.....	93
Imagen 55. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-180.....	95
Imagen 56. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-30.....	95
Imagen 57. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de Malaria, en el departamento de Guainía.....	97
Imagen 58. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de Malaria en un periodo de 5 años, en el departamento de Guainía.....	97
Imagen 59. Resultado de caracterización y agrupación demográfica.....	99
Imagen 60. Resultado de la identificación de las instalaciones de servicio.....	99
Imagen 61. Resultado de la creación de la red.....	100
Imagen 62. Resultado del modelo evaluado en la etapa 2-instancia 1.....	100
Imagen 63. Resultado de distribución aleatoria de la demanda.....	101
Imagen 64. Demanda a atender en los sectores rurales de La Unión y Roldanillo.....	102
Imagen 65. Identificación de las instalaciones de servicio para los sectores rurales de La Unión y Roldanillo.....	102
Imagen 66. Redes generadas de los modelos en la etapa 2-instancia 2.....	103
Imagen 67. Resultado del modelo evaluado en la etapa 2-instancia 2.....	104
Imagen 68. Extracto del resultado del modelo evaluado en la etapa 2-instancia 2.....	104
Imagen 69. Resultado de la modelación – distancia total acumulada.....	106
Imagen 70. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante drones.....	107
Imagen 71. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante drones.....	107
Imagen 72. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.....	109
Imagen 73. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.....	109
Imagen 74. Resultado de la modelación de la segunda instancia – distancia total acumulada.....	111
Imagen 75. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante drones.....	112
Imagen 76. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante drones.....	112
Imagen 77. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.....	114
Imagen 78. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.....	114
Imagen 79. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de sangre, en el departamento de Valle del Cauca.....	116

Imagen 80. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de sangre en un periodo de 5 años, en el departamento de Valle del Cauca.....	116
Imagen 81. Resultado de la distancia total recorrida para cada escenario .....	118
Imagen 82. Resultado de la recolección de muestras para cada escenario. ....	119
Imagen 83. Resultado de la distancia total recorrida para cada escenario en un periodo de 5 años .....	119
Imagen 84. Resultado del total de muestras recolectadas en un periodo de 5 años .....	120
Imagen 85. Optimización de los desplazamientos y tiempos de viaje al emplear el modelo logístico.....	121
Imagen 86. Cobertura del servicio en el departamento de Valle del Cauca.....	121
Imagen 87. Agrupación de la demanda y resolución de la etapa 2-instancia 1.....	122
Imagen 88. Resultados del VRP para drones y motocicletas.....	123
Imagen 89. Comparación de la red vial y la de drones .....	123
Imagen 90. Costo total de los escenarios analizados. ....	124
Imagen 91. Costo total de los escenarios evaluados en un periodo de recolección de 6 meses.....	125
Imagen 92. Costo total de los escenarios evaluados a 5 años. ....	125
Imagen 93. Valor unitario de la muestra.....	126
Imagen 94. Costo total de los escenarios evaluados en el Valle del Cauca .....	127
Imagen 95. Costo total de los escenarios base evaluados en el Valle del Cauca .....	127
Imagen 96. Costo total de los escenarios planteando la recolección de una muestra anual por paciente. ....	128
Imagen 97. Costo total de los escenarios planteando la recolección de cuatro muestras anuales por paciente. ....	128
Imagen 98. Valor unitario del transporte de una muestra en el departamento del Valle del Cauca .....	129
Imagen 99. Costo total de los escenarios evaluados a 5 años en el Valle del Cauca. ....	130
Imagen 100. Costo total de los escenarios planteando la recolección de una muestra anual por paciente. ....	130
Imagen 101. Costo total de los escenarios planteando la recolección de cuatro muestras anuales por paciente. ....	130
Imagen 102. Valor unitario del transporte de una muestra en el departamento del Valle del Cauca, evaluado a 5 años .....	131

## Índice de Tablas

Tabla 1. Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos (VTR) en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno .....	51
Tabla 2: Clasificación de la red vial y asignación de velocidad en función del tipo de vía.....	52
Tabla 3: Costo de los drones seleccionados para modelar las operaciones logísticas. ....	65
Tabla 4: Calculo de las operaciones/día.....	67
Tabla 5. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 1-instancia 1 .....	71
Tabla 6. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 1-instancia 2 .....	72
Tabla 7. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 2-instancia 1 .....	77
Tabla 8. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 2-instancia 2 .....	79
Tabla 9. Costo de una instalación intermedia. ....	80
Tabla 10. Costo del equipamiento de una instalación existente (laboratorio clínico).....	80
Tabla 11: Costo de adquisición de drones. ....	81
Tabla 12. Costo de Adquisición de Motocicletas .....	81
Tabla 13. Resumen de resultados modelación Dron-30.....	88
Tabla 14. Resumen de resultados modelación Dron-60.....	90

Tabla 15. Resumen de resultados modelación Dron-90.....	92
Tabla 16. Resumen de resultados modelación Dron-120.....	94
Tabla 17. Resumen de resultados modelación Dron-180.....	96
Tabla 18. Puntos de demando no localizados. ....	103
Tabla 19. Parámetros de los vehículos.....	104
Tabla 20. Resumen de resultados modelación de viajes directos en el municipio de la unión transportando las muestras en drones. ....	106
Tabla 21. Resumen de resultados modelación escenario 1. ....	108
Tabla 22. Resumen de resultados modelación escenarios 1,2 y 3. ....	108
Tabla 23. Resumen de resultados modelación escenario 4. ....	110
Tabla 24. Resumen de resultados modelación escenarios 4,5 y 6. ....	110
Tabla 25. Resumen de resultados modelación de viajes directos en el municipio de la unión transportando las muestras en drones. ....	111
Tabla 26. Resumen de resultados modelación escenario 7. ....	113
Tabla 27. Resumen de resultados modelación escenarios 7,8 y 9. ....	113
Tabla 28. Resumen de resultados modelación escenario 10. ....	115
Tabla 29. Resumen de resultados modelación escenarios 10,11 y 12.....	115

## Capítulo I

### Introducción

A nivel mundial alrededor de 2 mil millones de personas (25% de la población mundial) carecen de acceso a productos médicos esenciales como sangre o vacunas, por falta de infraestructura o condiciones topográficas adversas ( World Health Organization, 2004). A nivel nacional, la baja accesibilidad a los servicios de salud, se debe entre otras causas a la dificultad de movilización hacia los centros de servicio, la cobertura del sistema y las condiciones socioeconómicas de la población. El presente documento plantea un modelo de transporte de muestras de sangre para aumentar la cobertura y accesibilidad a las instalaciones de análisis clínico, con el fin de disminuir los tiempos y costos de viaje asociados.

En los últimos diez años se ha estudiado el transporte de mercancías por medio de drones, empresas como Amazon, Google, Australia Post, Matternet y Zipline han investigado modelos de operación en los que involucran los vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la entrega de paquetes; por otra parte, a nivel gubernamental la NASA o U-SPACE trabajan en el desarrollo de un marco regulatorio del espacio aéreo y la arquitectura de este.

En el área de la salud, (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017) elaboro un estudio para la entrega y recogida de kits para muestras de sangre con un modelo de operación por medio de drones, en el que se buscó minimizar la cantidad de dinero gastado por una persona que padece una enfermedad crónica y que requiere realizarse controles periódicos. En el año 2019 (Ochieng, et al., 2020) investigaron el transporte de muestras de sangre en el oeste de África simulando la movilización ejemplar de análisis para la epidemia del virus de Ébola entre el año 2013 y 2016, comparando la movilización por medio de drones y motocicletas; en donde se identificó la demora del transporte de muestras causado por las malas condiciones de la infraestructura vial y las barreras geográficas.

Estudios adicionales han investigado sobre la calidad de las muestras de sangre al ser transportados bajo este modelo de operación, en el año 2015 (Amukele, Sokoll, Pepper, Howard, & Street, 2015) realizaron pruebas con 336 muestras en donde se encontró que no existía una variación significativa entre muestras que fueron transportadas por vía aérea comparadas con ejemplares de control resaltando la importancia del control de las condiciones ambientales en los que se moviliza la muestra, principalmente la temperatura y la presión atmosférica.

En el documento se analiza e identifica a partir de las estadísticas colombianas relacionadas con la población, la diabetes como primera enfermedad de estudio ya que esta representa la sexta causa de muerte en el país y la malaria al ser un evento de interés en salud pública. A partir de una evaluación multicriterio

se seleccionan dos departamentos para estudiar la operación de los modelos logísticos que se proponen en el presente estudio.

El escrito plantea una metodología desarrollada en 6 etapas, con un análisis cualitativo y cuantitativo de los diferentes aspectos necesarios para formular un modelo logístico de transporte de muestras de sangre mediante drones.

En el capítulo II se formula la pregunta de investigación, la descripción del problema, la importancia y relevancia para la maestría de tránsito y transporte con énfasis en ingeniería civil y el diagnóstico general del problema. El capítulo III presenta los objetivos del documento; en el capítulo IV se presenta un estudio del estado del arte relacionado con los drones y la operación del espacio aéreo, el transporte de muestras de sangre por este medio y los problemas logísticos relacionados. En el capítulo V se expone el marco teórico relacionado con las redes de grafos, operaciones y logísticas del transporte. Los capítulos VI y VII presentan un diagnóstico del problema a nivel nacional, determinando las enfermedades y áreas de estudio, posteriormente plantea un modelo logístico de 2 etapas, el cual fue evaluado en dos departamentos de Colombia. Por último, se presenta, analiza y concluye los resultados de la investigación y escenarios modelados.

## Capítulo II

### Problema de Investigación

#### 2.1 Pregunta de Investigación

¿Cómo se puede plantear un modelo logístico reduciendo el tiempo y los costos para la movilización de muestras de sangre, usando drones?

#### 2.2 Descripción del Problema

La baja accesibilidad a los servicios de salud en Colombia en particular los relacionados con exámenes de laboratorio realizadas con muestras de sangre, se debe a entre otras a causas a la difícil movilización hacia los centros de salud, la cobertura del sistema y las condiciones socioeconómicas de la población. La primera surge a raíz de la topografía de la región, la localización de las instalaciones, los costos de viaje, la baja oferta en servicios de transporte y la ausencia o mal estado de la infraestructura vial; como consecuencia se tienen distancias y tiempos elevados que un usuario tiene que emplear para acceder a estos.

Abordando la problemática desde el campo del transporte, se pueden diferenciar la distancia, el tiempo y el costo como variables que definen el nivel de accesibilidad y cobertura a los exámenes clínicos.

#### 2.3 Importancia, relevancia y pertinencia del proyecto para la maestría

El proyecto tiene relevancia para la maestría de ingeniería civil con énfasis en tránsito y transporte ya que se abordan temas propios del programa académico afines al transporte y operaciones logísticas; en donde se estudiaron temas relacionados con el espacio aéreo en Colombia, enfocados a la apropiación y aparición de nuevas tecnologías como los vehículos aéreos no tripulados, analizando su operación e interacción con los medios de transporte convencionales.

En otra instancia se propusieron métodos los cuales permiten desarrollar el transporte de mercancías mediante drones, presentando metodologías aplicables a la investigación de operaciones para el desarrollo sistemas alternativos y que aprovechen los recursos tecnológicos actuales.

Es oportuno abordar el tema como trabajo de profundización dentro del desarrollo de la maestría ya que se identificaron riesgos de la operación, oportunidades, optimización y alternativas en la dinámica del transporte de mercancías, la disminución del número de viajes que tienen que realizar las personas, la ampliación de la cobertura de servicios y el cambio de las necesidades en infraestructura física para poder transportar mercancías.

## **2.4 Diagnostico general del problema**

A nivel local, Colombia se caracteriza por ser un país con una geografía montañosa y con un atraso de décadas en infraestructura en comparación a otros países ocupando el puesto 87 de 137 en la categoría de infraestructura (Schwab, Sala-i-Martín, & Samans, 2017). Desde un aspecto general, se considera a Colombia como un país diverso, en cuanto a su geografía, cultura, concentración demográfica, nivel de desarrollo y carga de enfermedades (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013), Médicos sin Fronteras menciona que esta heterogeneidad hace que las políticas en salud se vean limitadas y que existan regiones sistemáticamente discriminadas (Ministerio de Salud y Protección Social)

Colombia se caracteriza por ser un país donde se concentran los servicios y se prestan en mayor proporción en las áreas urbanas presentando un problema para el 60% de la población ubicada en áreas rurales (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013), la cual se debe desplazarse a los centros urbanos para la prestación estos, aumentando los costos para los usuarios, lo cual se ha identificado como una de las causas que no permite el acceso, se halló que una de las razones para no solicitar o recibir atención médica está relacionada con motivos económicos (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015).

Desde el punto de vista de las entidades que ofrecen los servicios, se ha estimado que el costo asociado a las actividades logísticas en la red de salud pública corresponde al 46% del presupuesto total asignado a la operación de la red (Garland Chow & Heaver Henriks, 1994).

Se mencionan dos estudios de interés analizados en Centroamérica, los cuales están asociados al uso de drones y donde se pueden observar los impactos en las variables mencionadas anteriormente y la resonancia que tiene en el grupo social que será beneficiado por el proyecto. El primer proyecto de logística de materiales sanitarios en República Dominicana pretende incrementar entre un 30% y 50% el número de diagnóstico y transporte de resultados, aumentando en un 50% el transporte de pruebas de papanicolau y gota gruesa, entre otros (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017). Un segundo proyecto desarrollado por la caja costarricense del seguro social plantea entregar medicamentos a habitantes de zonas indígenas y de difícil acceso en un menor tiempo; para ello tiene planteado entregar cerca de 13200 paquetes de medicamentos con vehículos aéreos no tripulados en la región Heta Atlántica, con esto se lograría disminuir los traslados tiempos de las personas estimado entre tres horas y tres días a 45 minutos (La Nacion, 2022)



## Capítulo III

### Objetivos

#### 3.1 Objetivo general:

Plantear un modelo de transporte de muestras de sangre por medio de drones para aumentar la cobertura de los servicios de salud, disminuyendo los tiempos y costos de viajes asociados.

#### 3.2 Objetivos específicos:

- Realizar un inventario general de la red de laboratorios de Colombia.
- Caracterizar y describir el proceso de recolección y transporte de muestras de sangre, así como los factores relevantes del mismo.
- Proponer un modelo logístico el cual considere las diferentes características, factores y restricciones, para transportar muestras de sangre mediante drones.
- Realizar un estudio del marco regulatorio del espacio aéreo en Colombia, particularmente para la operación de drones de forma autónoma y más allá del alcance visual de un piloto (BVLOS), desarrollando un programa de operación.
- Identificar dos departamentos o regiones en particular, en el cual se pueda probar de manera simulada el modelo propuesto y evaluar su desempeño.

## Capítulo IV

### Estado del arte

#### 4.1 Drones y operación del espacio aéreo

##### 4.1.1 Operación del espacio aéreo

La motivación por la regulación y el control aéreo ha surgido de la necesidad de dar respuesta a un mercado creciente como es el de los drones y para dar parámetros de nuevas oportunidades de negocio como el envío de paquetes por este medio. En Estados Unidos la NASA con el programa UTM (Unmanned Aircraft Systems Traffic management) y en Europa la organización SESAR con el programa U-Space realizan investigaciones y desarrollo en aspectos como la arquitectura de plataformas, metodologías relacionadas con el espacio aéreo y la interacción de los drones en el mismo.

##### 4.1.2 UTM

En el año 2016, en un estudio evaluó la factibilidad de transportar muestras con organismos y se efectuó una comparación relacionada con la seguridad de los drones; al no disponer suficientes registros de accidentalidad se realizó la analogía con los accidentes aéreos en Estados Unidos los cuales fueron de 1.03 por cada 100.000 horas de vuelo (Amukele, Street, Carroll, Miller, & Zhang, 2016). La analogía elaboró la comparación de 3 componentes de la operación aérea: los vehículos, el operador, y la seguridad operacional.

Relacionado con los vehículos aéreos se mencionó que estos son certificados en cada una de sus fases del diseño, son registrados e inspeccionados regularmente, en contraste muy pocos drones cumplen estos protocolos, sin embargo, se destaca que no los hace necesariamente menos seguros ya que muchos tienen tecnologías y sensores que los aviones comerciales no tienen (Amukele, Street, Carroll, Miller, & Zhang, 2016).

Referente a los pilotos tanto de aeronaves como de drones requieren un entrenamiento y certificación por parte de la entidad regulatoria y en relación con la operación aérea de los drones es más sencilla ya que no requiere la misma infraestructura que requieren los aviones, sin embargo se presenta una gran diferencia en la planificación ya que la operación aérea tradicional tiene un alto grado de estudio y detalle a diferencia de la de drones, el cual es un campo que actualmente se encuentra en desarrollo (Amukele, Street, Carroll, Miller, & Zhang, 2016).

En el año 2020 (McCarthy, Pforte, & Burke, 2020) realizaron un estudio presentando las brechas de investigación en el desarrollo e implementación del UTM urbano, se expone que tanto en

Estados Unidos como en Europa se han planteado arquitecturas que permitirán los vuelos de drones urbanos, aunque aún no se han abordado o no tienen un nivel de detalle avanzado en algunos aspectos relacionados con la operación; las arquitecturas investigadas se han elaborado a un nivel integral y comparten algunos aspectos para el manejo del tráfico de drones, promoviendo una estructura modular, a partir de datos federados y servicios de información a partir del uso de estándares de la industria. También se identificaron algunos temas fundamentales y críticos que aún no se estudian en detalle, como el análisis y gestión de riesgos, la modelación del espacio aéreo y la gestión de grandes volúmenes de movimientos (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

A nivel conceptual se plantearon tres capítulos fundamentales: regulación, operación e infraestructura. Dentro de los argumentos principales se destacó la necesidad de la clasificación del espacio aéreo identificando las zonas en las que se puede volar, la ubicación de los usuarios y la necesidad de conocer la planificación y los viajes en tiempo real con el fin de gestionarlos y organizarlos (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

Aunque documento se enfocó en el desarrollo de operaciones en sectores principalmente rurales, se identificaron aspectos puntuales relacionados con el estudio de UTM desarrollado por (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020), en el cual se resaltan los siguientes:

- Comprender las características del riesgo asociado con la operación (riesgo aéreo y terrestre)
- Necesidad de diseñar un modelo del espacio aéreo que apoye las operaciones.
- Plantear una arquitectura y estructura del espacio aéreo y la operación.
- Desarrollar un sistema de gestión del tráfico de drones.
- Se debe contar con una capacidad para la solución de conflictos y solución de emergencias en tiempo real.
- El sistema de UTM tiene que ser computacionalmente escalable, automatizado y adaptable a cualquier localización.

## 4.2 Transporte de muestras de sangre en drones

### 4.2.1 Calidad de las muestras de sangre

Un aspecto a tener en cuenta es garantizar que las muestras de sangre que son transportadas en drones sean protegidas y trasladadas en condiciones ambientales adecuadas con el fin de cumplir con los estándares para que sea considerada como válida para ser analizada en laboratorio.

Se han realizado estudios donde se evaluó la calidad de muestras de sangre utilizadas para diferentes exámenes de laboratorio mediante la comparación de pares, donde se conservaron especímenes de referencia las cuales permanecieron in situ mientras sus homologas fueron dispuestas en drones durante diferentes rangos de tiempo. Se planteó la hipótesis que los drones pueden ser una solución de costo relativamente bajo y con pocas barreras para la implementación con el fin de solucionar problemas relacionados con la falta de accesibilidad por no contar con una red carretera y aprovechar las ventajas pueden ya que no presentarían retrasos por la congestión vehicular (Amukele, Sokoll, Pepper, Howard, & Street, 2015).

En el año 2015 se realizó una prueba con 336 muestras, de las cuales la mitad volaron en intervalos de tiempo entre 6 y 38 minutos, al terminar los vuelos se realizaron 33 de los exámenes más comunes de sangre, entre químicos, de hematología y de coagulación, estos fueron analizados y comparados con métodos estadísticos para evaluar la calidad de los ejemplares; el vehículo seleccionado para las pruebas fue un dron de ala fija dada su capacidad de carga, el costo y la menor complejidad mecánica; se realizaron vuelos a una altura de 100m (Amukele, Sokoll, Pepper, Howard, & Street, 2015).

Como resultado se encontró que no existía variación significativa entre los resultados de las muestras que volaron y las muestras estacionarias, tampoco se evidenciaron mayores diferencias para los diferentes intervalos de tiempos volados. Se resaltó la importancia que pueden tener las condiciones ambientales, particularmente la temperatura y la presión atmosférica, aunque para las pruebas realizadas no se consideró este parámetro ya que se argumentó que estas variaciones no eran representativas debido al tiempo y la altura de vuelo; estas tasas de cambios fueron asumidas de (0.6°C/100m) para elevaciones entre 0 y 12.000m (Brunt, 1933); de otra parte, se asumió un cambio de presión 1.2kPa por cada 100m (Guyot, 2019).

Posteriormente en el año 2016 se realizaron pruebas, para transportar microbios en la sangre y cultivos de esputo, con el fin de comparar y evaluar el impacto de trasladarlas en drones, se prepararon 12 muestras de sangre con organismos (*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae*, *Escherichia coli*, o *Bacteroides fragilis*) y 36 cultivos con *Staphylococcus aureus*,

*Streptococcus pneumoniae*; se realizaron vuelos con la mitad de las muestras por 30 minutos en un dron de ala fija; en los días de prueba se registraron temperaturas ambiente mínimas de 3°C y máximas de 8°C; al finalizar los vuelos se llevaron los especímenes para ser analizadas en un laboratorio de microbiología (Amukele, Street, Carroll, Miller, & Zhang, 2016). Como resultado se obtuvo que el tiempo de crecimiento de los organismos que se transportaron en drones y los que no, fueron similares. Para el ensayo las variables que se tuvieron en cuenta fueron la temperatura, presión y aceleración.

En el año 2017 se realizó un estudio, para evaluar la calidad de las muestras en un vuelo de 3 horas recorriendo una distancia de 258 km, se tomaron 84 ejemplares, se realizaron misiones con la mitad por 3 horas en un dron VTOL propulsado por un motor a gasolina a una temperatura ambiente de 32°C empacadas en un recipiente refrigerado, llevando un registro de la temperatura ambiente dentro del recipiente y en el elemento refrigerante durante todo el viaje; al finalizar se llevaron el total de los especímenes para ser analizados y comparados en 19 tipos de exámenes (Amukele, y otros, 2017).

Como resultado se obtuvo que 17 de los 19 exámenes de sangre realizados presentaron resultados similares, exceptuando el de glucosa y de potasio los cuales presentaron diferencias fuera de los límites aceptables. Se concluyó que el cambio en estos varió debido a la diferencia de temperatura entre las muestras que se volaron y las que no. Respecto al registro de temperatura se observó que el material refrigerante se enfrió a 15°C manteniendo una condición dentro del recipiente entre 25°C y 30°C, mientras en el ambiente registro un máximo de 32°C (Amukele, et al., 2017).

De otra parte, se resolvieron temas relacionados con la vibración de la muestra, mediante el empaquetado y el control de la temperatura mediante el sistema refrigerante, el cual fue alimentado por la fuente de poder del dron (Amukele, et al., 2017).

En los diferentes estudios consultados no se encontraron estudios donde se evaluará la calidad de las muestras de sangre transportada en láminas, los viajes se evaluaron con una sola parada y los ejemplares siempre fueron de personas que tenían sus exámenes dentro de los valores normales.

#### **4.2.2 Modelos de transporte con drones**

En el año 2017 se propuso un estudio para la entrega y recogida de kits de pruebas de sangre y orina para pacientes con enfermedades crónicas, los cuales deben realizar visitas frecuentes a los centros de salud para realizar sus chequeos. Se plantearon dos modelos: el primero a nivel estratégico donde se buscaba encontrar la cantidad optima de instalaciones para la operación de drones y el segundo desde un componente operacional donde se buscaba resolver el enrutamiento

de vehículos con múltiples depósitos, lugares de recogida y entrega con el objetivo de minimizar el costo operativo (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017).

Se buscó solucionar la cantidad de dinero gastado por una persona que padece de una enfermedad crónica en gastos de bolsillo relacionados con la necesidad de realizarse controles médicos periódicos, el cual puede ser por lo menos 2.5 mayor o más dependiendo el número de enfermedades que se padezca, comparado con una persona sin estos padecimientos; este valor se ve multiplicado en mayor medida para habitantes de áreas rurales. En primer lugar la planeación estratégica busca obtener el número mínimo de centros de drones que permitan dar cobertura a todos los pacientes y para ello se propuso un enfoque de set-covering, teniendo como instalaciones candidatas a los centros de salud locales y algunos lotes baldíos que estén adyacentes a una red carretera con el fin de no escoger lugares inviables; El criterio de selección es la máxima distancia que puede alcanzar un dron, el cual se encuentra limitado por la capacidad de la batería. En segundo lugar, se busca encontrar el número óptimo de vehículos y rutas para atender el número de pacientes asignados en la planeación estratégica; este se determina modelando el peor de los escenarios el cual consiste en atender a todos los usuarios en una ventana de tiempo determinada (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017).

Algunas de las limitaciones que se tuvieron en cuenta fueron rango y la carga neta que llevan los drones al realizar rutas con múltiples paradas, la solución a este problema se asemeja al problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP). (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017).

De otra parte (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017), plantearon un análisis costo beneficio teniendo en cuenta un precio de adquisición, operación, mantenimiento, mano de obra y renovación de la flota de drones. Como beneficios se calculan la reducción de los valores de conducir hasta los centros médicos y la reducción de un copago.

Se evaluó un caso numérico real a partir de datos de los condados de Milam y Robertson en Texas, EE. UU, con nueve instalaciones posibles y con 40 pacientes. Como resultado de la solución de los problemas estratégicos y operacionales se obtuvo un beneficio mayor estimado en un primer escenario con más de cuarenta usuarios, si el número de pacientes es menor a este número se requiere que las distancias sean mayores para que sea rentable. por otra parte, al manejar un margen de error en la programación y operación de los drones se requieren de mayores longitudes para que siga siendo rentable. El autor concluye que extensiones de esta investigación pueden considerar variables como el consumo de batería en función de la carga y una priorización en los modelos de enrutamiento y programación (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017).

En el año 2019 se realizó un estudio económico en el cual se comparó un sistema de vehículos aéreos versus motocicletas para enviar muestras de sangre en el oeste de África, donde se identificó el problema de las demoras para el transporte de ejemplares, en países de ingresos bajos y medianos el cual también está relacionado con las malas condiciones de la infraestructura vial y barreras geográficas (Ochieng, et al., 2020).

Se simuló el transporte de muestras de sangre para la epidemia del virus del Ébola entre 2013 y 2016; se realizó un estudio comparativo analizando el costo y la rentabilidad entre UAS con rangos de operación de 30, 65, 100 km y motocicletas del programa Riders for Health. Se incluyeron variables de estudio relacionadas con el costo del personal, equipos mantenimiento y entrenamiento; de otra parte, se realizó un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta la vida útil de los vehículos, rango y probabilidades de accidentes o fallas. Para el análisis se asumió que la mitad de los especímenes llegaban directamente a los hospitales de referencia por lo que no debían ser transportadas, las restantes ascendían a 1.8 millones por año (Ochieng, y otros, 2020).

Dentro de los resultados, las simulaciones realizadas sugieren que los drones de corto alcance son menos rentables que las motocicletas, aunque los de mayor alcance o con un uso mixto pueden tener un mayor potencial. También sugieren el uso de vehículos aéreos para lugares con baja accesibilidad y donde las motocicletas o camiones no puedan acceder. Dentro de los análisis de costos no se tuvo en cuenta los beneficios que pueden representar un diagnóstico rápido en las emergencias de salud pública ni los beneficios en la salud pública relacionada con las definiciones tempranas de casos que pueden llegar a significar más vidas salvadas (Ochieng, y otros, 2020).

#### **4.2.3 Problemas logísticos en la resolución del transporte de mercancías con drones**

El estudio del transporte de bienes mediante drones se ha desarrollado en diferentes ámbitos y por diferentes industrias, como la de la mensajería. Han sido objeto de diversos estudios los modelos en los cuales se plantea una operación combinada entre camiones y UAVs, en donde los últimos inician sus viajes desde los carros de reparto, con el fin de realizar el recorrido de última milla.

En el año 2017 (Marinelli, Caggiani, Ottomanelli, & Dell'Orco, 2017), la entrega de paquetes combinando camiones con UAV, estudiando el problema del vendedor viajante con drones (TSP-D) el cual se caracteriza por ser NP-hard y se vuelve más complejo al incluir el empleo combinado de vehículos. Se resaltaron hitos importantes en el planteamiento y estudio de la operación logística y el uso de drones para las entregas como el anuncio en 2013 de Amazon, el Google Project y en

el año 2016 Australia Post; también destacan las pruebas realizadas para aplicaciones médicas realizadas por Matternet y por Zipline.

El autor plantea que el despacho de los drones no solo se realice en un nodo de la ruta o red, sino que estos también pueden ser posibles efectuarlos en los arcos de la misma. Dada la complejidad del problema el autor propuso el desarrollo de heurísticas que permitan desarrollar la solución para el problema (TSP-D) (Marinelli, Caggiani, Ottomanelli, & Dell'Orco, 2017).

El modelo plantea un algoritmo que soluciona el TSP con una heurística de Lin-Kernighan, luego se buscan todas las posibles operaciones Camión-dron posibles basadas en nodos, posteriormente se filtran los ordenamientos con los costos más bajos, consecutivamente se mejoran los resultados considerando que se pueden hacer despachos en la ruta, es decir en medio de los arcos, se organizan los datos de acuerdo a los costos y finalmente se construye la solución del TSP-D (Marinelli, Caggiani, Ottomanelli, & Dell'Orco, 2017).

Como resultado se obtuvo un ahorro en relación con la solución clásica de los problemas TSP, los cuales se ven reflejados en un menor consumo de baterías y tiempos de espera, así como el planteamiento para realizar simulaciones futuras enmarcadas en las redes UTM. Por otra parte, se presentó la ventaja en cuanto se pueden superar aspectos relacionados con el tráfico urbano los cuales pueden permitir reducir los costos totales del transporte (Marinelli, Caggiani, Ottomanelli, & Dell'Orco, 2017).

En el año 2019 (Karak & Abdelghany, 2019) presento una formulación metodológica y matemática para solucionar el problema híbrido de ruteo vehículo-dron (HVDRP) para los servicios de entrega y recogida de paquetes el cual busco minimizar los costos de la operación. En la resolución del problema se tuvo en cuenta las limitantes de los drones relacionados con el tiempo de vuelo y la capacidad de carga. Se propuso un procedimiento como una extensión al algoritmo clásico de Clarke y Wright, el rendimiento de esta heurística se comparó con heurísticas que estudian el mismo tema. Dentro del tema propuesto (Karak & Abdelghany, 2019) se resaltan algunas de sus consideraciones:

- Se tienen varios drones en un solo vehículo.
- Cada dron puede atender a más de un punto de demanda, teniendo en cuenta sus restricciones de rango de vuelo y capacidad de carga.
- Los drones pueden terminar la ruta en cualquier punto del vehículo el cual puede ser diferente al de despegue.



- Se pueden enviar drones simultáneamente planteando operaciones en enjambre, lo que mejora la productividad del sistema.
- Los puntos de demanda son solo atendidos por drones.
- Los vehículos se utilizan únicamente como puntos de depósito móviles.

Como resultados del estudio se destaca el ahorro en costos al combinar vehículos y drones en el proceso logístico, se obtuvo una heurística que determinó el ruteo para los drones y el punto óptimo para su despegue y recogida, para posteriormente solucionar un problema de ruteo para el vehículo el cual recorrerá estos puntos óptimos. Comparado con un modelo de recogida solo con camiones, se observó una reducción de costos proporcional al de operación de los drones. De otra parte, se concluyó que para áreas de servicio con pocos clientes los drones de mayor rango son más adecuados y para zonas con una alta demanda se requieren UAVs con mayor capacidad de carga.

#### **4.2.4 Principios para una buena programación y diseño de rutas**

De acuerdo con (Ballou, 2004), se plantean ocho principios relacionados con la programación y diseño de rutas, los cuales se mencionan a continuación

- Cargar los vehículos con volúmenes de parada que estén lo más cercanos unos de otros.
- Las paradas de diferentes días se deberían ordenar de manera que formen agrupaciones más estrechas.
- Construir rutas comenzando con la parada más lejana del depósito.
- La secuencia de paradas en una ruta debería formar una figura de lagrime.
- Las rutas más eficientes se construyen usando los vehículos más grandes disponibles.
- Las recolecciones deberían mezclarse con las rutas de reparto.
- Una parada a una gran distancia es una buena candidata para un medio alternativo de reparto.
- Deberían limitarse las paradas restringidas por momentos oportunos.

## Capítulo V

### Marco Teórico

#### 5.1 Redes de grafos

de acuerdo con (Coto, 2003) las redes de grafos son una estructura matemática la cual está definida por un conjunto de nodos los cuales se encuentran unidos por arcos, estos establecen relaciones entre los puntos y contienen elementos de ponderación o peso y se encuentran relacionados a una longitud, tiempo y otros elementos de coste.

Teniendo en cuenta el número de nodos la cantidad de arcos del conjunto, el número de arcos que componen la red de grafos se calcula a partir de la Ecuación 1.

$$arcos = n(n - 1)/2$$

*Ecuación 1. Numero de arcos de una red*

La base de los problemas relacionados con redes consiste en encontrar la trayectoria más corta en una red representada en un diagrama de grafos; uno de los algoritmos clásicos y el cual es la base para diversos problemas relacionados con ruteos es el algoritmo de Dijkstra, el cual fue planteado en el año 1959 y resuelve el problema encontrar la trayectoria más corta a partir de un origen único. El algoritmo plantea un conjunto de confluencias, iterando la trayectoria más corta entre vecinos, a partir de la asignación de una función de peso entre los nodos. La trayectoria más corta o de menor costo será aquella que tenga un valor mínimo entre la sumatoria de los recorridos o valores asociados entre los nodos intermedios que conectan al nodo inicial y al final (Cardona, Castrillon, & Tinoco, 2017).

##### 5.1.1 Operaciones y logística del transporte

En el ámbito de las operaciones logísticas el transporte puede representar el valor individual más importante al ser entre 1/3 y 2/3 de los costos totales de la logística, por lo que el estudio de este tema se enmarca en un aspecto fundamental relacionado con las mercancías, la localización de instalaciones y los servicios que puede ofrecer un determinado servicio de transporte, lo cual puede resultar en un modelo de operación óptimo de acuerdo al nivel de planeación que se plantee (Ballou, 2004).

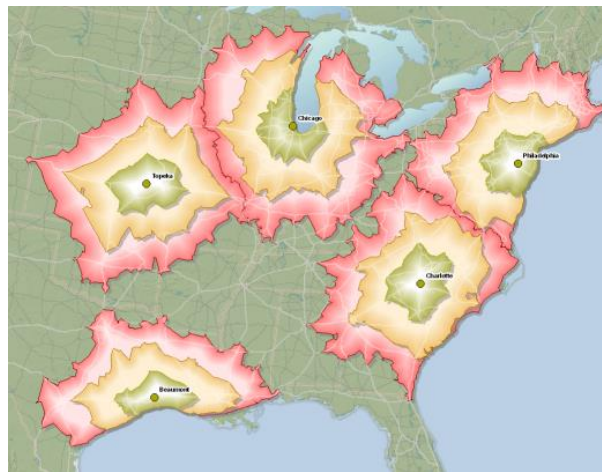
Dentro de los aspectos relevantes de un sistema de transporte se resalta una mayor competitividad en los mercados, la posibilidad de plantear economías de escala, la reducción del costo de la operación lo que se ve reflejado en precios reducidos de los bienes, la disminución del tiempo de movilización y variabilidad de los tiempos de entrega (Ballou).

Entre los problemas logísticos que tienen como objetivo minimizar longitudes, tiempos y costos se encuentran los relacionados con la asignación, localización, áreas de servicio y optimización del número de instalaciones. Como herramienta de resolución se empleó la extensión Network Analyst de ArcGIS, la cual se basa en el algoritmo de Dijkstra para buscar las trayectorias más cortas (ESRI, 2022). A Continuación, se presentan las descripciones de estos problemas y el método de solución planteado.

#### **5.1.1.1 Áreas de servicio**

El objetivo busca devolver un subconjunto de entidades de área que se encuentren dentro de una distancia o variable de costo especificada, para recorrer la red desde las diferentes instalaciones emplea el algoritmo de Dijkstra (ESRI, 2022).

*Imagen 1. Áreas de servicio.*

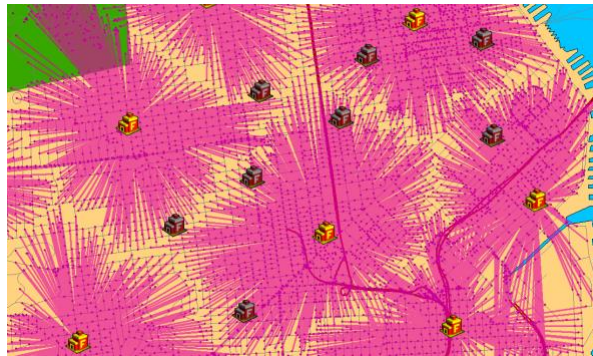


*Nota: Gráficos tomados de ArcGIS Desktop <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/service-area.htm>.*

#### **5.1.1.2 Ubicación y asignación, minimizar impedancia e instalaciones**

Se tiene como propósito localizar espacialmente infraestructuras de servicio. Se tiene un conjunto  $N$  de instalaciones candidatas y  $M$  puntos de demanda con un peso, se busca elegir un subconjunto de instalaciones  $P$  de tal forma que se minimice la suma de distancias ponderada desde cada punto  $M$  hasta el  $P$  más cercano; para resolver el problema se emplean heurísticas. En primer lugar, se genera una matriz de costos origen-destino, luego se genera una matriz de costos mediante una edición de Hillsman, posteriormente se generan soluciones semi aleatorias y se emplea una heurística de sustitución de vértices (Teitz y Bart). A continuación, se emplea una metaheurística que combina un grupo de buenas soluciones para crear unas mejores. Se obtienen resultados casi óptimos (ESRI, 2022) .

Imagen 2. Localización-Asignación.

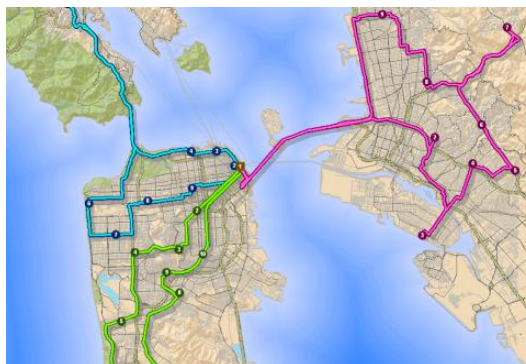


Nota: Gráficos tomados de ArcGIS Desktop <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/service-area.htm>

### 5.1.1.3 Generación de rutas para vehículos VRP

El VRP es un superconjunto del problema del viajante de comercio TSP en el cual se ordena un conjunto de paradas de manera óptima, adicionalmente en un VRP se contemplan restricciones relacionadas con la capacidad del vehículo, ventanas de los tiempos de entrega y el tipo de conductores; la solución se compone de minimizar la función objetivo la cual está determinada por los costos operativos y preferencias del usuario. En primer lugar se genera una matriz origen-destino de los costos de las trayectorias entre todos los puntos donde se requieren los servicios y las instalaciones de servicio en la red, a partir de la matriz se construye una solución inicial incluyendo los puntos de servicio en la ruta más adecuada, posteriormente la solución inicial se mejora cambiando la secuencia de los puntos de servicio y moviéndolos de una ruta a otra; para este proceso se emplean heurísticas basadas en la metaheurística de búsqueda de tabúes. Como resultado se obtienen las rutas para atender los puntos que requieren servicio.

Imagen 3. VRP.



Nota: Gráficos tomados de ArcGIS Desktop <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/route.htm>.

## 5.2 Drones

### 5.2.1 Tecnologías esenciales

Se resaltan cuatro tecnologías fundamentales para el funcionamiento y operación de los drones: la navegación, los sensores y las cargas útiles, las comunicaciones y la inteligencia artificial. El equipamiento de estas tecnologías caracteriza las capacidades de los drones y brinda los parámetros de seguridad para la operación de los mismos (University System of Maryland, 2019).

Las tecnologías de navegación permiten conocer en tiempo real la localización de los equipos. Para los drones se resaltan dos sistemas de navegación: GPS e IMU, el primero se conecta a una red de satélites y permite conocer su localización en coordenadas reales, a diferencia del segundo que a partir de los movimientos relativos (velocidad, orientación y fuerzas) proporciona una localización relativa a un punto de partida o un punto conocido. Esta característica permite planear las rutas, vuelos, puntos de recogida y el monitoreo y seguimiento de un dron en tiempo real (University System of Maryland, 2019).

Los sensores en los drones permiten la captura, monitoreo y/o seguimiento de información en tiempo real, debido a su maniobrabilidad y facilidad de acceder o desplazarse por el espacio aéreo. De otra parte, se pueden equipar los drones con recipientes que permiten transportar paquetes que normalmente son de tamaño pequeño y peso bajo pero que tienen alta importancia por el valor del objeto o la información que se transmite. En este aspecto se resaltan los sensores de proximidad que permiten detectar objetos cercanos, con el fin de evitar conflictos y posibles colisiones; por su parte, se resaltan los recipientes que pueden proteger y mantener condiciones atmosféricas ideales para movilizar paquetes que así lo requieran (University System of Maryland, 2019).

Dado que los drones son vehículos que se manejan remotamente las comunicaciones entre este y las estaciones en tierra o los pilotos es fundamental. La comunicación debe proporcionar una transmisión de datos en tiempo real y de manera estable, con el fin de operar de forma segura. Para vuelos cortos normalmente las comunicaciones se dan mediante una red Wi-Fi entre el vehículo y el dron (University System of Maryland, 2019); para misiones autónomas o con un rango de operación mayor, el cual se encuentre por fuera de la línea de visión, se prevé una comunicación por medio de otras tecnologías como las redes 5G.

La inteligencia artificial, permite automatizar procesos que llevan a mejoras y permiten un control de los protocolos de vuelo, permiten la interacción con otras aeronaves tripuladas y no tripuladas, mejoran la seguridad de las operaciones aéreas permitiendo un mejor rendimiento y la capacidad de realizar tareas avanzadas. Con base en los sensores y comunicaciones se aplican algoritmos que

permiten realizar vuelos autónomos, resolver conflictos de trayectorias y evitar colisiones, evaluar las condiciones atmosféricas para ofrecer un vuelo estable y realizar tareas que el controlador o piloto no puede resolver de forma instantánea (University System of Maryland, 2019).

### 5.2.2 Aspectos fundamentales

Los drones se pueden clasificar de acuerdo a como se sustentan en el aire; se distinguen tres tipos: de ala fija, multirrotor o VTOL. Los drones de ala fija son aquellos que por su diseño aerodinámico se sustentan en el aire, los multirrotor son los que se sustentan a partir del movimiento de sus hélices y los VTOL son aquellos que combinan las características de los drones multirrotor para el despegue y aterrizaje y se desplazan sustentándose en el aire con un diseño aerodinámico similar a un dron de ala fija (University System of Maryland, 2019).

*Imagen 4. Dron de ala fija.*



*Nota: Gráficos tomados de <https://topesdegama.com/listas/gadgets/drones-ala-fija>*

*Imagen 5. Dron multirrotor.*



*Nota: Gráficos tomados de <https://riis.com/blog/choosing-the-best-drone-airframe/>*

*Imagen 6. Dron VTOL*



*Nota: Gráficos tomados de <https://www.geotop.la/producto/drone-jouav-vtol-ala-fija-cw-15/>*

Otro aspecto importante tiene que ver con la fuente de energía para el funcionamiento de los drones, donde se diferencian tres tipos de fuentes: baterías eléctricas, combustible o energía solar. Las baterías eléctricas se caracterizan por ser de gran tamaño, pesadas y por ofrecer una fuente de energía para vuelos cortos (menores a 50 minutos); el combustible ofrece un mejor desempeño de energía permitiendo vuelos que pueden durar horas, pero requiere de equipos con motores más grandes y que realicen combustión. Por último, los drones que funcionan con energía solar se caracterizan por realizar vuelos inclusive de días, pero son drones de gran tamaño, especialmente en sus alas que le permiten un rendimiento aerodinámico y un área amplia para portar los paneles solares (University System of Maryland, 2019).

## **5.3 Operación del espacio aéreo**

### **5.3.1 Regulación-Reglamentación**

A nivel mundial, la organización de aviación civil internacional (OACI) es la entidad encargada de la administración de las regulaciones para el desarrollo de la aviación civil internacional dando cumplimiento al convenio de Chicago de las naciones unidas (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017); En relación con los drones el convenio menciona en el artículo 8 “ninguna aeronave capaz de volar sin piloto volará sin él sobre el territorio de un Estado contratante, a menos que se cuente con autorización especial de tal Estado y de conformidad con los términos de dicha autorización” y menciona “cada Estado contratante se compromete a asegurar que los vuelos de tales aeronaves sin piloto en las regiones abiertas a la navegación de las aeronaves civiles sean controlados de forma que se evite todo peligro a las aeronaves civiles” (Organización de Aviación Civil Internacional, 2006). Hasta el momento, la OACI se encuentra en el desarrollo de un marco regulatorio, pero que a la fecha no ha sido publicado.

Varios países ya cuentan con marcos regulatorios transitorios para los drones, los cuales son una primera respuesta al comercio y tránsito emergente de este tipo de vehículos, planteados con el fin de velar por la seguridad de las operaciones aéreas y garantizar la seguridad de los ciudadanos; sin embargo y dependiendo del nivel de investigación e importancia que cada país le ha dado a este tema la regulación restringe en menor o mayor medida la operación de los drones (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

Las regulaciones nacionales abordan aspectos en común las cuales están relacionadas en cuatro aspectos: definir que es un UAV, cuando es aplicable la regulación, como y donde se debe operar un UAV y quien puede operarlos (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

En primer lugar, la definición de que es un UAV, hace referencia a vehículos no tripulados, el peso, especificaciones técnicas y propósito de uso, con el fin de dar un alcance a las regulaciones planteadas (Banco Interamericano de Desarrollo). Un segundo aspecto tiene que ver en con el tipo de operaciones y actividades con UAVs que regula y cuales no (Banco Interamericano de Desarrollo). En tercer lugar, se evalúan aspectos relacionados con la distancia de operación en función del rango de visión del piloto, las condiciones climáticas; la altura, distancia y velocidad de los UAV, la capacidad de un piloto de operar más de un UAV, las áreas por las que se puede volar, la capacidad de transporte de elementos, registro, adquisición de pólizas de seguro y exenciones a las regulaciones (Banco Interamericano de Desarrollo). Por último, se aborda el tema relacionado con el perfil que deben tener las personas que operan los UAV, el requerimiento de una licencia, el registro ante la autoridad aeronáutica y una definición de las responsabilidades de quien opera un UAV (Banco Interamericano de Desarrollo).

Por su parte en Colombia la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (AEROCIVIL) es la entidad encargada de regular los temas aéreos, quien el 27 de diciembre de 2018 expidió la resolución 4201 mediante la cual incorpora reglamentos relacionados con sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS). En el numeral 1.2 define los ámbitos de aplicación donde menciona que las reglas son aplicables para aeronaves no tripuladas con un peso máximo de despegue superior a 250 g que se usen en actividades civiles, para cualquier utilización (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018). En el numeral 1.3 se clasifican las operaciones de acuerdo a su riesgo operacional en clase A: abierta, clase B: regulada y clase C: certificada; vale la pena resaltar que dentro de la clase C se encuentran clasificadas el tipo de operaciones que presentan limitaciones en la clase B, las cuales se encuentran enunciadas en el numeral 3.2 de la resolución donde se destacan las siguientes limitaciones:



(3) El operador deberá mantener la aeronave no tripulada en el alcance de línea de vista (VLOS) en un radio máximo de operación de 750 m horizontales durante todas las fases del vuelo. Si la pierde, deberá interrumpir inmediatamente la operación... (9) Cualquier operación aérea que implique trabajos aéreos especiales diferentes de la simple captura de imágenes, fijas o en movimiento, requerirá de permiso especial de la UAEAC... (15) No se podrán realizar operaciones autónomas, con excepción de aquellas autorizadas de conformidad con el numeral (12) anterior. (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018).

Se hace énfasis en que las operaciones de la clase C no están autorizadas para realizarse, pero la AEROCIVIL se reserva la posibilidad de emitir permisos especiales, para operaciones con fines de investigación científica, innovación y desarrollo (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018). Respecto a las condiciones para las operaciones de clase C, el reglamento queda sujeto a la expedición de las Normas y procedimientos recomendados expedidos por la OACI, haciendo énfasis de que se pueden autorizar este tipo de operaciones de carácter experimental y adicionalmente la AEROCIVIL se reserva el derecho de hacer seguimiento de las mismas con el fin de recopilar información que sea de utilidad para la regulación (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018).

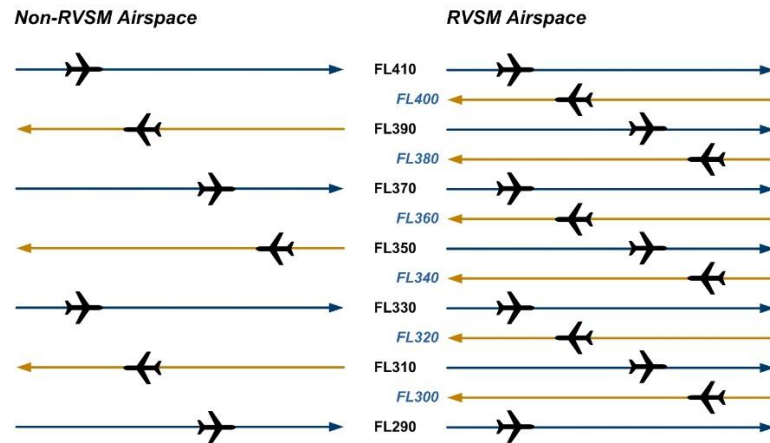
Dado que no se cuenta con una regulación explícita de la clase C, se resaltan algunos de los aspectos importantes de la clase B, la cual exige que el operador sea un piloto certificado para la operación de UAS y se requiere de una inscripción tanto del operador como del UAS ante a AEROCIVIL; dentro de las condiciones técnicas que debe tener el UAS se destaca de debe contar con un sistema de piloto automático, un sistema de navegación basado en satélites y un sistema de lanzamiento y de recuperación (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018).

### **5.3.2 Arquitectura y gestión del espacio aéreo**

El espacio aéreo civil se encuentra organizado verticalmente por líneas de vuelo FL, las cuales dividen el espacio en niveles que garantizan una separación espacial entre aeronaves que circulan. La nomenclatura utilizada es la altura en pies dividida en 100, por ejemplo la línea de vuelo a 21.000 pies es la FL210; La separación vertical mínima entre dos aeronaves debe ser de 1.000 pies por debajo de la FL290 y de 2.000 pies por encima de este nivel; para cierto tipo de aeronaves (que cumplan los estándares técnicos de los mínimos de separación vertical reducidos) entre la FL290 y la FL410 se permite la separación de 1.000 pies; por encima de la FL410 la separación vertical mínima es de 2.000 pies (Organización de Aviación Civil Internacional, 2016). De otra parte, los vuelos con rumbos en dirección este (entre 0° a 179°) transitan por líneas de vuelo impares (por ejemplo, FL290, FL310) y las aeronaves con rumbos en dirección oeste (entre 180° a 359°)

transitan por las líneas de vuelo pares (por ejemplo, FL300, FL320). Cuando se vuela por encima de la FL410, solo se vuela por líneas de vuelo impares: para rumbos en dirección este por las FL410, 450, 490, etc. y para rumbos en dirección oeste por las FL 430,470, 510, etc. (Organización de Aviación Civil Internacional).

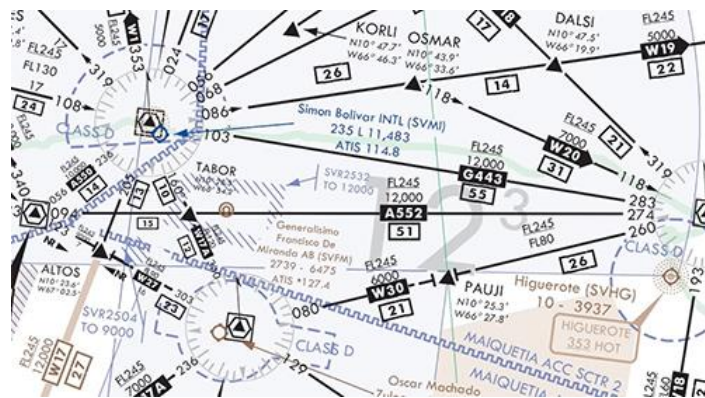
Imagen 7. Líneas de vuelo



Nota: Gráficos tomados de <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/73565/>

Horizontalmente se establecen las aerovías, los cuales son corredores o rutas aéreas entre puntos de ayuda a la navegación (VOR o NDB); en este plano se establecen unos mínimos de separación lateral y separación longitudinal. De forma muy general, la separación lateral entre aeronaves está determinada por una distancia (15 millas náuticas) y un ángulo mínimo medido desde un punto de control (entre 15° a 45°); la separación longitudinal se establece mediante una separación de tiempo (entre 3 y 15 minutos) o una separación en distancia (entre 10 y 20 millas náuticas) (Organización de Aviación Civil Internacional, 2016).

Imagen 8. Aerovías.



Nota: Gráficos tomados de <https://www.pasionporvolar.com/aerovias-como-son-y-como-funcionan/>.

Respecto a la altura mínima de vuelo para aeronaves tripuladas (sin tener en cuenta las maniobras de despegue o aterrizaje), esta debe ser mínimo de 1.000 pies en áreas pobladas medido desde el obstáculo más alto en un radio de 2.000 pies y para las demás áreas la altura mínima es de 500 pies sobre el nivel del suelo o el agua (Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil, 2020). En relación a los drones, estos pueden hasta 120 m de altura (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018).

Análogamente diversos autores han planteado el espacio aéreo a ser aprovechado por los drones con reglas y principios similares a los de la aviación civil convencional. Para el objeto de este estudio se adoptaron algunos conceptos de la arquitectura del espacio aéreo propuesta por el equipo de investigación U-Flyte de la universidad Maynooth. El modelo se plantea buscando asegurar una operación de drones eficiente y segura.

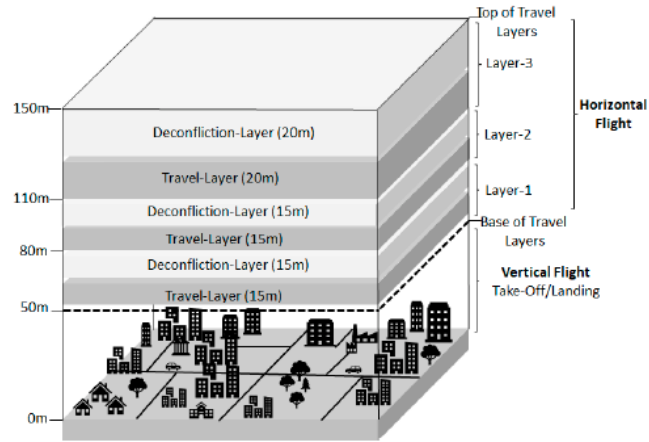
El primer aspecto hace referencia a la identificación y clasificación de tres zonas de restricción o prohibición de vuelo en función del uso del suelo y elementos existentes, las primeras zonas de prohibición hace referencia a lugares con infraestructura con una altura que pueda obstruir las trayectorias de vuelo o lugares donde al ser instituciones del estado o infraestructura critica no se permiten los vuelos; las segundas zonas son aquellas que requieren un permiso previo para sobrevolar, en estas se pueden clasificar las áreas donde no es deseable que vuelen drones, pero se pueden autorizar vuelos a ciertas horas del día, por ejemplo sobre colegios o estadios; por ultimo están las zonas de reserva temporal, que se caracterizan por ser áreas donde la exposición y la vulnerabilidad son relativamente bajos ya que hay baja actividad humana, como en zonas rurales, estas últimas zonas se pueden considerar como áreas abiertas para vuelos (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

El siguiente aspecto está relacionado con automatización de las operaciones aéreas, esto con el fin de poder atender múltiples operaciones simultáneamente, aumentando la eficiencia y disminuyendo el riesgo por la interacción y sincronización de múltiples pilotos. Prevalece la ventaja de tener un sistema que tiene y puede analizar información en tiempo real, así como predecir rutas y evitar posibles colisiones por la intersección de las trayectorias de vuelo y de ser necesario tomar decisiones para modificar las trayectorias lo que permite tener un sistema seguro, económico y flexible (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

En relación a la red se parte del enfoque básico de nodos y aristas adicionando una tercera dimensión vertical, similar a las líneas de vuelo en la aviación civil, creando múltiples capas de vuelo y capas para solucionar conflictos en las trayectorias. Se plantea una franja de vuelo entre los

50 m y 150 m con capas de 15 m de altura intercaladas entre capas de vuelo y capas de solución de conflictos (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

Imagen 9. Esquema de la estructura de capas del espacio aéreo.

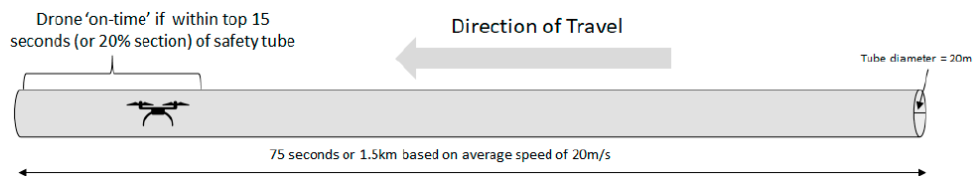


Nota: Gráficos tomados de (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

Para la gestión del tráfico aéreo se plantean 4 aspectos clave: crear una franja espaciotemporal de seguridad, solución de conflictos estratégica, solución de conflictos táctica y el manejo de situaciones de emergencia (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

Se propone un margen de seguridad espaciotemporal para los drones en vuelo que consiste en un tubo de un diámetro de 20 m con una longitud de 1.500 m que equivale a un dron viajando a 20 m/s; este tubo garantiza un espacio aéreo exclusivo para el dron en operación, evitando interferencias con otros vehículos; este tubo adicionalmente permite tener un margen en los horarios planificados de las rutas que se pueden retrasar por la naturaleza propia de la operación (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

Imagen 10. Tubo-Margen de seguridad.



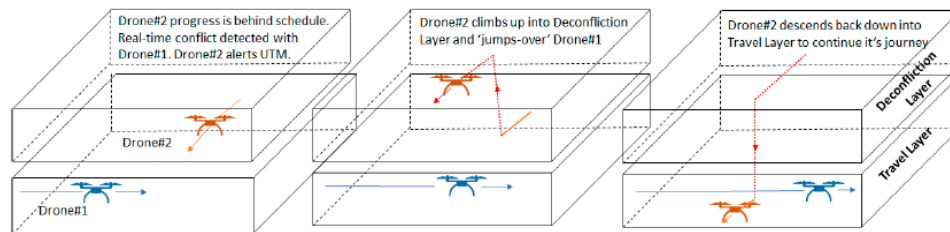
Nota: Gráficos tomados de (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

El segundo aspecto está relacionado con la planeación de los vuelos, al conocerse su origen y destino se plantea una primera trayectoria en línea recta entre los dos puntos, evaluando los

conflictos con áreas de no vuelo y trayectorias de otros drones. Se propone para los vuelos de mayor longitud utilizar los niveles de vuelos más elevados; en cuanto a las áreas de vuelo prohibidas se plantea generar una ruta que las rodee buscando una ruta optima mediante un algoritmo A\* y en relación al conflicto con otras trayectorias se busca solucionar en primera instancia mediante la modificación temporal de la ruta en el plano vertical generando un cruce a desnivel entre trayectorias o modificando el recorrido horizontal del dron (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

En tercer lugar, para dar solución a los conflictos que se presenten en tiempo real, los cuales se pueden presentar porque los drones no viajen dentro de las condiciones que se planearon, dicha situación se materializará cuando los drones se salgan de su tubo de seguridad, se formula elevar el dron a una capa de solución de conflictos y se buscara en tiempo real una nueva planificación de la ruta que se acople a la operación aérea del momento (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

*Imagen 11. Secuencia táctica de solución de conflictos.*



*Nota: Gráficos tomados de (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).*

Por último, las situaciones de emergencia se catalogan de origen interno o externo. Las de origen interno están relacionadas con la calidad de fabricación de los drones, por lo que drones certificados, revisados y con el correcto mantenimiento tienen un riesgo bajo de presentar emergencias, sin embargo, un sistema de propulsión de emergencias o un paracaídas de emergencia puede solucionar la situación de riesgo. Las situaciones de emergencia de carácter externo se pueden solucionar identificando el área de la emergencia y generando nuevos planes de vuelo, cancelación de vuelos o aterrizajes de emergencia en zonas de reserva temporal (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

Desde el aspecto concerniente al manejo y gestión de datos, se tiene la necesidad del acceso y procesamiento sea rápido y eficiente para dar un soporte en tiempo real. Por tal razón se plantea simplificar el espacio en celdas de 500 m x 500 m (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

## **5.4 Sistema de salud**

### **5.4.1 Tipos de muestras de sangre**

Para el control periódico de la diabetes tipo 2, se tiene como parámetro de evaluación la prueba de laboratorio de Hemoglobina glicosilada HbA1c, la cual mide el nivel promedio de glucosa en la sangre; por otra parte, para la detección de la malaria se puede realizar un examen de gota gruesa. Las dos pruebas de laboratorio mencionadas anteriormente se realizan mediante la toma de muestras de sangre capilar. Vale la pena aclarar que la prueba de HbA1c se realiza en pacientes que presentan un valor de HbA1c en rangos entre el 6.5% y 9% (Gerald J, 2017), para valores superiores es necesario realizar otro tipo de exámenes.

### **5.4.2 Procedimiento para la toma, conservación y transporte de muestras de laboratorio**

El instituto nacional de salud estableció los aspectos principales a tener en cuenta para la toma, conservación y transporte de muestras, se distinguen tres fases: pre-analítica, analítica y post-analítica (Instituto Nacional de Salud, 2019). La primera fase describe la toma y preparación de la muestra, donde se realiza el procedimiento para la toma de la muestra, rotulado e identificación de la muestra, conservación, almacenamiento y transporte en condiciones adecuadas; la segunda fase revisa la calidad de la muestra, que se encuentre en correctamente almacenada, conservada, rotulada y con la suficiente cantidad para ser evaluada; la tercera fase se caracteriza por entregar efectivamente los resultados a la persona identificada (Instituto Nacional de Salud).

Para la primera fase se establecen aspectos relacionados con la bioseguridad del personal que toma la muestra y aspectos relacionados con la muestra: tipo, recipiente de recolección, rotulado, conservación, transporte y remisión (Instituto Nacional de Salud, 2019).

En relación a los aspectos de bioseguridad, el Instituto Nacional de salud en el manual de procedimientos para la toma, conservación y envío de muestras al laboratorio nacional de referencia, en el capítulo 7 menciona los aspectos a tener en cuenta para no poner en riesgo al personal que recolecta la muestra o quien esté en contacto con ella, estableciendo el uso de barreras físicas como guantes, batas, etc.; de igual forma plantea medidas complementarios como la inmunización mediante vacunas al personal encargado.

Como actividad preliminar a la toma de la muestra de sangre es fundamental rotular las láminas identificando como datos mínimos: el nombre y apellido del paciente, número de identificación, nombre del examen solicitado y la fecha de toma de la muestra.

Para la prueba de hemoglobina glicosilada HbA1c existen diversos tipos de exámenes que pueden ser realizados a partir de la sangre capilar, la cual es obtenida punzando el dedo anular del paciente con una lanceta puntiaguda; para la prueba se requieren en promedio de 1 a 5 µml de sangre, la cual es depositada en un filtro o empaque el cual es suministrado por el fabricante (Whitley, Yong, & Rasinen, 2015). Este tipo de pruebas se conocen como point of care (POC) ya que arrojan resultados rápidamente a partir de la colocación de la muestra de sangre en un equipo especializado el cual no requiere de personal calificado para su manejo; algunos de los métodos de ensayo son: Bayer A1CNow, Axis-Shield Afinion y Siemens DCA Vantage; estos se caracterizan por estar certificados por el National Glycohemoglobin Standardization Program (NGSP) (Whitley, Yong, & Rasinen).

Para la prueba de la malaria el examen al que se hizo referencia fue el de gota gruesa. Para este examen se toman dos láminas para la recolección de las muestras. En este examen se obtiene la sangre punzando el dedo anular del paciente con una lanceta puntiaguda, la primera gota se deja caer y la segunda y tercera gota son dispuestas en la lámina portaobjeto con una distancia entre ella de 0.5cm y procurando llenar con cada gota de sangre un cuadro de 1cmx1cm, este proceso se repite para tener una muestra de seguridad y que eventualmente pueda ser trabajada en caso de que ocurra algún imprevisto con la primera lamina (Instituto Nacional de Salud, 2017).

Una vez la muestra este seca y correctamente dispuesta esta se empaqueta en una caja para transporte de láminas portaobjeto en polipropileno (Instituto Nacional de Salud, 2019). Respecto a las condiciones de almacenamiento esta tiene que conservarse a temperatura ambiente (4°C a 37°C), protegiéndola de agentes externos que la puedan contaminar; por las características de la muestra no se especifica un tiempo máximo para que esta pueda ser analizada (Instituto Nacional de Salud).

Las muestras de sangre deben ser conservadas a temperatura ambiente y se deben transportar en un triple embalaje de acuerdo a las normas IATA, para tipo de muestras categoría B, este consiste en un primer recipiente individual el cual debe ser impermeable, hermético, resistente, a prueba de fugas y debidamente identificado, este recipiente se protege con un material absorbente que sea capaz de contener las muestras en caso de derrame; un segundo recipiente debe ser impermeable, resistente y a prueba de fugas el cual contiene varias muestras individuales; por último un embalaje externo el cual protege a los envases primarios y secundarios de alteraciones físicas, este último debe tener unas dimensiones mínimas de 10cm x 10cm y debe estar marcado e identificado (Instituto Nacional de Salud, 2019).

## 5.5 Marco geoestadístico

El departamento administrativo nacional de estadística DANE tiene como una de sus estrategias la integración estadística e información espacial, en donde estableció el marco geoestadístico nacional como la referencia espacial obligatoria en el desarrollo del proceso estadístico. Dentro de sus objetivos se encuentran fortalecer el proceso de producción estadística, mejorar la calidad del intercambio, interoperabilidad, integralidad y aprovechamiento de las mismas. Dentro del marco se definen cuatro divisiones cartográficas de interés las cuales son sección rural y urbana; sector rural y urbano. A continuación, se citan las entidades definidas por el autor (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2020).

- Sección Rural: extensiones geográficas en promedio de 20 kilómetros cuadrados, las cuales se encuentran delimitadas por límites político-administrativos, así como por elementos naturales y culturales del paisaje.
- Sección Urbana: agrupación la cual tiene en promedio de 20 a 22 manzanas contiguas y pertenecientes al mismo sector urbano.
- Sector Rural: es la mayor división cartográfica para el área rural la cual corresponde a extensiones geográficas en promedio de 100 kilómetros cuadrados, las cuales se encuentran delimitadas por límites político-administrativos, así como por elementos naturales y culturales del paisaje.
- Sector Urbano: es la mayor división de agregación definido dentro del perímetro censal de las cabeceras municipales y centros poblados.



## Capítulo VI

### Resultados y Contribución

#### 6.1 Diagnóstico

##### 6.1.1 Determinación de los servicios relacionados con el transporte de pruebas de laboratorio a evaluar

En términos generales, las muestras de sangre son una ayuda diagnóstica con la cual se pueden evaluar diferentes parámetros que permiten identificar alteraciones del cuerpo y así dar criterios para valorar o determinar el padecimiento de una enfermedad en particular. En consecuencia, el acceso a este servicio de salud es indispensable y básico para la prevención, diagnóstico y tratamiento de una gran cantidad de enfermedades.

Para determinar y limitar los casos de estudio del presente documento, en primer lugar, se tuvo en cuenta estudios previos relacionados con el transporte de pruebas de laboratorio clínico por medio de drones; Las enfermedades relacionadas en los documentos son: las transmitidas por vectores, cáncer de cuello uterino, VIH y diabetes Mellitus tipo 2.

De otra parte, se recolectaron y analizaron estadísticas del DANE, relacionadas con las causas de defunciones ocurridas en Colombia entre los años 2011 y 2020. Esta información resume y clasifica las defunciones en función de un listado de 105 causas de muerte. Se agrupó la información entre el año 2011 y 2020 se visualizaron las primeras causas de muerte en Colombia donde se destaca la diabetes como la sexta causa de muerte en Colombia (3.4% del total de muertes)<sup>1</sup>.

En tercer lugar, existen eventos o enfermedades que, por su naturaleza y capacidad de convertirse en una epidemia, son eventos de interés en salud pública, requieren de la vigilancia y monitoreo por parte del sistema de salud, entre otros son: Dengue, Chikungunya y Malaria.

Teniendo en cuenta los tres aspectos mencionados anteriormente, se determinó para este estudio la Diabetes y la Malaria como eventos o enfermedades a evaluar.

##### 6.1.2 Demanda de los servicios del sistema de salud

La demanda en salud puede definirse como “como la población que de acuerdo a una necesidad de atención requiere o potencialmente revela un consumo de servicios de salud” (Ministerio de Salud

---

<sup>1</sup> Información estadística. Defunciones por grupos de edad y sexo, según departamentos de residencia y grupos de causas de defunción (lista Colombia 105 para la tabulación de mortalidad). (Departamento Nacional de estadística DANE, 2011-2019)

y Protección Social, 2016, pág. 29). Esta demanda es no es una demanda homogénea, sino que responde a diversos factores y orígenes, por lo que la modelación de la demanda se define en cuatro grupos: demanda inducida, demanda por percepción de la enfermedad, demanda por acceso a salud y demanda efectiva (Ministerio de Salud y Protección Social).

Teniendo en cuenta que dentro del alcance del estudio no se encuentra determinar una demanda real de los servicios de salud y reconociendo que este es un problema complejo que requiere un análisis exhaustivo y detallado por parte de profesionales en salud, para fines del estudio y para estimar una demanda de forma conceptual la cual será usada en los diferentes modelos a evaluar solo se tendrá en cuenta la demanda inducida la cual está determinada por el número de actividades que se debe realizar a un grupo de población de intervención y la población que está incluida en el servicio de salud (Ministerio de Salud y Protección Social, 2016).

Para el caso de la diabetes tipo 2 el examen clínico que fue estudiado es el de Hemoglobina glicosilada (HbA1c), este es un examen de control que se realiza con una periodicidad de 3 meses a los pacientes diagnosticados con la enfermedad, con el fin de evaluar la efectividad del tratamiento de la enfermedad (Ministerio de Salud, 1999). La población objetivo se calculó teniendo en cuenta el nivel de prevalencia del 7.4% en los hombres y 8.7% en las mujeres.

En cuanto a la Malaria, la estimación de la demanda se calculó teniendo en cuenta el número de eventos de la región seleccionada, sumando un porcentaje del 60% que corresponde a los casos que no son registrados o reportados (Instituto Nacional de Salud, 2010). Adicionalmente la evaluación de este evento no se realizó con el fin de satisfacer la demanda sino de aumentar la cobertura para el diagnóstico de esta enfermedad por las características epidemiológicas de la malaria y los principios de vigilancia activa por parte del sistema de salud.

### **6.1.3 Población**

De acuerdo con el censo nacional de población y vivienda realizado en el año 2018 (CNPV 2018) Colombia para el año 2018 tenía una población de 48.258.494 millones de personas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2018). A partir de información recolectada en el censo y en estadísticas vitales del año 2018 (EEVV 2018)<sup>2</sup> se realizó una identificación y análisis cualitativo y cuantitativo de las variables a nivel departamental indicadas a continuación: población, área, número de defunciones causadas por diabetes y número de eventos de malaria. De otra parte, se

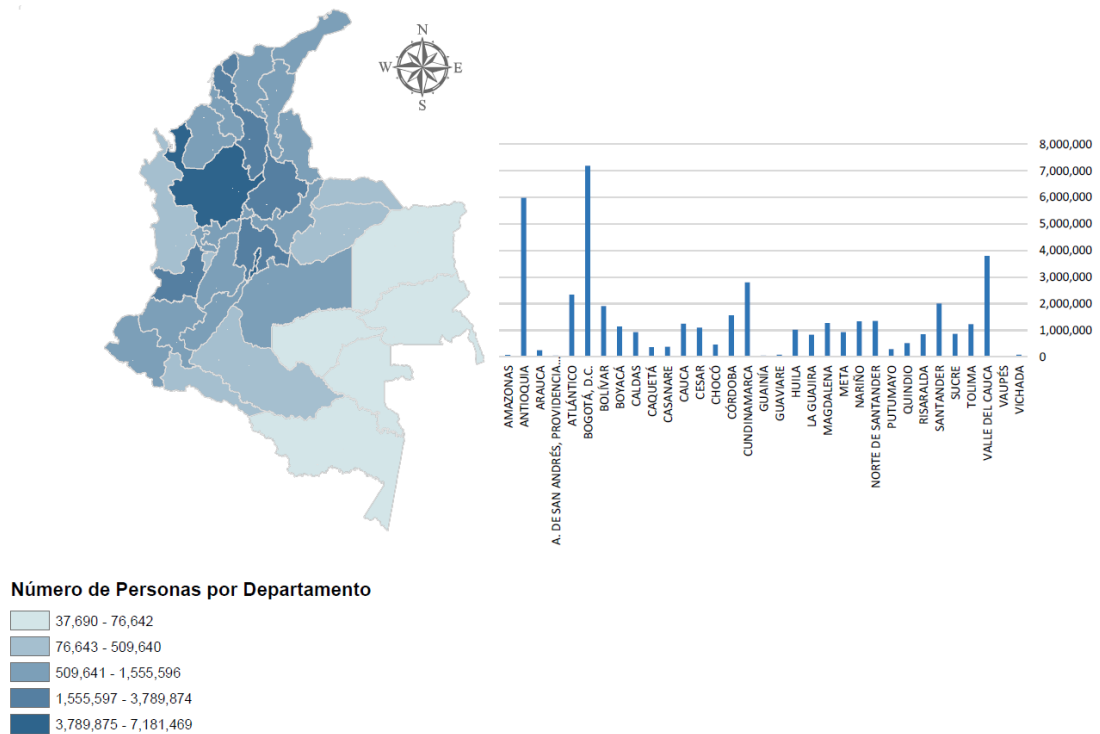
---

<sup>2</sup> (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2019)

calculó la densidad poblacional y número de muertes o eventos por cada 1.000.000 habitantes causadas por las enfermedades a estudiar.

Respecto a la población colombiana, esta se distribuye principalmente sobre la región Andina, Pacífica y Atlántica. La mayor concentración de personas por departamento se concentra en Bogotá, Antioquia, Valle del Cauca y Cundinamarca donde se encuentra el 45% del total de los habitantes. Menores concentraciones de población se registran en la región de Orinoquia y Amazonia.

Imagen 12. Número de personas por departamento.

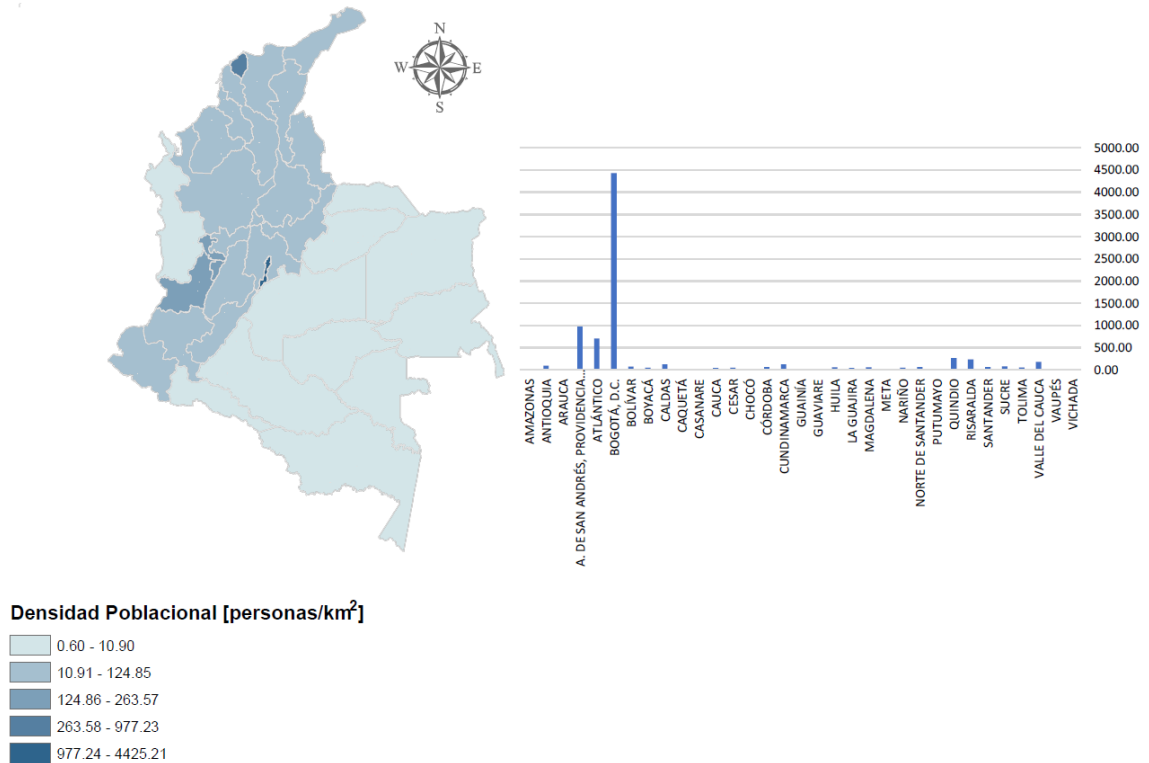


Nota: Gráficos generados a partir de información del CNPV 2018.

Analizando el componente espacial, se calculó la densidad poblacional a nivel departamental como el número de personas dividido el área del departamento. Se observa un comportamiento similar a la distribución de población donde se observa una mayor densidad poblacional en la región andina, atlántica y pacífica (exceptuando Chocó); diez departamentos tienen una densidad poblacional menor a 11 personas/Km<sup>2</sup>, pero estos representan espacialmente el 60% de Colombia. De otra parte, se encontró que 27 de los 33 departamentos tienen una densidad poblacional promedio menor que 125 personas/Km<sup>2</sup>. Se destaca Bogotá como el lugar con la más alta densidad poblacional con

un promedio de 4426 personas/Km<sup>2</sup>. Se aclara que en áreas urbanas se pueden presentar mayores densidades que las calculadas.

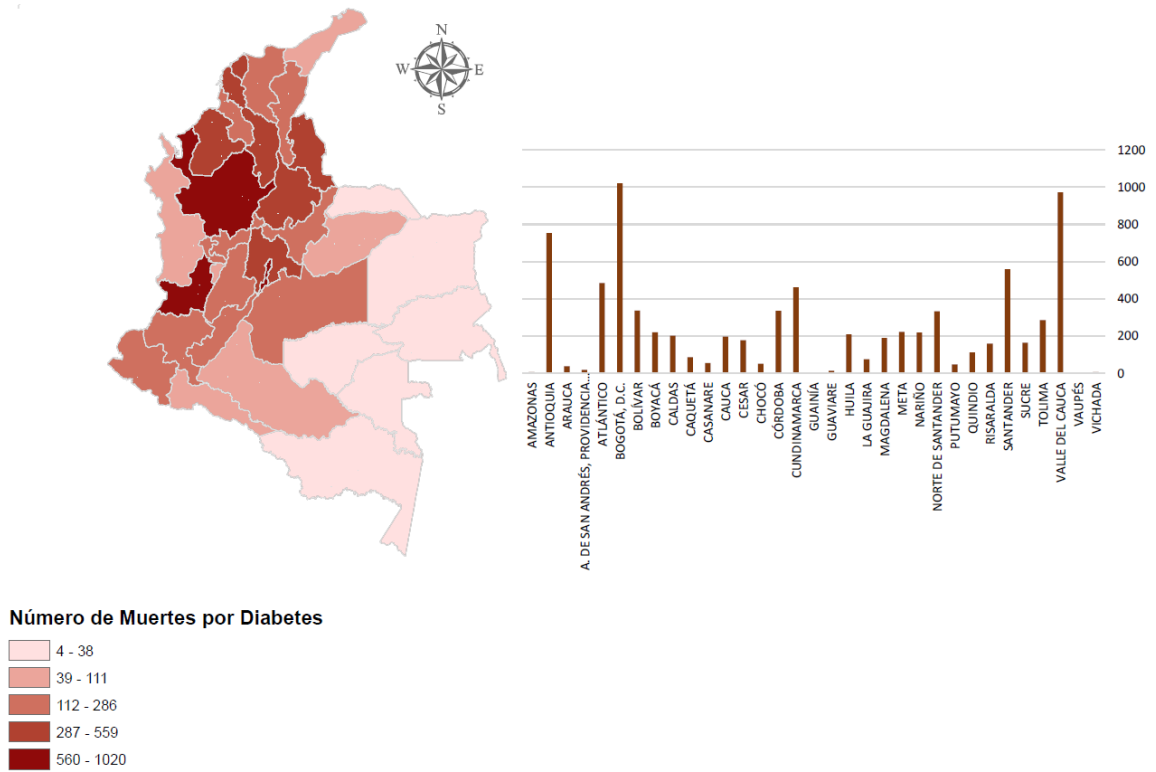
Imagen 13. Densidad poblacional por departamento.



Nota: Gráficos generados a partir de información del CNPV 2018.

De otra parte, la diabetes mellitus tipo 2 en Colombia, en términos prácticos, tiene una prevalencia del 7.4% en hombres y del 8.7% en mujeres mayores de 30 años; esta enfermedad tiene mayor incidencia en la población urbana que en la rural, lo cual está asociado entre otras causas al estilo de vida y los hábitos que se pueden distinguir entre estos dos grupos (Aschner, 2010). En relación con el registro de muertes causadas por esta enfermedad para el año 2018 se reconocieron 8018 muertes, estas presentan una alta dependencia de la variable población con un coeficiente de correlación de 0.87. Se presentan valores elevados respecto a la estadística nacional en Antioquia, Valle del Cauca y Bogotá.

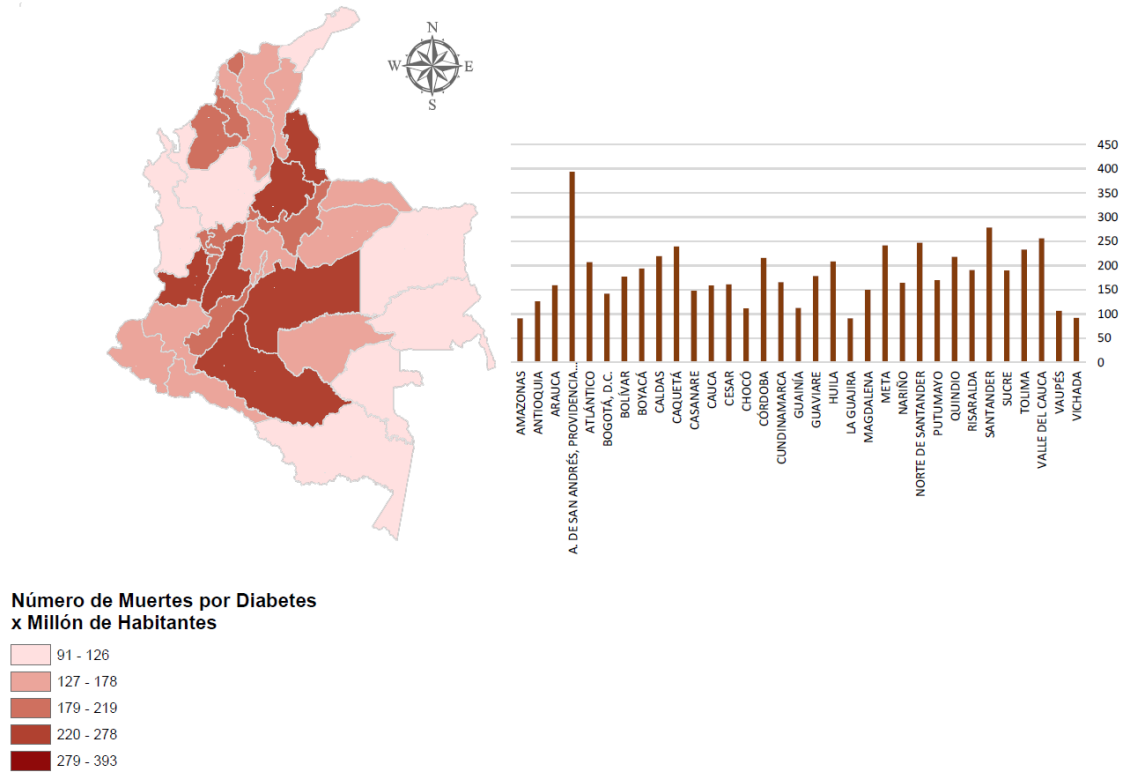
Imagen 14. Número de muertes por diabetes mellitus tipo 2.



Nota: Gráficos generados a partir de información del EEVV 2018.

El promedio a nivel departamental por millón de habitantes fue de 183 muertes, se resalta el número elevado de muertes en el departamento de San Andrés con 393 muertes por millón de habitantes; otros departamentos con cifras elevadas son Caquetá, Meta, Norte de Santander, Santander, Tolima y Valle del Cauca.

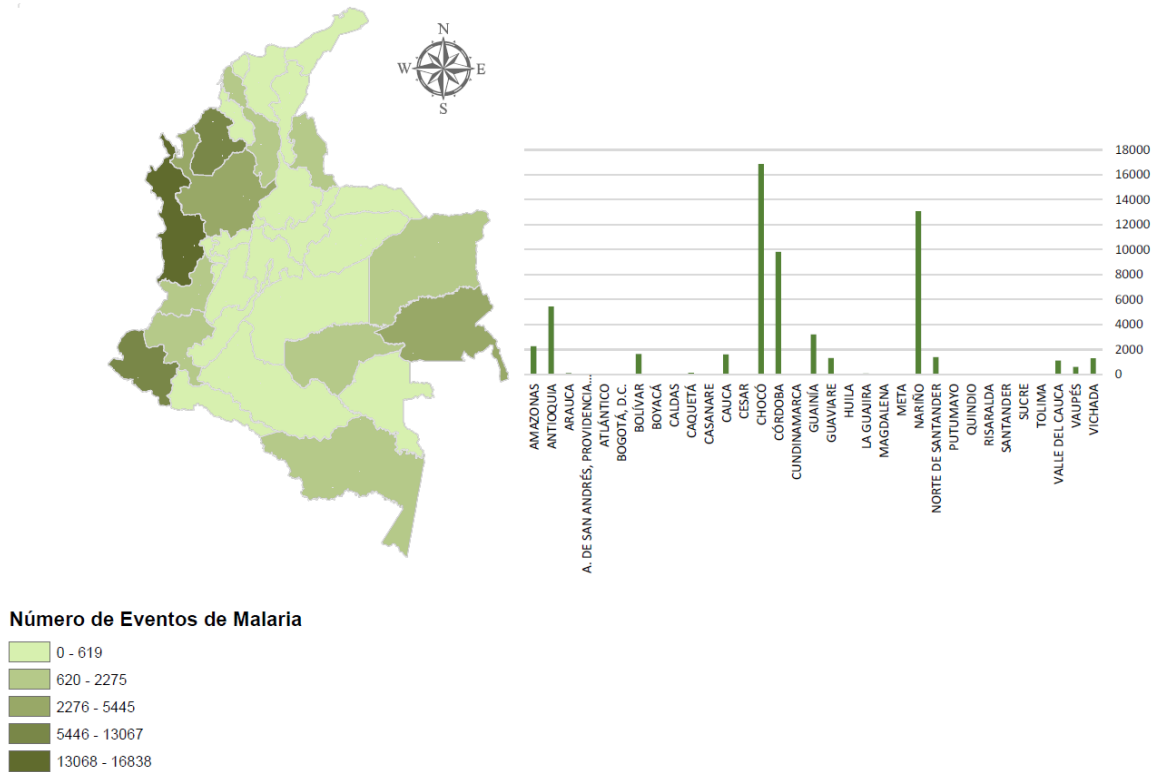
Imagen 15. Número de muertes por diabetes mellitus tipo 2.



Nota: Gráficos generados a partir de información del EEVV 2018.

En cuanto a la malaria en Colombia, se identifica este como un problema crítico en la salud pública ya que el 85% del territorio rural colombiano se encuentra por debajo de los 1600m y presenta las condiciones climáticas, geográficas y epidemiológicas en las que se puede transmitir la enfermedad (Padilla, Rico, & Usta, 2001). Para el año 2018 El instituto Nacional de Salud a nivel departamental registró un total de 60.342 eventos de malaria, respecto al año 2017 se registró un aumento del 14.6%; el 54% de los casos procedieron de la región pacífica, reportando la mayoría de casos en los departamentos del Chocó y Nariño, también se resalta el número elevado de casos en el departamento de Córdoba resaltando la alta concentración en el municipio de Tierralta donde se identificaron el 10% del total de casos a nivel nacional. (Instituto Nacional de Salud, 2018).

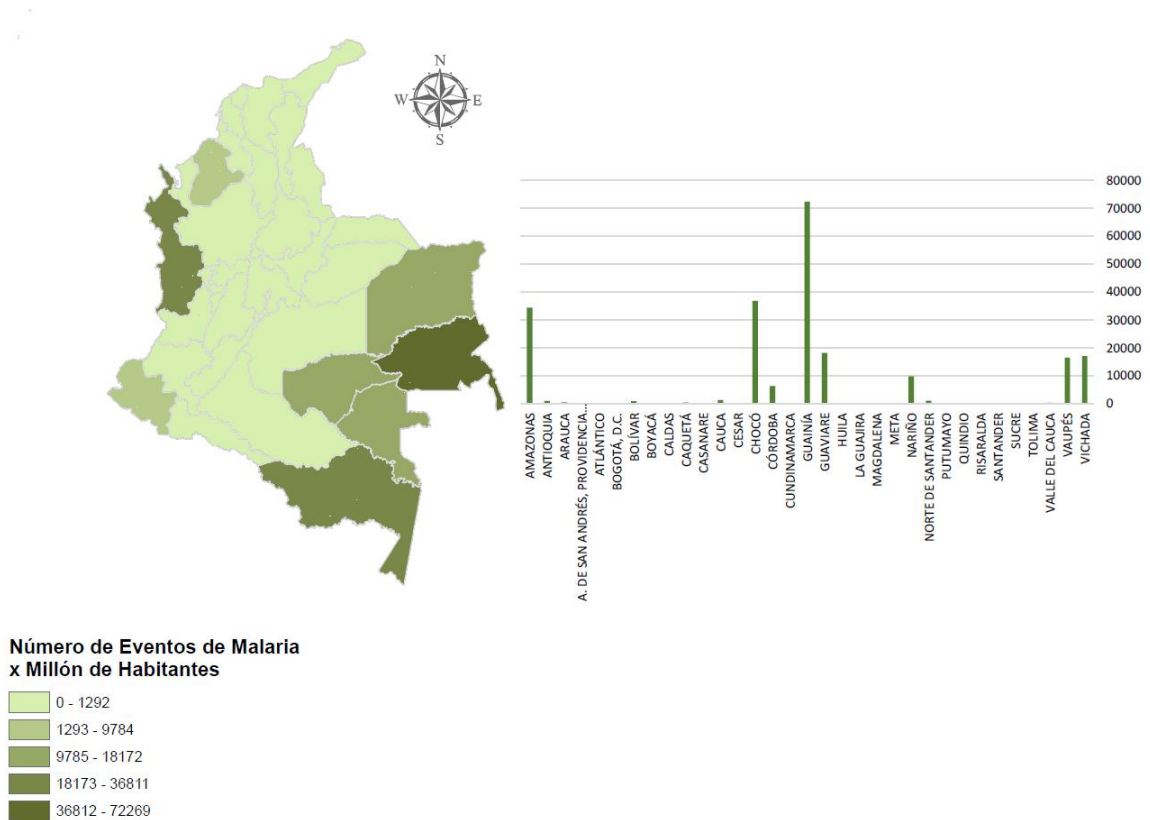
Imagen 16. Número de eventos de malaria.



*Nota: Gráficos generados a partir de información del Instituto Nacional de Salud. Sistema de vigilancia en salud pública SIVIGILA 2018*

El número de casos por millón de habitantes evidencia una mayor incidencia en las regiones de Orinoquia y Amazonas. Los departamentos con mayor número de eventos por millón de habitantes son Guaviare con 72269, Chocó con 36811 y Amazonas con 34440 registros.

Imagen 17. Número de eventos de malaria por millón de habitantes.



*Nota: Gráficos generados a partir de información del Instituto Nacional de Salud. Sistema de vigilancia en salud pública SIVIGILA 2018*

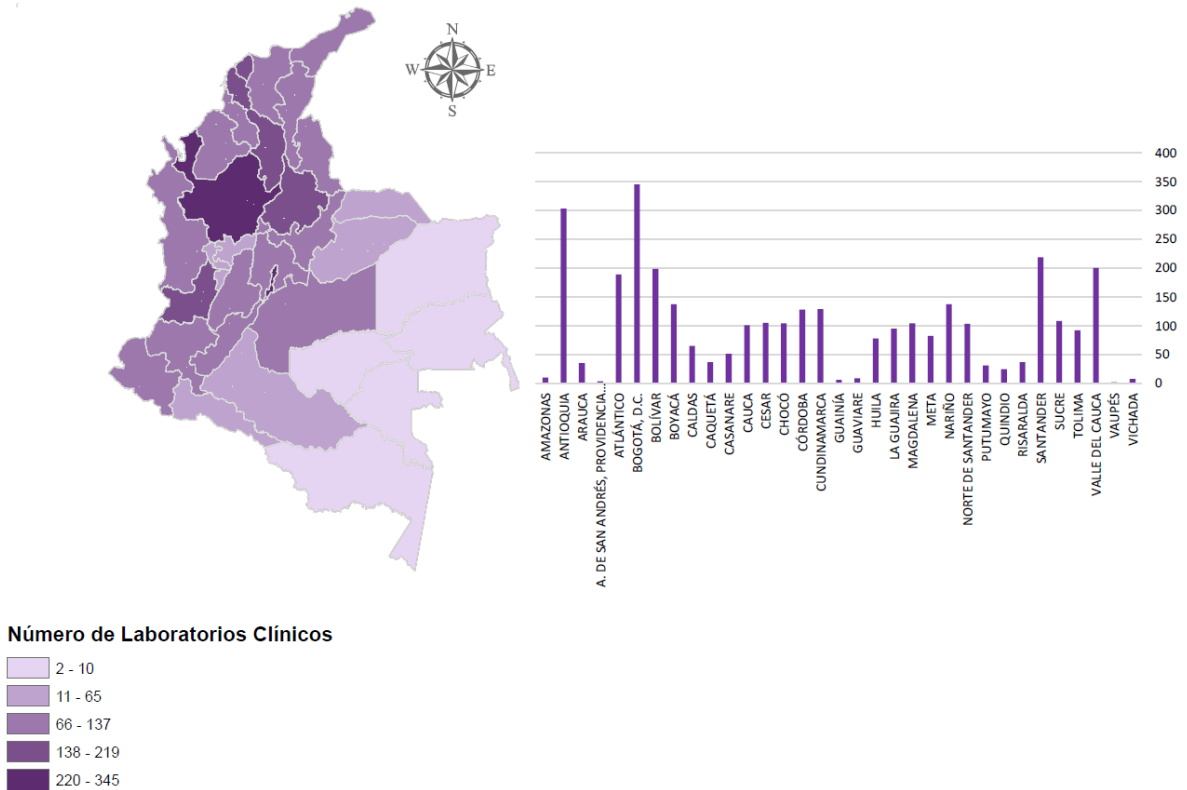
#### 6.1.4 Laboratorios clínicos del sistema de salud

En Colombia para el año 2020 se registró un total de 3278 de laboratorios clínicos, estos agrupan tanto las entidades públicas como privadas (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020). Dentro de estas instalaciones son de importancia 33 laboratorios ya que estos son los laboratorios de salud pública con los que cuenta el sistema de salud colombiano, estos se encuentran distribuidos con una sede a nivel departamental.

Para el año 2018 los laboratorios fueron evaluados en dos aspectos: misional y de capacidades básicas, en lo que refiere al aspecto misional de la vigilancia de la salud pública 9 laboratorios cumplieron, 23 cumplieron parcialmente y el departamento de Vaupés no cumplió con este aspecto; de otra parte respecto a las capacidades básicas que hacen referencia a la infraestructura física, equipamiento, talento humano, sistemas de información, gestión del conocimiento y gestión de calidad el diagnóstico o desempeño a nivel nacional se puede generalizar como deficiente (Ministerio de Salud y Protección Social, 2019).



Imagen 18. Número de laboratorios clínicos.

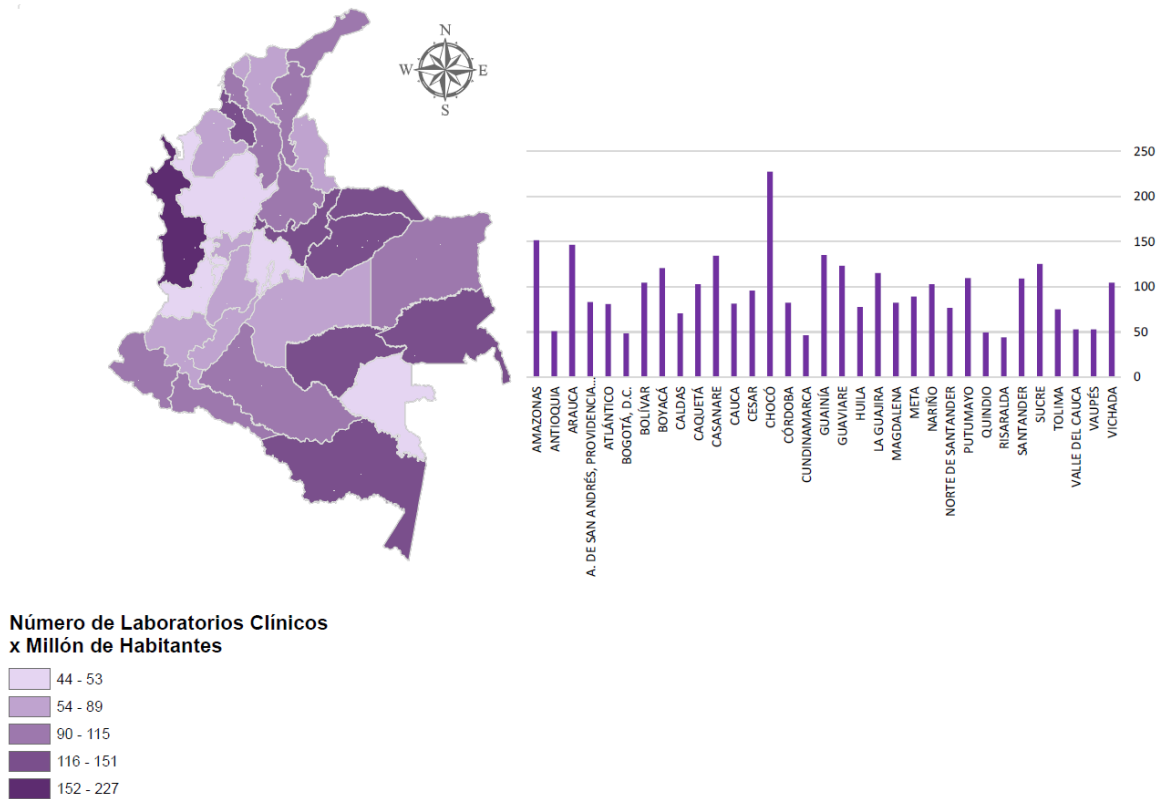


*Nota: Gráficos generados a partir de información del Instituto Nacional de Salud. Sistema Integrado de Información de la Protección Social SISPRO.*

En relación a las estadísticas nacionales, se observa un nivel de correlación entre la población y el número de laboratorios ( $R^2=0.84$ ), por lo que a nivel departamental se observa una distribución similar a la de la población la cual se concentra en las regiones andina, pacífica y caribe.

En cuanto al número de laboratorios por millón de habitantes se observa mayores concentraciones en departamentos del Chocó, Guaviare y Amazonas, lugares que se caracterizan por tener mayor número de casos por millón de habitantes de malaria.

Imagen 19. Número de laboratorios clínicos por millón de Habitantes.



Nota: Gráficos generados a partir de información del Instituto Nacional de Salud. Sistema Integrado de Información de la Protección Social SISPRO.

Adicionalmente existen instalaciones donde solamente se realiza la toma de muestras, sumando estos últimos con los laboratorios clínicos suman 6111 lugares donde sería posible la recolección de muestras; para este estudio en la fase de diagnóstico no se tuvieron en cuenta las instalaciones de toma de muestras ya que el destino final de una muestra de sangre es un laboratorio clínico donde va a ser analizada, de otra parte el nivel de cobertura entre laboratorios y lugares de toma de muestras no presenta una variación mayor al 9%, valor que se considera bajo teniendo en cuenta que el número de lugares de toma de muestras es similar al número de laboratorios clínicos. Sin embargo, estos lugares fueron tenidos en cuenta para como posibles nodos dentro de la red del modelo logístico propuesto.

## 6.1.5 Red vial colombiana

### 6.1.5.1 Velocidad de diseño las carreteras

La red vial colombiana se clasificó de acuerdo a su funcionalidad y por el terreno donde se desarrolla. Teniendo en cuenta su funcionalidad, las carreteras se clasificaron en tres categorías:

primarias, secundarias y terciarias; De otra parte, la clasificación del terreno se dio de acuerdo a la pendiente predominante de la vía distinguiendo terrenos planos, ondulados, montañosos y escarpados (Instituto Nacional de Vías, 2008). Teniendo en cuenta la clasificación y tipo de terreno, las carreteras tienen una velocidad de diseño la cual busca mantener equilibrio entre el nivel de servicio ofrecido y las condiciones económicas de Colombia (Instituto Nacional de Vías). Teniendo en cuenta los criterios anteriormente expuestos se presenta en la Tabla 1 las velocidades de diseño para los diferentes tipos de carreteras.

*Tabla 1. Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos (VTR) en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno*

<b>Categoría de la carretera</b>	<b>Tipo de terreno</b>	<b>Rango velocidad de diseño (Km/h)</b>
<b>Primaria</b>	Plano	80-110
	Ondulado	70-110
	Montañoso	60-100
	Escarpado	60-90
<b>Secundaria</b>	Plano	60-80
	Ondulado	50-80
	Montañoso	40-70
	Escarpado	40-60
<b>Terciaria</b>	Plano	40
	Ondulado	30-40
	Montañoso	20-40
	Escarpado	20-30

*Nota: Tabla generada a partir de los criterios del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*

Adicionalmente la red vial está compuesta por las vías urbanas. Para efectos de este estudio y dada la escala de análisis, Las vías urbanas se pueden distinguir entre vías arteriales y vías locales. Teniendo en cuenta esta clasificación y de acuerdo a lo dispuesto en el Código Nacional de Tránsito Terrestre-Ley 769,2002 (Poder Público - Rama Legislativa, 2002), los límites de velocidad en vías urbanas son de 60 Km/h y de 30Km/h para zonas escolares y residenciales.

Como parámetro adicional, respecto a la superficie de la carretera las vías primarias tienen que ser pavimentadas, las secundarias pueden ser pavimentadas o en afirmado y las vías terciarias en afirmado (Instituto Nacional de Vías, 2008); este criterio está relacionado con las

características geométricas y velocidad de diseño que debe cumplir la vía más que con la funcionalidad de la misma.

### 6.1.5.2 Clasificación de la red vial

Para generar la red vial y clasificarla se utilizó como base la cartografía básica escala 1:100.000 de IGAC<sup>3</sup>; la información se encuentra en formato shape el cual cuenta con atributos para cada segmento vial, entre esto clasifica las vías de acuerdo a sus características físicas, geométricas y funcionales en 8 grupos y las define como se presenta en la Tabla 2; adicionalmente se propuso una relación entre estas características, la superficie de rodadura y los parámetros relacionados con la velocidad de diseño de las carreteras, asignando una velocidad para cada tipo de vía.

Tabla 2: Clasificación de la red vial y asignación de velocidad en función del tipo de vía

Tipo de vía	Definición	Clasificación	Velocidad (Km/h)
<b>Vía tipo 1</b>	“Vía pavimentada, más de dos carriles para el tráfico vehicular, animal o personas, cuyo ancho excede de 5m.”	Primaria	80
<b>Vía tipo 2</b>	“Vía Sin Pavimentar, más de dos carriles, para el tráfico vehicular, animal o personas, cuyo ancho excede de 5m.”	Secundaria o terciaria	20
<b>Vía tipo 3</b>	“Vía Pavimentada y angosta, Transitable todo el año, cuyo ancho es inferior o igual a 5m.”	Secundaria	60
<b>Vía tipo 4</b>	“Vía Sin Pavimentar y angosta, para el tráfico vehicular, animal o personas, cuyo ancho es inferior o igual a 5m.”	terciaria	20
<b>Vía tipo 5</b>	“Carreteable transitable en tiempo seco, para el tráfico vehicular, animal o personas.”	terciaria	15
<b>Vía tipo 6</b>	“Carreteable sin afirmado, para el tráfico vehicular, animal o personas.”	terciaria	10
<b>Camino, sendero</b>	“Camino rural para el tráfico de personas y animales.”		1
<b>Peatonal urbana</b>	“Vía presente en la zona urbana exclusiva para tránsito de personas”		1

*Nota: definiciones tomadas catálogo de objetos geográficos de la cartografía básica 1:100.000 (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016).*

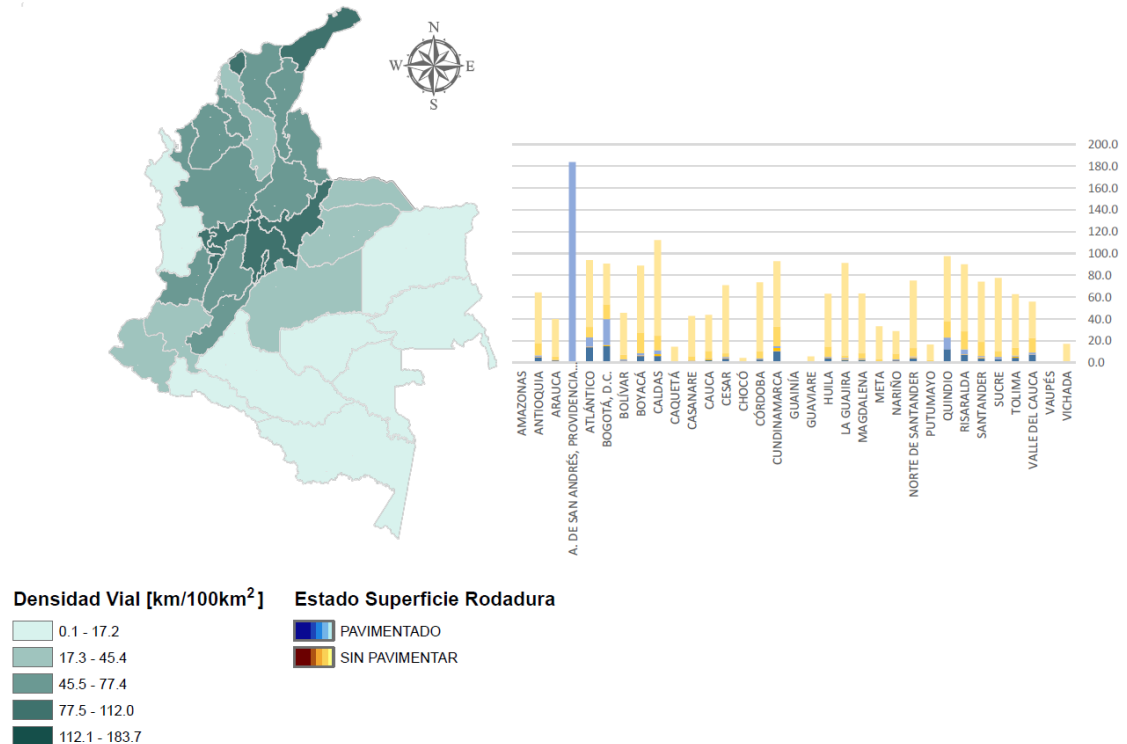
<sup>3</sup> Base de datos vectorial básica. Colombia. Escala 1:100.000. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC,2019)

### 6.1.5.3 Estadísticas de la red vial

De acuerdo con (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2019) Colombia tiene 385.000 Km de vías, de los cuales el 7.2% tiene una superficie de rodadura pavimentada. Teniendo en cuenta los 8 tipos de vías se estimó una densidad promedio de 58 km/100km<sup>2</sup>, particularmente las vías pavimentadas tienen una densidad de 6 km/100km<sup>2</sup>, este último valor se encuentra por encima del promedio de vías pavimentadas de 17 países de Latinoamérica el cual era para el año 2015 de 3 km/100km (Comisión Económica para America Latina y el Caribe, 2018).

Las mayores densidades viales se presentan en los departamentos centrales de Colombia, y en el Caribe en San Andrés, La Guajira y Atlántico. Bogotá cuenta con una red vial pavimentada cercana al 50% por lo que los indicadores de densidad vial a pesar de que son superiores a los de la región, los cuales oscilan en el 18% (Comisión Económica para America Latina y el Caribe), no indica una calidad de la infraestructura vial ya que la mayoría de esta no cuenta con una superficie de rodadura pavimentada, de otra parte, no toda la red vial pavimentada se encuentra en buen estado.

Imagen 20. Densidad vial y estado de la superficie de rodadura.



Nota: Gráficos generados a partir de información de la cartografía básica 1:100.000.

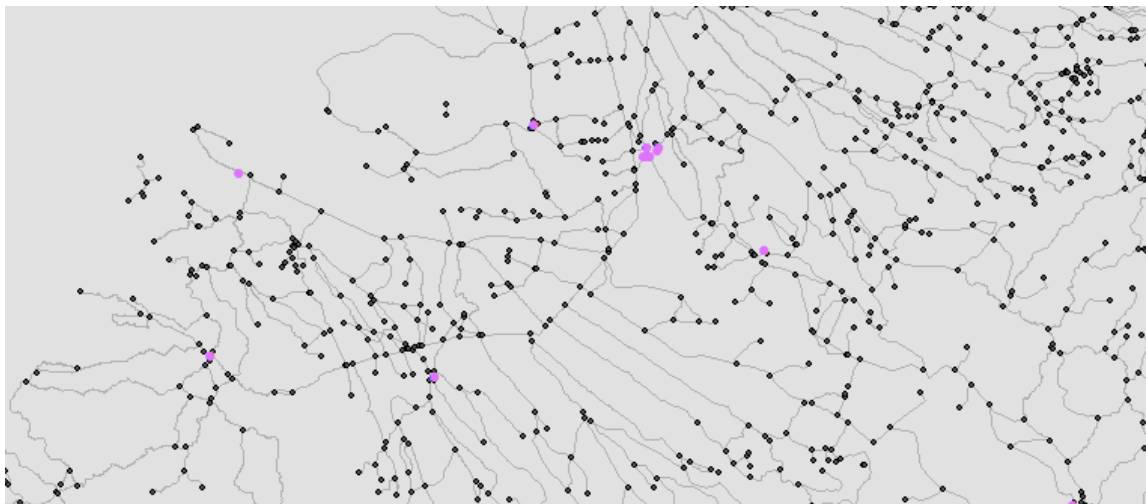
### 6.1.6 Cobertura y acceso al servicio de toma de muestras de laboratorio clínico

A partir de la cartografía vial y de la ubicación de los laboratorios clínicos se generó un área de servicio para cada uno de ellos, con el fin de evaluar un nivel de accesibilidad a estos puntos; este análisis se realizó en el software ArcGIS, a partir de la herramienta de análisis de redes.

El elemento o variable de costo analizada fue el tiempo. Se establecieron niveles de accesibilidad para los laboratorios en espacios de tiempo de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora y 2 horas. Estos intervalos se establecieron suponiendo que el viaje total para ir a tomarse los exámenes es un viaje de ida y vuelta; para el caso más crítico que es el de 2 horas, se contempló un viaje total de 4 horas más un estimado de 1 hora en el tiempo de atención para un tiempo total de 5 horas, mayores valores no se analizaron ya que se volvería una actividad con una limitante o barrera de tiempo, teniendo en cuenta que las velocidades de los segmentos viales asignadas son de diseño mas no de operación por otra parte no tienen en cuenta los horarios del transporte público, el cual presenta por lo general frecuencias más bajas en zonas rurales y de baja densidad poblacional.

En primer lugar, se generó la red a partir de la cartografía vial, generando un nodo en la red en cada intersección de la misma, la distancia fue determinada por la geometría de cada segmento y se le asignó una velocidad y jerarquía a cada tramo de acuerdo a la clasificación vial de la Tabla 2. No se le asignaron restricciones de giro y se permitió el flujo en la red en las dos direcciones para cada uno de los tramos.

*Imagen 21. Red de grafos.*

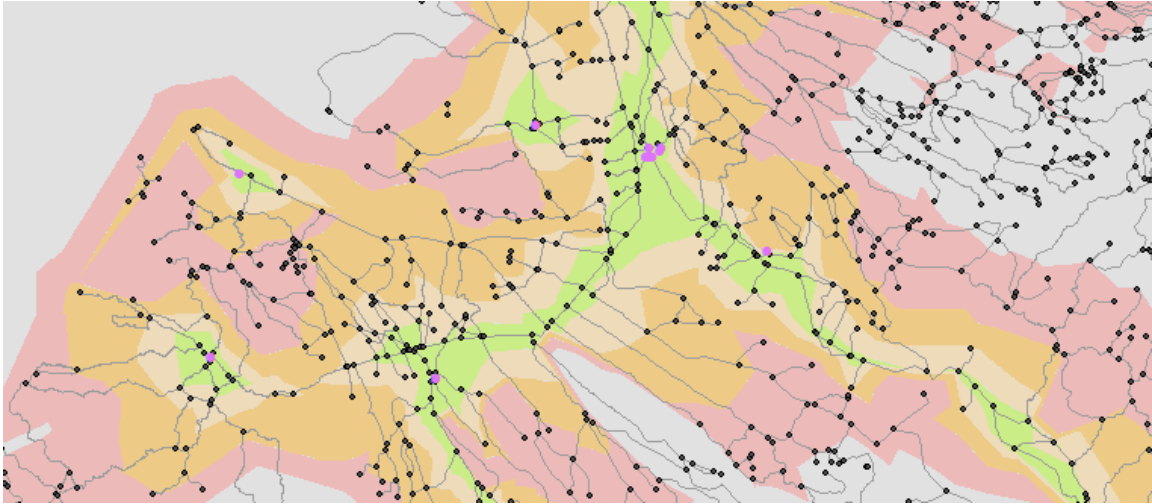


*Nota: se presenta solo una sección de la red con fines ilustrativos. Arcos en color gris representando los segmentos viales, los puntos en color negro son los nodos y los puntos en color morado son los laboratorios clínicos.*

Dentro de la red se asignó la localización de los laboratorios al punto más cercano de la red, con una tolerancia de búsqueda de 500m, asumiendo este valor como una distancia aceptable para un viaje caminando.

Teniendo en cuenta que el análisis deseado era a nivel general para realizar una evaluación a nivel nacional, no se agregaron restricciones a la red vial o elementos que pudieran generar un costo agregado.

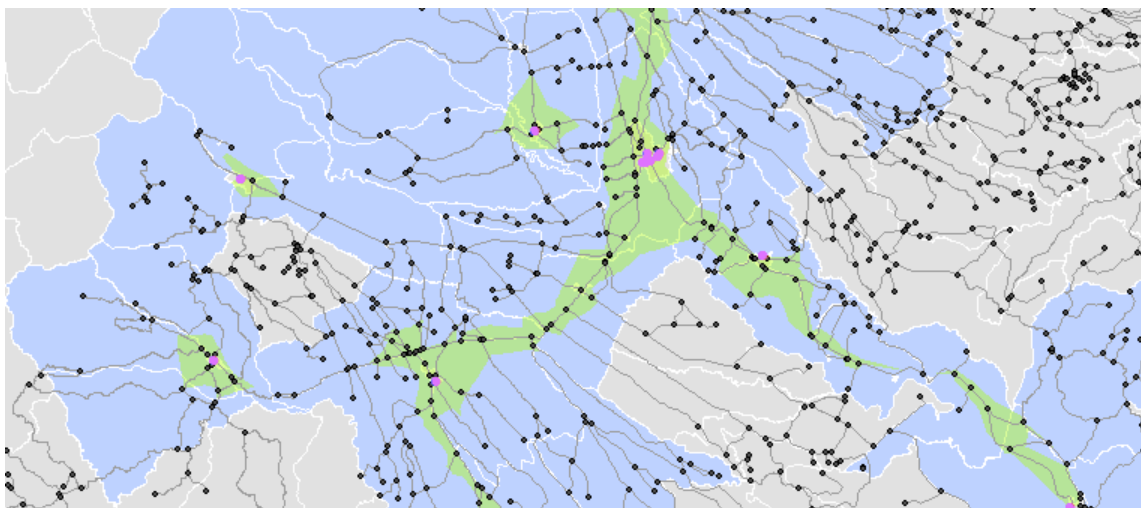
*Imagen 22. Áreas de servicio para los diferentes espacios de tiempo.*



*Nota: Se presenta solo una sección del análisis con fines ilustrativos. Los anillos observados corresponden a los intervalos de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora y dos horas.*

Para establecer cuanta población cubren los diferentes niveles de servicio calculados, se realizó una intersección espacial con los sectores rurales y urbanos, la cual tuvo como criterio seleccionar completamente un sector si por lo menos alguna parte del polígono de cobertura lo interceptaba.

Imagen 23. Sectores rurales que cuentan con accesibilidad a los laboratorios hasta en un tiempo de 15 minutos.



*Nota: Se presenta solo una sección de la red con fines ilustrativos. En verde se observa el área de servicio de los laboratorios para un tiempo de 15 minutos y en color azul los sectores rurales que se intersecan espacialmente con el área de servicio.*

Como resultado se obtuvo la cantidad de personas a nivel departamental que tienen acceso a los laboratorios en los espacios de tiempos de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora y dos horas, discriminando los sectores rurales y los sectores urbanos. Adicionalmente se calculó el porcentaje de cobertura teniendo en cuenta el total de población de cada departamento para ambos sectores.

Es importante aclarar que en esta información geográfica utilizada se encontró una diferencia respecto al total de la población de Colombia ya que se registran 9.929.774 personas en el sector rural y 33.905.550 personas en el sector urbano, para un total de 43.835.324 personas; este valor presenta una diferencia de 4.423.170 respecto al número de persona del censo nacional de población y vivienda realizado en el año 2018.

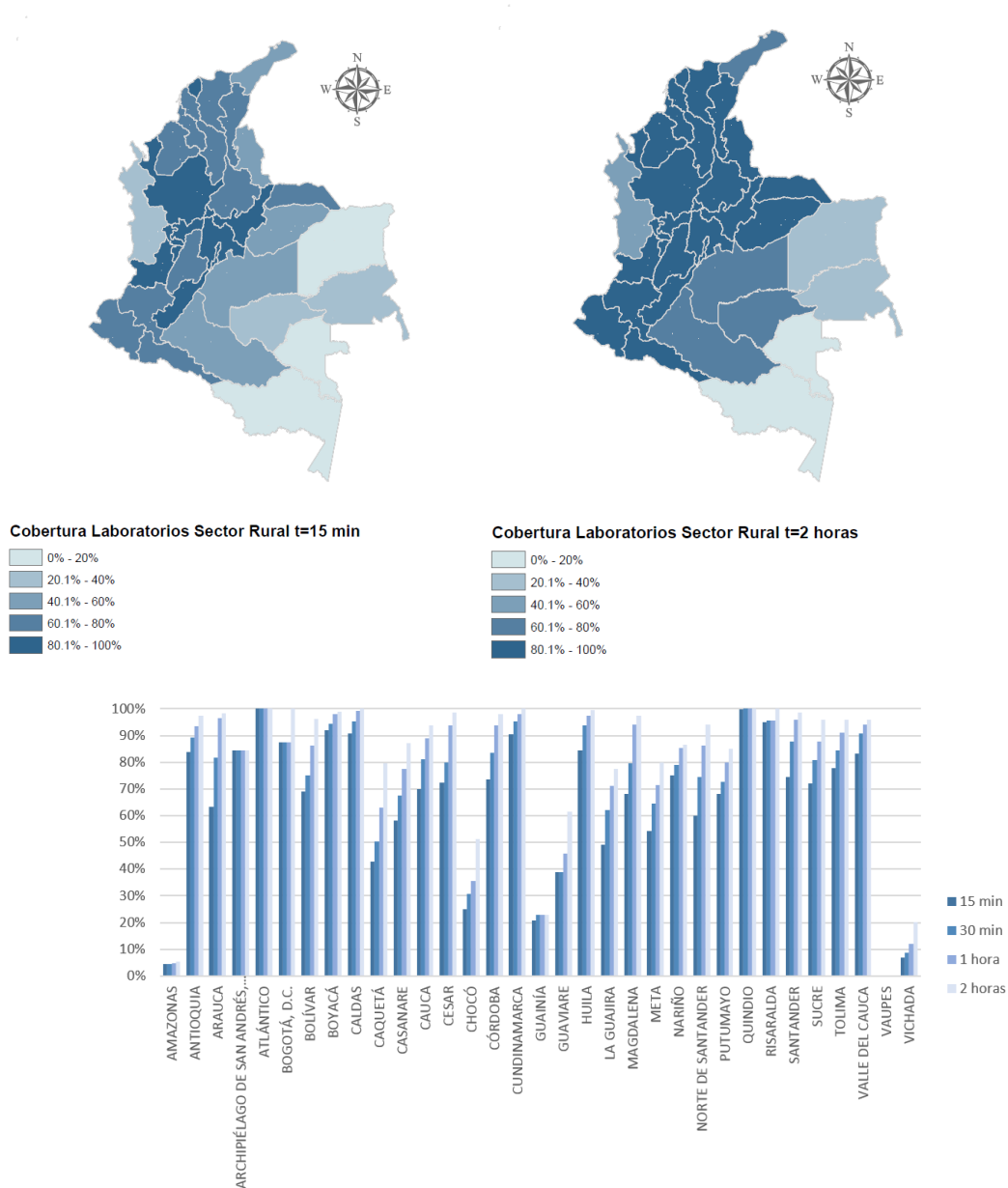
En términos generales se obtuvo una accesibilidad, en los intervalos de tiempo evaluados, del 74%, 82%, 88% y 93% de la población para el sector rural y un 97.4%, 98.5%, 99.2% y 99.6% de población para el sector urbano. Se observó un mayor nivel de cobertura en el sector urbano, el cual tiene un mayor impacto teniendo en cuenta las densidades poblacionales de cada área; de otra parte, analizando el mejor intervalo de accesibilidad definido en 15 minutos, no se tiene esta cobertura para 2.562.099 personas a nivel rural ni para 890.960 personas a nivel urbano.

En la mayoría de los departamentos a nivel rural se aprecia un aumento de la accesibilidad en función de los intervalos de tiempo, exceptuando los departamentos de Amazonas y Guainía. A nivel urbano se presenta un porcentaje alto de accesibilidad obteniendo los resultados más bajos en Amazonas, Putumayo y Vaupés.



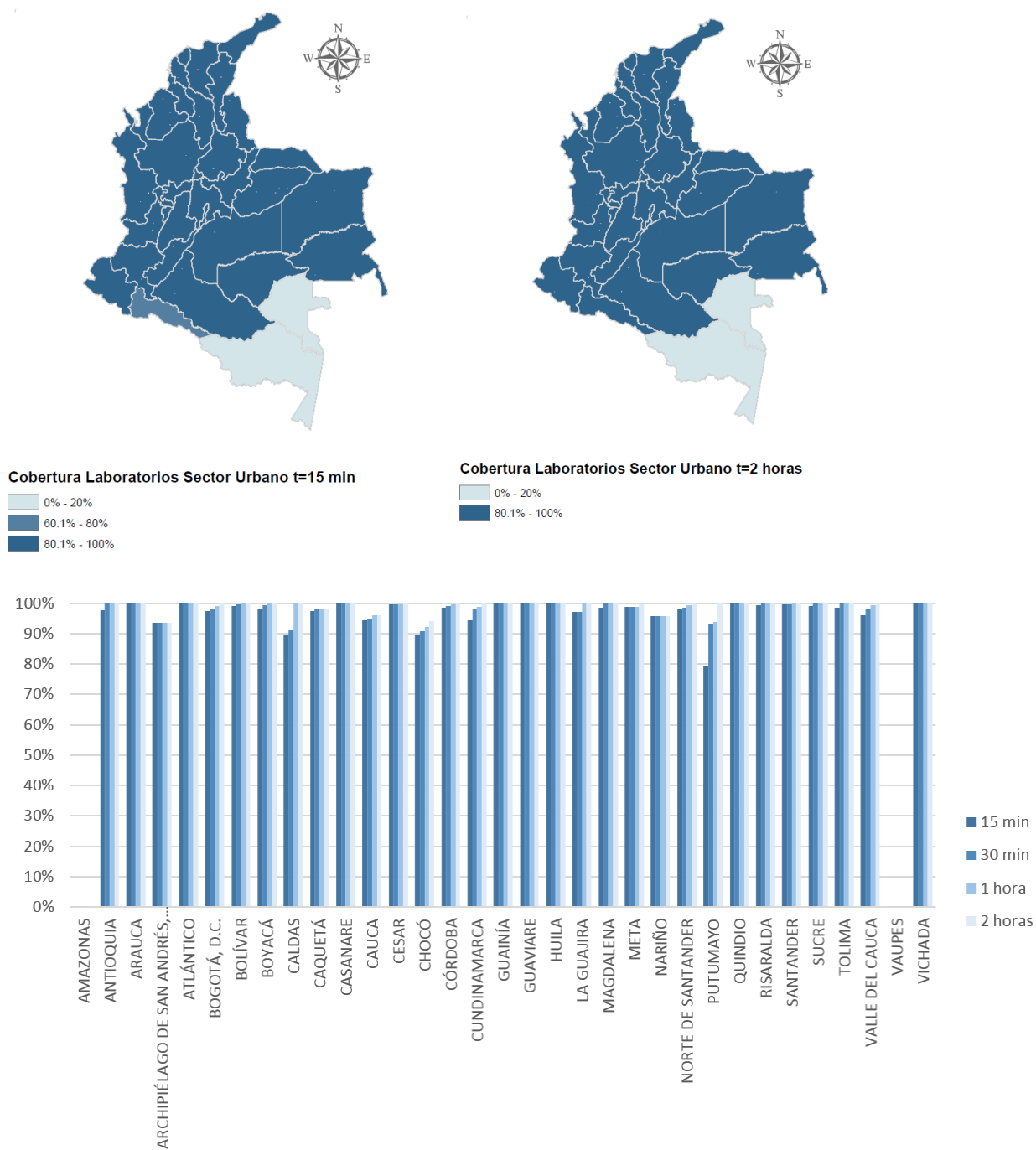
En los casos donde no se observa un aumento de la accesibilidad al aumentar el tiempo, se debe a la ausencia de una red vial o a esta no permite la conectividad hacia los laboratorios clínicos. Se aclara que los resultados de Vaupés indican un 0%, son el resultado de que la cartografía vial no reconoció las vías urbanas de Mitú, la cual es la capital de Vaupés y donde se encuentran dos laboratorios clínicos del departamento.

Imagen 24. Accesibilidad de los laboratorios en el sector rural.



Nota: Gráficos generados a partir del análisis de área de servicio, teniendo como base la información del CNPV 2018, cartografía básica 1:100.000 y el Sistema Integrado de Información de la Protección Social SISPRO.

Imagen 25. Accesibilidad de los laboratorios en el sector urbano.



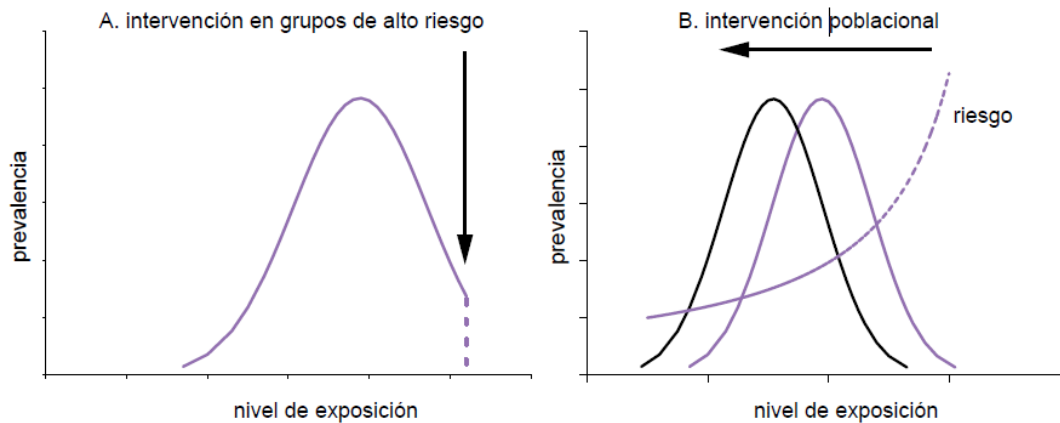
Nota: Gráficos generados a partir del análisis de área de servicio, teniendo como base la información del CNPV 2018, cartografía básica 1:100.000 y el Sistema Integrado de Información de la Protección Social SISPRO.

### 6.1.7 Determinación de área de estudio a modelar

Teniendo en cuenta las características de las enfermedades a evaluar, se realizó un método de evaluación multicriterio para la selección del departamento donde se realizaron las simulaciones de los modelos logísticos propuestos.

De acuerdo a principios epidemiológicos se tienen dos enfoques para la prevención y control de enfermedades con el fin de disminuir su prevalencia: el individual y el poblacional, el primero hace referencia en manejar la enfermedad en las personas que tienen alto riesgo de enfermarse y tratarlo individualmente a diferencia del segundo el cual se enfoca o tiene como objetivo un grupo poblacional en general (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

Imagen 26. Enfoques estratégicos de prevención y control.



Nota: Gráficos tomados de (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

Para el caso de la diabetes tipo 2 se buscó un enfoque individual, teniendo como fin realizar los exámenes de rutina que se deben realizar cada tres meses a una población determinada y que padece de esta enfermedad. En contraste para la malaria se busca realizar un control de la enfermedad, mediante la detección y el monitoreo de la misma a una población en general, aumentando el número de pruebas para detectarla. En consecuencia, los factores de mayor peso para el primer caso serán los indicadores individuales y para el segundo caso los indicadores relativos o porcentuales calculados.

Para la selección de los departamentos se utilizó un método MAUT, el cual plantea el uso de una función de utilidad o valor, para este caso el departamento que obtuvo el mayor valor fue el escogido como el área a modelar. Para el caso de la diabetes tipo 2 se tuvieron en cuenta las variables de número de muertes por millón de habitantes y los valores de población no cubierta o sin accesibilidad para un tiempo de 30 minutos o más. Para la malaria se tuvieron en cuenta las

variables de número de casos por millón de habitantes y los porcentajes de población no cubierta o sin accesibilidad para un tiempo de 30 minutos o más.

Las variables relacionadas con los laboratorios y las vías no se tuvieron en cuenta para esta evaluación ya que estos elementos se encuentran implícitos en el análisis de accesibilidad y número de personas cubiertas.

Para el caso de la diabetes tipo 2 se plantea la Ecuación 2 así:

$$F.V = (MPM * (NCR + 2 * NCU))/1.000.000$$

*Ecuación 2. Función de valor para la selección del departamento a modelar: diabetes tipo 2*

Donde:

MPM: muertes por millón de habitantes.

NCR: número de personas no cubiertas a nivel rural.

NCU: número de personas no cubiertas a nivel urbano.

Esta función tiene como factor multiplicador el número de muertes por millón ya que este representa la proporción de la población que murió en el departamento a causa de la enfermedad y se multiplica por 2 las personas no cubiertas a nivel urbano, para darle más peso a este tipo de población ya que allí es donde se presentan más casos de la enfermedad.

Para el caso de la malaria se plantea la Ecuación 2 así:

$$F.V = EPM * (2 * NCR + NCU)$$

*Ecuación 3. Función de valor para la selección del departamento a modelar: diabetes tipo 2*

Donde:

EPM: eventos por millón de habitantes.

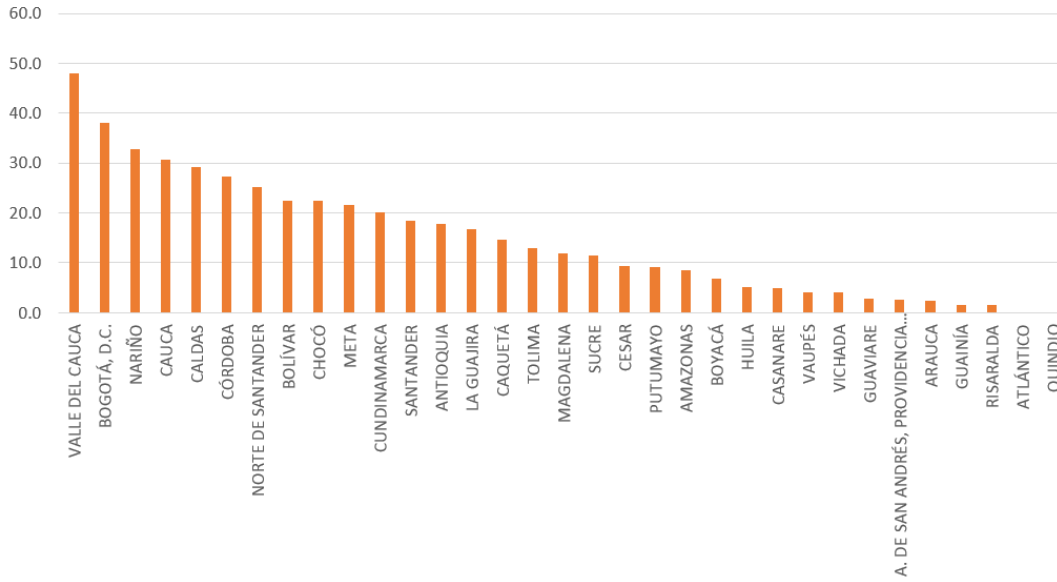
NCR: número de personas no cubiertas a nivel rural.

NCU: número de personas no cubiertas a nivel urbano.

Esta función tiene como factor multiplicador el número de muertes por millón ya que este representa la proporción de la población donde se presentó el evento y se multiplica por 2 el porcentaje de personas no cubiertas a nivel rural, para darle más peso a este tipo de población ya que en esta zona es donde se presenta más riesgo de contraer la enfermedad.

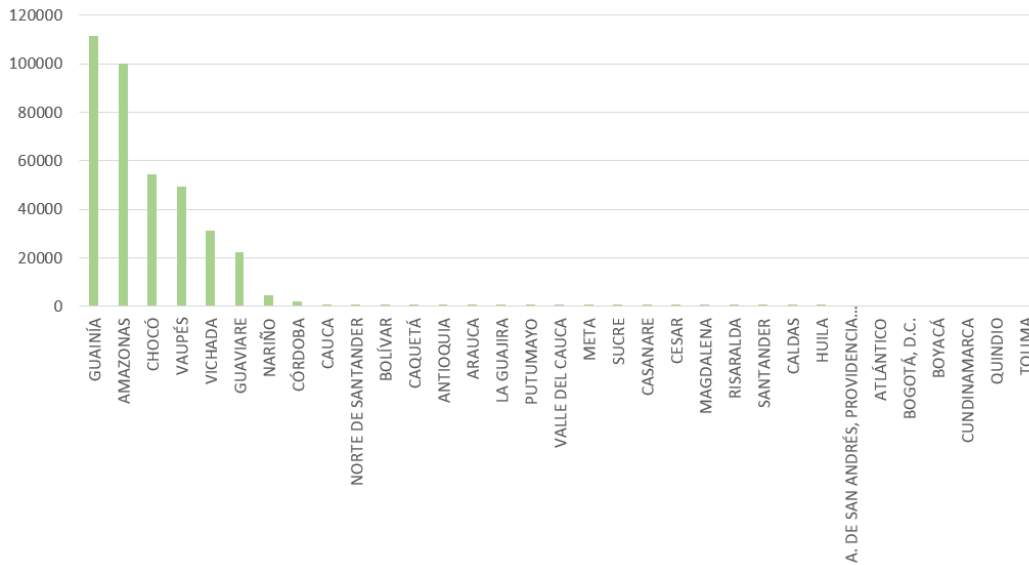
Se obtuvo como resultado al Valle del Cauca como el departamento para la modelación de la toma de muestras de sangre para el control de la diabetes tipo 2 y el departamento del Guainía para la modelación de la toma de muestras para la vigilancia de la malaria.

Imagen 27. Resultado de la función valor para el escenario de la diabetes tipo 2.



Nota: Gráficos generados a partir de la información analizada para cada departamento.

Imagen 28. Resultado de la función valor para el escenario de la malaria.



Nota: Gráficos generados a partir de la información analizada para cada departamento.

## **6.2 Entorno de operación**

### **6.2.1 Operación del espacio aéreo**

Las operaciones se plantearon en entornos rurales, salvo la llegada a los laboratorios los cuales se encuentran en áreas urbanas. La arquitectura, gestión y regulación del espacio aéreo se modeló siguiendo los principios expuestos en el numeral 5.3.2, considerando que las operaciones se realizarán en un espacio poco denso. Las comunicaciones y el monitoreo no se estudiaron en este documento, asumiendo que esto puede ser viable mediante comunicación celular o satelital. La logística propuesta ofertar servicios de salud tendrá prioridad en el tránsito y ejecución en relación a operaciones aéreas que se realicen en el mismo entorno.

Los arcos y rutas se estudiaron a nivel estratégico y táctico, por lo que no se analizaron las restricciones que se puedan presentar desde un nivel operativo, donde será necesario considerar restricciones físicas, y del espacio aéreo.

### **6.2.2 Flota**

Para definir el dron adecuado para un tipo de misión u operación específica, se evaluaron cuatro aspectos principales: el tiempo de vuelo, la velocidad, el rango de operación y la altitud de vuelo; estos aspectos definieron el diseño y especificaciones del equipo.

La característica principal de los drones implementados en el estudio fue el tiempo de vuelo efectivo. De acuerdo a un estudio de alternativas se encontraron drones que tienen la capacidad de brindar estos tiempos de vuelo.

Dadas las condiciones de operación, los drones seleccionados para el transporte de muestras se caracterizaron por ser multirrotor o VTOL, los cuales permiten un despegue y aterrizaje vertical minimizando el área de lanzamiento de los drones.

Adicionalmente, se requiere drones que minimicen los riesgos en la operación, estos tienen que ser drones con sistemas redundantes en la fuente de alimentación, propulsión, hardware, comunicaciones y/o disponer de un sistema de emergencias ante el fallo del vehículo como un paracaídas, minimizando el impacto ante alguna caída.

En los modelos propuestos, la principal característica diferencial hace referencia a los tiempos de vuelo, asociados a unos rangos de operación, siendo así se buscó en el mercado drones con características similares que tuvieran tiempos de operación entre 30 minutos y 180 minutos. A continuación, se relacionan sistemas de drones los cuales están desarrollados para operaciones logísticas como las planteadas, sin embargo, el precio no es de acceso público.

- Dron Zipline

El vehículo diseñado por Zipline, es un dron de ala fija el cual es utilizado el servicio logístico para el suministro de bienes para la salud, como vacunas, medicamentos entre otros; tiene un rango de vuelo redondo de 160 km, una velocidad de crucero de 110 km/h, una capacidad de carga de 1.8 kg, la unidad de carga tiene control de temperatura y puede atender servicios 45 minutos después de su despacho (Zipline capabilities statement, 2022).

*Imagen 29. Dron Zipline.*



*Nota: Gráficos tomados de (Zipline capabilities statement, 2022).*

- Dron Matternet

El vehículo diseñado por Matternet es un dron tipo multirrotor el cual hace parte de una plataforma de solución para los servicios de transporte en salud, comercio electrónico y organizaciones de logística; el dron se caracteriza por tener un rango de operación de 20 km en ambientes urbanos o suburbanos y con una capacidad de carga de 2 kg; Este sistema de envío por drones fue el primer sistema en ser aprobado por la FAA (Matternet Product, 2022).

*Imagen 30. Dron Matternet.*



*Nota: Gráficos tomados de (Matternet Product, 2022).*

- Dron MissionGO's MGV100

El vehículo diseñado por MissionGO, es un dron tipo helicóptero el cual se encuentra aprobado por la FAA, el cual se caracteriza por tener una plataforma operativa redundante, tiene un rango de operación de 30 millas, un tiempo de vuelo de 1 hora y una velocidad de crucero de 52 km/h (MissionGo, 2022).

*Imagen 31. Dron MissionGO's.*



*Nota: Gráficos tomados de (MissionGo, 2022).*

Con el fin de obtener un valor de referencia se presenta dos drones comerciales con un rango de operación de 30 minutos y de 180 minutos; para los tiempos intermedios se interpola el valor de los mismos, con el fin de obtener un valor de referencia para las otras especificaciones.

Para el dron de menor rango se consideró un dron con las características de un DJI Phantom 4 PRO, el cual tiene un tiempo de vuelo de 30 minutos y una velocidad de operación de hasta 72 km/h (Phantom 4 Pro, 2022). El precio de este dron se encuentra alrededor de \$10.000.000 COP.

*Imagen 32. Dron Phantom 4 Pro.*



*Nota: Gráficos tomados de (Phantom 4 Pro, 2022).*



Para el dron de mayor rango se consideró el dron FOXTECH Whale 360, el cual es un vehículo tipo VTOL fabricado para hacer entregas, con una capacidad de operación de hasta 4 horas, con una velocidad crucero recomendada de 118 km/h y una capacidad de carga de hasta 5 kg (Alibaba, 2022). El precio en el mercado se puede encontrar por un precio cercano a \$90.000.000 COP.

Imagen 33. Dron FOXTECH Whale 360



Nota: Gráficos tomados de (Alibaba, 2022).

A partir de los valores de referencia, para la elaboración de los modelos se establecieron los siguientes vehículos para la operación en función del rango de operación (30, 60, 90, 120 y 180 km):

Tabla 3: Costo de los drones seleccionados para modelar las operaciones logísticas.

Tipo de Dron					
	DRON-30	DRON-60	DRON-90	DRON-120	DRON-180
<b>Costo Inicial</b>	\$10,000,000	\$30,000,000	\$45,000,000	\$60,000,000	\$90,000,000
<b>mantenimiento</b>	\$1,000,000	\$3,000,000	\$4,500,000	\$6,000,000	\$9,000,000

Con el fin de mantener la integralidad de la muestra seguir los procedimientos para la toma, conservación y transporte de muestras de sangre enunciado en el numeral 5.4.2 se planteó que cada uno de los drones estén equipados con una unidad de carga similar a la presentada en la Imagen 34.

Imagen 34. Unidad Refrigerante.



Nota: Gráficos tomados de (UPS Airlines, 2022)

### 6.2.3 Número de operaciones al día por vehículo

A partir de los estudios previos consultados y la secuencia regular que describe el transporte de muestras se definieron y caracterizaron las operaciones dividiéndolas en hitos, los cuales se mencionan a continuación:

- Preparación: Tiempo estimado en el que se tiene en cuenta la preparación, chequeo del vehículo, puesta en el área de despegue y programación del itinerario de vuelo.
- Despegue: Tiempo en que el dron se desplaza verticalmente hasta alcanzar la altura de vuelo. Teniendo en cuenta las características de los drones empleados se utilizó como velocidad vertical en ascenso de 5 m/s.
- Vuelo de ida: Tiempo en el que el dron se desplaza a una velocidad crucero. Considerando las características de los drones empleados se utilizó como velocidad de crucero 60 km/h.
- Aterrizaje: Tiempo en el que el dron tarda en desplazarse verticalmente desde la altura de vuelo hasta el nivel de aterrizaje. A partir de las características de los drones empleados se utilizó como velocidad vertical en descenso de 3 m/s.
- Recarga y carga del paquete a transportar: Tiempo en el que se prepara y embala la muestra de sangre y se acopla al vehículo; adicionalmente se contempla el tiempo de recarga de las baterías o fuente de energía. Entre las actividades mencionadas se tomó como tiempo crítico el requerido para cargar una batería de un dron estimado en 1 hora.
- Llegada del vehículo y recepción del paquete transportado: tiempo en el que el vehículo llega a la instalación, se descarga el material transportado y se realiza la disposición o liberación del dron para almacenamiento o una nueva misión de vuelo.

De acuerdo a las características del vehículo se calculó el número de operaciones realizadas en un día de operación, como la sumatoria del tiempo empleado en cada una de las actividades descritas. Para los cálculos se contempló una jornada de trabajo de 9 horas.

Tabla 4: Calculo de las operaciones/día.

		<b>DRON 30</b>	<b>DRON 60</b>	<b>DRON 90</b>	<b>DRON 120</b>	<b>DRON 180</b>
Velocidad		60	60	90	90	90
Preparación	min	5	5	5	15	15
Despegue	min	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vuelo	min	30	60	90	120	180
Aterrizaje	min	1	1	1	1	1
Recarga + carga mat	min	60	60	60	60	60
Despegue	min	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vuelo	min	30	60	90	120	180
Aterrizaje	min	1	1	1	1	1
Descarga	min	5	5	5	5	5
Total, operación	min	133	193	253	323	443
Total, operación	horas	2,2	3,2	4,2	5,4	7,4
Jornada	horas	9	9	9	9	9
Operaciones/día		4	3	2	1	1

### **6.3 Planteamiento de modelos logísticos**

Para resolver el problema de transportar muestras de sangre usando drones, se planteó un modelo logístico de dos etapas, relacionando aspectos técnicos y económicos. Siguiendo el planteamiento de (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017) se propone en primer lugar un modelo estratégico con el fin de encontrar el menor número de instalaciones (centros de drones) para brindar la cobertura a un área geográfica y en segundo lugar un modelo operativo para el ruteo de drones desde los centros de drones hasta los puntos de demanda el cual fue resuelto como un problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP).

El modelo planteó 2 problemas de operaciones logísticas a resolver: el primero de ubicación-asignación y el segundo de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP).

Conceptualmente el modelo buscó aumentar coberturas de servicios y disminuir los costos para el envío y recogida de mercancías que se caracterizan por ser de bajo peso, pequeñas, con un alto valor por la información y que requieren ser transportadas de manera prioritaria o con rapidez. Se planteó una logística en la cual la especialización de un servicio permita ofrecer servicios disminuyendo los costos de transporte reemplazando los viajes particulares, en servicios prestados a domicilio aumentando la cobertura y accesibilidad a servicios al no depender de una red vial. El estudio dirigió el modelo a servicios relacionados con la atención de servicios esenciales, pero este se puede replicar para el transporte de mercancías o prestación de servicios no esenciales.

El planteamiento del modelo logístico se desarrolló en dos etapas: la primera desde un enfoque estratégico buscando dar acceso a servicios en grandes áreas, con poca infraestructura vial y la segunda etapa desde un enfoque táctico-operativo con el objetivo de brindar cobertura en áreas rurales cercanas a una instalación de servicio. El modelo logístico puede tener aplicabilidad como un modelo de dos etapas o como un modelo independiente de una etapa, según las necesidades del problema a resolver.

### **6.3.1 Etapa 1 estratégica: Acceso a servicios de grandes áreas, con poca infraestructura vial**

El modelo tiene como fin aumentar la accesibilidad y cobertura de los servicios de salud, se propone un modelo de dos instancias: la primera con el objetivo de minimizar las instalaciones o centros de recogida; en la segunda instancia se busca minimizar las instalaciones y la longitud total recorrida para transportar las muestras desde los centros de intermedios a los laboratorios clínicos.

A continuación, se describen los aspectos para desarrollar y evaluar el modelo logístico.

#### ***6.3.1.1 Identificación de la población a atender***

Se debe identificar y delimitar un área geográfica a estudiar, con el fin de priorizar la atención de diferentes regiones se pueden evaluar indicadores demográficos, de salud, de accesibilidad o los relacionados con el servicio a cubrir. A partir de estadísticas descriptivas, como los censos nacionales o bases de datos se puede identificar el porcentaje de población que requieren el servicio y de acuerdo al fenómeno estudiado definir una frecuencia del mismo.

#### ***6.3.1.2 Caracterización y agrupación demográfica***

Se debe agrupar la población a atender en grupos o unidades demográficas, que reúnan cierto tipo de características poblacionales o propias del fenómeno a modelar que permita aglomerar la población ya que los problemas de redes tienen un gran número de soluciones las cuales se multiplican exponencialmente en función de la cantidad de nodos presentes en la red, lo que se refleja en mayor tiempo y recursos computacionales para resolverlos. En consecuencia, para el caso de Colombia y dependiendo de la escala de análisis se sugiere agrupar la población en zonas rurales o sectores rurales. Luego se calcula el centroide del polígono o se identifican áreas urbanas o puntuales que puedan representar dicha agrupación. Como resultado se obtienen entidades tipo punto.

En los casos que se disponga de información particular, se pueden ajustar los centroides de las agrupaciones geográficas sobre áreas o asentamientos urbanos ya que sobre estas áreas se hace más viable la localización de los centros de drones.

#### ***6.3.1.3 Identificación instalaciones de servicio***

Se identifican, seleccionan y localizan las instalaciones que puedan prestar el servicio que se quiere ofrecer. Como resultado se obtendrán entidades tipo punto.

#### 6.3.1.4 Creación de la red

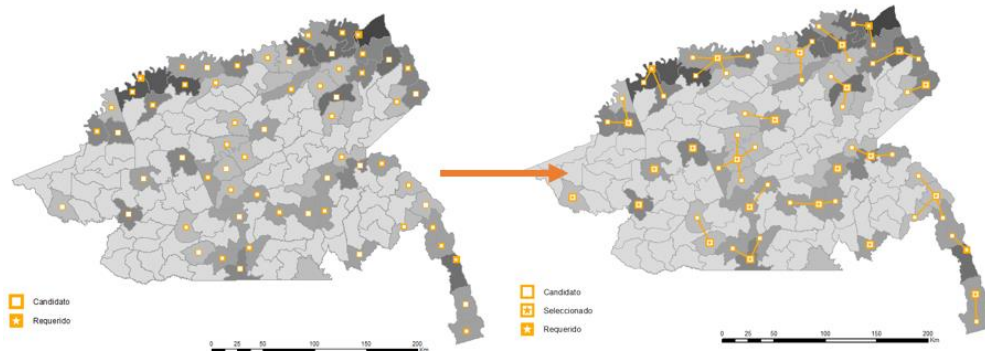
Se establece una red tomando como nodos las entidades creadas para las agrupaciones demográficas y las instalaciones de servicio. Para los arcos de la red se define el atributo de longitud como la distancia euclidiana que hay entre cada punto.

Con el fin de no generar dos nodos para una misma agrupación demográfica, la localización de una instalación de servicio puede representar la agrupación demográfica en la que se encuentra inscrita.

#### 6.3.1.5 Instancia 1 modelo de Asignación – Localización. Definición de instalaciones (centros intermedios)

Se tiene como fin asignar los puntos de demanda al menor número de instalaciones. Se establece como parámetro de impedancia la longitud. Se define el problema de minimizar las instalaciones. El valor límite de la impedancia se establece en función del tipo de dron elegido y capacidades de cobertura para realizar el transporte.

Imagen 35. Etapa 1- Instancia 1: modelo de asignación-localización.



##### 6.3.1.5.1 Designación instalaciones

Las localizaciones requeridas de los centros de operación de drones se establecen en las instalaciones de servicio y como localizaciones candidatas las agrupaciones demográficas que pueden funcionar como centros de operación intermedios.

Las entidades definidas como instalaciones de servicio se asignan al modelo como instalaciones requeridas; Las entidades definidas como agrupaciones demográficas se asignan al modelo como instalaciones candidatas.

#### 6.3.1.5.2 *Designación puntos de demanda*

Las entidades definidas como agrupaciones demográficas se asignan al modelo como puntos de demanda.

#### 6.3.1.5.3 *Asignación de demanda*

En la clase de entrada puntos de demanda se incluye la propiedad peso como el número de muestras o demanda del servicio que requiere la agrupación demográfica.

#### 6.3.1.5.4 *Resultados de la instancia 1*

Se obtiene como resultado la selección de instalaciones que atienden los diferentes puntos de demanda y las líneas que describen las rutas entre los puntos de demanda y las instalaciones seleccionadas. Para cada una de las entidades de salida se obtienen las siguientes propiedades:

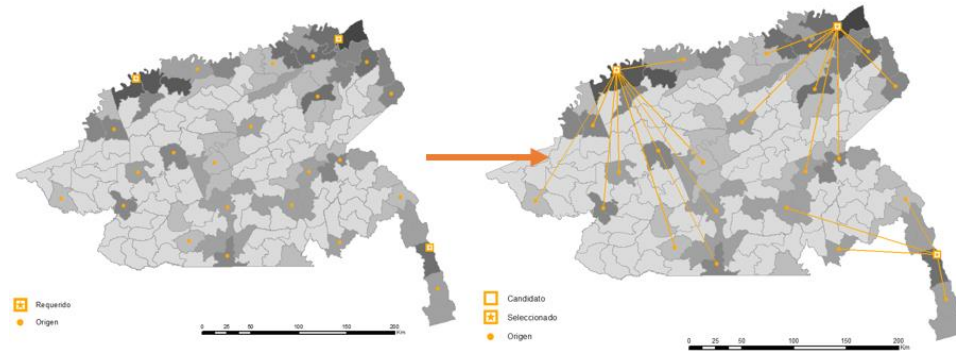
*Tabla 5. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 1-instancia 1*

Entidad	Propiedad	Descripción
Instalaciones	Nombre:	Identificación de la instalación
	Tipo de instalación:	Candidata, elegida o requerida
	Peso de la demanda:	Demanda acumulada
	Longitud:	Longitud total desde cada origen
	Longitud acumulada:	Longitud multiplicada por la demanda
Líneas	Nombre:	Identificación instalaciones Origen-destino
	Peso:	Demanda
	Longitud:	Longitud origen-destino
	Longitud acumulada:	Longitud multiplicada por la demanda

#### 6.3.1.6 *Instancia 2 modelo Asignación - localización a instalaciones de servicio.*

Se tiene como objetivo minimizar la longitud total recorrida desde los centros intermedios hasta las instalaciones de servicio (puntos finales). Se define como un problema de minimizar la impedancia. Se define el valor de instalaciones a escoger y el número de instalaciones que presten el servicio.

Imagen 36. Etapa 1- Instancia 2: modelo de asignación-localización a instalaciones de servicio.



#### 6.3.1.6.1 Designación instalaciones

Se establecen las instalaciones de servicio como localizaciones requeridas.

#### 6.3.1.6.2 Designación puntos de demanda

Las instalaciones elegidas en de la instancia 1, se asignan al modelo como puntos de demanda.

#### 6.3.1.6.3 Asignación de demanda

La demanda de cada una de las instalaciones será la demanda acumulada resultante de la instancia 1.

#### 6.3.1.6.4 Resultados de la instancia 2

Se obtiene como resultado la elección de instalaciones de servicio para cada punto de demanda y las líneas que describen las rutas entre los puntos de origen y las instalaciones seleccionadas. Para cada una de las entidades de salida se obtienen las siguientes propiedades:

Tabla 6. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 1-instancia 2

Entidad	Propiedad	Descripción
Instalaciones	Nombre:	Identificación de la instalación
	Tipo de instalación:	Candidata, elegida o requerida
	Peso de la demanda:	Demanda acumulada
Líneas	Nombre:	Identificación instalaciones Origen-destino
	Peso:	Demanda
	Longitud:	Longitud origen-destino
	Longitud acumulada:	Longitud multiplicada por la demanda



### 6.3.1.7 Evaluación de escenarios

En la evaluación de escenarios se analizan diferentes flotas de drones, lugar rangos de cobertura y posteriormente el número de vehículos asignados a la operación. Teniendo en cuenta la naturaleza, variables y requisitos del problema propuesto, se plantean alternativas para agrupar las muestras individuales recolectadas, a partir de intervalos de tiempo de almacenamiento que aseguren la calidad de las muestras y atiendan la prioridad de análisis de las mismas, con el fin de transportarlas desde los centros intermedios hasta las instalaciones finales en grupos.

Como resultado se obtienen diferentes configuraciones de flotas de drones que atienden la demanda durante un tiempo determinado, posteriormente para los diferentes escenarios planteados se realiza una evaluación económica.

Como resultado de la instancia 1 se obtiene de cada una de las instalaciones la propiedad Longitud acumulada. La distancia total recorrida por los vehículos en la primera instancia se calcula a partir de la Ecuación 4:

$$D_1 = 2 * \left( \sum_{i=1}^n L_{acum} \right) / 1000$$

*Ecuación 4. Distancia total recorrida instancia 1*

Donde:

$D_1$ : Distancia total recorrida instancia 1 [km].

$L_{acum}$ : Longitud acumulada [m].

Como resultado de la segunda instancia se obtiene para cada una de las rutas origen-destino (entidades tipo línea), la longitud acumulada; cada ruta tiene la propiedad de demanda acumulada, la cual describe el número total de muestras que se deben recoger en el origen, para ser almacenadas y llevadas a las instalaciones de servicio (instalaciones finales). Para cada ruta (origen de la ruta) se calcula el número de días para atender la demanda como se plantea en la Ecuación 5.

$$t_{dias} = w / (r * x)$$

*Ecuación 5. Número de días para atender demanda*

Donde:

$t_{dias}$ : número de días para atender la demanda

w: peso de la demanda

r: rendimiento diario [vuelos/día]

x: número de drones

para obtener el número total de días para atender la demanda es necesario adicionar el tiempo de las muestras que llegan directamente a las instalaciones el cual también se calcula a partir de la Ecuación 5, debido a que algunas de las muestras en la primera instancia llegan directamente a las instalaciones finales. El número total de días se calcula como se presenta en la Ecuación 6

$$total_{días} = t_{días\ intermedias} + t_{días\ finales}$$

*Ecuación 6. Número de días para atender el total de la demanda*

A partir de la definición de un periodo de acumulación, se determina el número de ciclos para atender la totalidad de la demanda a partir de la Ecuación 7.

$$C = t_{días} / t_{ciclo}$$

*Ecuación 7. Numero de ciclos para atender demanda de una instalación intermedia.*

Donde:

C: número de ciclos para atender la demanda de una instalación intermedia.

t<sub>días</sub>: número de días para atender la demanda de instalaciones intermedias.

t<sub>ciclo</sub>: número de días del ciclo.

La distancia total recorrida desde las instalaciones intermedias hasta las instalaciones finales se calcula como se presenta en la Ecuación 8:

$$D_2 = 2 * \left( \sum_{i=1}^n (L_{O-D} * C) \right) / 1000$$

*Ecuación 8. Distancia total recorrida desde las instalaciones intermedias a instalaciones finales.*

Donde:

D<sub>2</sub>: Distancia total recorrida desde las instalaciones intermedias a las instalaciones finales.

L<sub>O-D</sub>: Distancia desde la instalación intermedias a la instalación final.

C: número de ciclos para atender la demanda de la instalación intermedia.

### **6.3.2 Etapa 2 táctica-operativa: Cobertura de servicios en áreas rurales.**

El modelo tiene como fin brindar la cobertura de servicios en áreas rurales evitando los desplazamientos de los usuarios a las instalaciones de servicio, ofertando servicios de recolección domiciliaria minimizando la longitud total recorrida, el tiempo y costos relacionados con el desplazamiento.

En una primera instancia, se asigna una instalación de servicio a la demanda a atender, minimizando la longitud total recorrida. Este proceso se lleva a cabo ejecutando el modelo a un nivel estratégico, minimizando la impedancia teniendo en cuenta la capacidad instalada existente o como se desarrolla en la etapa 1: modelo estratégico, en el caso de no contar con instalaciones de servicio cercanas. Posteriormente en la segunda instancia se soluciona un problema de ruteo de vehículos con el fin de encontrar las rutas óptimas para recoger y atender la demanda.

A continuación, se describen los aspectos para desarrollar y evaluar el modelo logístico.

#### ***6.3.2.1 Identificación de la población a atender***

Se debe identificar y delimitar el área geográfica a estudiar, con el fin de priorizar la atención de diferentes regiones se pueden evaluar indicadores demográficos, de salud, de accesibilidad o relacionados con el servicio a cubrir. A partir de estadísticas descriptivas, como los censos nacionales o bases de datos identificar el porcentaje de población que puedan requerir el servicio y de acuerdo al fenómeno estudiado definir una frecuencia del mismo.

#### ***6.3.2.2 Caracterización y agrupación demográfica***

Se agrupa la población a atender en grupos o unidades demográficas, que reúnan cierto tipo de características poblacionales o propias del fenómeno a modelar que permita aglomerar la población; este paso es esencial ya que los problemas de redes tienen un gran número de soluciones las cuales se multiplican exponencialmente en función de la cantidad de nodos presentes en la red, lo que se refleja en los tiempos y recursos computacionales para resolverlos.

Para los análisis en Colombia y dependiendo de la escala de evaluación se sugiere agrupar la población en zonas rurales o sectores rurales. Se calcula el centroide del polígono o se identifican las áreas urbanas o puntuales que puedan representar dicha agrupación. Como resultado se obtienen entidades tipo punto.

#### ***6.3.2.3 Identificación instalaciones de servicio instancia 1***

Se Identifican, seleccionan y localizan las instalaciones que puedan prestar el servicio que se quiere ofrecer. Como resultado se obtendrán entidades tipo punto.

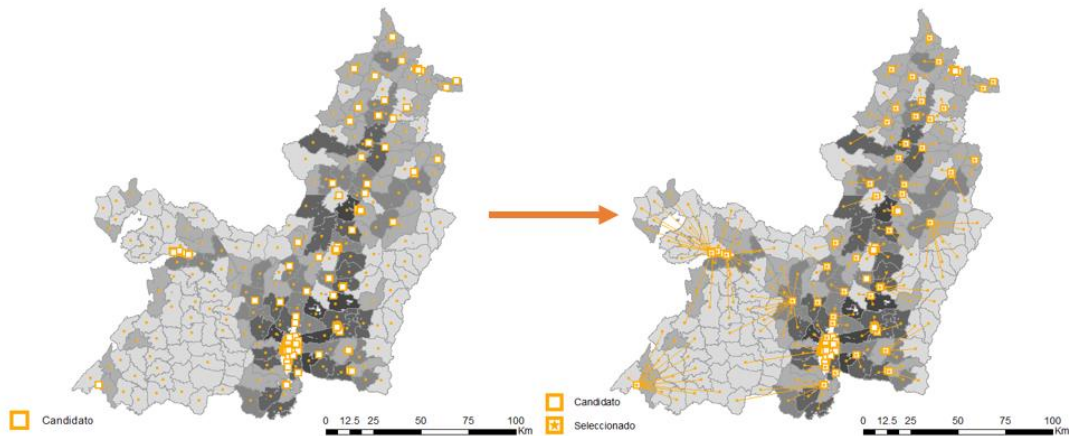
#### 6.3.2.4 Creación de red instancia 1

Se genera una red tomando como nodos las entidades creadas para las agrupaciones demográficas y las instalaciones de servicio. Para los arcos de la red se define el atributo de longitud como la distancia euclidiana que hay entre cada nodo.

#### 6.3.2.5 Instancia 1 modelo de Asignación – Localización. Definición de instalaciones

Se tiene como fin asignar las instalaciones los puntos de demanda. Se Establece como parámetro de impedancia la longitud. Se Define como tipo de problema minimizar la longitud. Se establece como valor límite de las instalaciones el número total de instalaciones con el fin de que el problema tenga en cuenta todas las instalaciones disponibles.

Imagen 37. Etapa 2- Instancia 1: modelo de asignación-localización de instalaciones de servicio.



Nota: Gráficos generados a partir de la información analizada para cada departamento.

##### 6.3.2.5.1 Designación instalaciones

Las localizaciones de las instalaciones de servicio se establecen como localizaciones candidatas.

##### 6.3.2.5.2 Designación puntos de demanda

Las entidades definidas como agrupaciones demográficas se asignan al modelo como puntos de demanda.

##### 6.3.2.5.3 Asignación de demanda

En la clase de entrada puntos de demanda se incluye la propiedad peso como el número de muestras o demanda del servicio que requiere la agrupación demográfica.

#### 6.3.2.5.4 *Resultados de la instancia 1*

Se obtiene como resultado la selección de instalaciones que atienden los diferentes puntos de demanda y las líneas que describen las rutas entre los puntos de demanda y las instalaciones seleccionadas. Para cada una de las entidades de salida se describen las siguientes propiedades:

Tabla 7. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 2-instancia 1

Entidad	Propiedad	Descripción
Instalaciones	Nombre:	Identificación de la instalación
	Tipo de instalación:	Candidata, elegida o requerida
	Peso de la demanda:	Demanda acumulada
	Longitud:	Longitud total desde cada origen
	Longitud acumulada:	Longitud multiplicada por la demanda
Líneas	Nombre:	Identificación instalaciones Origen-destino
	Peso:	Demanda
	Longitud:	Longitud origen-destino
	Longitud acumulada:	Longitud multiplicada por la demanda

#### 6.3.2.6 *Demanda a atender instancia 2*

La demanda a atender son los usuarios que requieren el servicio dentro de la agrupación demográfica, estos se localizan espacialmente y se representarán como entidades tipo punto.

#### 6.3.2.7 *Identificación instalación de servicio instancia 2*

Se Identifica la instalación de servicio que atiende a la agrupación demográfica de acuerdo al resultado de la primera instancia, esta se representa como una entidad tipo punto.

#### 6.3.2.8 *Creación de red instancia 2*

Se genera una red tomando como nodos las entidades que representan la demanda a atender y la instalación de servicio. Para los arcos de la red se define el atributo de longitud como la distancia euclidiana que hay entre cada nodo.

#### 6.3.2.9 *Instancia 2 modelo VRP-ruteo de vehículos.*

Se tiene como fin establecer las rutas para recoger la totalidad de las muestras con el menor costo.

Imagen 38. Etapa 2- Instancia 2: modelo de VRP-ruteo de vehículos.



#### 6.3.2.9.1 *Designación instalaciones*

La instalación de servicio se establece como la instalación del modelo.

#### 6.3.2.9.2 *Designación puntos de demanda*

Los puntos de demanda a atender en la instancia 2, se asignan al modelo como puntos de demanda.

#### 6.3.2.9.3 *Definición de vehículos*

Se definen los parámetros teniendo en cuenta las particularidades de la operación y características de los vehículos. Para el tipo de análisis que se lleva a cabo se considerarán:

- Tiempo de preparación en instalación
- Tiempo de recepción en la instalación
- Tiempo máximo de servicio
- Tiempo máximo de viaje

#### 6.3.2.9.4 Resultados de la instancia 2

Se obtiene como resultado entidades tipo líneas las cuales describen las rutas para cada vehículo, indicando el orden y recorrido de cada uno. Por otra parte, se obtiene para cada instalación la ruta y el orden de recogida. A continuación, se relacionan las propiedades de las entidades de salida:

Tabla 8. Atributos de las entidades resultantes de la modelación de la etapa 2-instancia 2

Entidad	Propiedad	Descripción
Puntos de demanda	Nombre:	Identificación del punto de demanda
	Ruta Asignada	Identificación de la ruta asignada
	Secuencia	Posición dentro de la ruta de recogida
Rutas	Nombre:	Identificación de la ruta
	Tiempo de inicio	Tiempo de preparación en la instalación
	Tiempo de disposición	Tiempo de recepción en la instalación
	Ordenes	Numero de ordenes atendidas
	Costo	Costo total en horas
	Tiempo total	Tiempo de servicio y de vuelo de la ruta
	Tiempo de servicio	Tiempo de espera en cada punto de demanda
	Tiempo de vuelo	Tiempo invertido en los desplazamientos
	Distancia	Distancia total recorrida por la ruta

#### 6.3.2.10 Evaluación de escenarios

Para el análisis se establece una situación base, calculando la sumatoria de la distancia que recorren los usuarios hasta la instalación de servicio. La condición inicial se compara con los resultados obtenidos de la modelación. A partir de los resultados se establecen diferentes tamaños de flota, en función del número de órdenes a atender o de una ventana de tiempo determinada para la recolección total.

Adicionalmente en los casos donde se cuente con infraestructura vial, se pueden plantear escenarios con operaciones tradicionales por medio terrestre.

### 6.3.3 Evaluación económica

Los análisis y evaluaciones económicas se realizan con el fin de obtener parámetros de comparación entre los diferentes modelos logísticos propuestos. Esta valoración permite comparar los diferentes escenarios teniendo en cuenta los recursos e inversión de referencia necesarios versus los resultados o beneficios de cada uno, identificados en las variables de estudio: tiempo y accesibilidad.

Los escenarios propuestos cuentan con tres recursos globales relacionados con las instalaciones, los vehículos y el personal de operación. A partir de estos se realiza la valoración económica estimando precios unitarios para cada componente. Se clasifican como costos fijos los relacionados con las instalaciones y los vehículos; como costos variables el personal de operación y el mantenimiento de los vehículos.

Dentro de los costos fijos se estima el valor de una instalación intermedia, la cual se conceptualizo como una construcción sencilla en material prefabricado aproximadamente de 9m<sup>2</sup> en donde se pueda disponer de un puesto de trabajo dotado con un equipo de cómputo y comunicación, un espacio para almacenamiento de drones y un espacio para equipos de refrigeración. Al ser instalaciones ubicadas en áreas rurales, el área de despegue y aterrizaje se prevé a las afueras de la instalación sin mayores requerimientos de especificaciones técnicas o de área. En la Tabla 9 se resumen los costos a suponer.

Tabla 9. Costo de una instalación intermedia.

<b>Costo instalación intermedia</b>	
Construcción	\$ 15,000,000.00
Equipo de cómputo y comunicaciones	\$ 10,000,000.00
Equipos de refrigeración	\$ 10,000,000.00
Costo total	\$ 35,000,000.00

Por otra parte, para la evaluación del modelo etapa 2 táctico-operativo, se contempla como bases de operación las instalaciones de los laboratorios clínicos, por lo que los costos relacionados con las instalaciones hacen referencia a la adquisición de equipos de cómputo y comunicaciones. En la Tabla 10 se resumen los costos a suponer.

Tabla 10. Costo del equipamiento de una instalación existente (laboratorio clínico)

<b>Costo equipamiento instalación</b>	
Equipo de cómputo y comunicaciones	\$ 5,000,000.00



Los costos de los drones se tomaron a partir de la búsqueda en el mercado de drones con características similares a las condiciones modeladas, principalmente las relacionadas con tipo de sustentación en el aire (VTOL) y el rango de operación. Por otra parte, se asignó un valor de mantenimiento anual del 10% del valor total del equipo, relacionado con un mantenimiento general y cambio de piezas averiadas (chasis, alas o baterías). Asimismo, se estableció el costo de una motocicleta. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la Tabla 12 se resumen los costos de adquisición de los vehículos de transporte utilizados en los modelos evaluados.

*Tabla 11: Costo de adquisición de drones.*

<b>Tipo de Dron</b>					
	DRON-30	DRON-60	DRON-90	DRON-120	DRON-180
<b>Costo Inicial</b>	\$10,000,000	\$30,000,000	\$45,000,000	\$60,000,000	\$90,000,000
<b>mantenimiento</b>	\$1,000,000	\$3,000,000	\$4,500,000	\$6,000,000	\$9,000,000

*Tabla 12. Costo de Adquisición de Motocicletas*

<b>Costos motocicleta</b>	
Costo Inicial	\$ 7.000.000
Costo mantenimiento	\$ 700.000

Los costos asociados a los operadores de los vehículos se relacionaron asignando un salario mensual integral de \$2.000.000. Teniendo en cuenta la posibilidad de automatización de los viajes y recorridos de los drones se asigna un operador por cada diez drones.

Para la proyección de los costos de los escenarios modelados en uno a varios años (en los casos estudiados a 5 años) se incluye el costo anual de mantenimiento a los costos totales. Para estimar el costo unitario por muestra, se dividió el costo total de la implementación del modelo entre el número total de ejemplares recolectadas. Se selecciono un periodo de evaluación de 5 años teniendo en cuenta la velocidad de los desarrollos tecnológicos, ya que en un lapso de 5 años la flota puede estar en buen estado, pero la tecnología con la que fue construida probablemente será obsoleta y más costosa.

## 6.4 Casos de estudios, línea base y modelación

### 6.4.1 Estudio del modelo en la etapa 1 estratégica en el departamento de Guainía.

Se simuló mediante el software ArcGIS el modelo en la etapa 1 descrito con el fin de maximizar la cobertura y accesos al servicio de toma de muestras. La evaluación de escenarios se planteó variando el tipo de drones (D-30, D-60, D-90, D-120 y D-180) y el tamaño de la flota. Se evaluaron en total 22 escenarios como se presenta a continuación.

La información evaluada y los diferentes escenarios estudiados fueron evaluados en el sistema de coordenadas Origen Nacional CTM12.

#### 6.4.1.1 *Identificación de la población a atender*

Como resultado del análisis desarrollado en el numeral 6.1.7 Determinación de área de estudio a modelar, se seleccionó el departamento de Guainía para la recolección de muestras de sangre para el diagnóstico de malaria.

Para establecer el número de ejemplares a recolectar se calculó el tamaño de la muestra representativa, a partir del software Epidat V.4.2; se calculó el número a partir del tamaño de la población rural, una proporción esperada, un nivel de confianza y el efecto de diseño.

El tamaño de la población fue de 18.505 el cual corresponde al número total de habitantes en los sectores rurales de Guainía; se asignó una proporción esperada del 20% la cual corresponde a una tasa de prevalencia de la enfermedad, la cual fue supuesta teniendo en cuenta las estadísticas relacionadas con el estudio de malaria, para un nivel de confianza del 95% y un efecto de diseño de 1, dado que es una muestra simple aleatoria. De acuerdo a (Consellería de Sanidade, Xunta de Galicia, España; Organización Panamericana de la salud (OPS-OMS); Universidad CES, Colombia., 2016) un valor de proporción esperada del 50% matemáticamente resulta en un tamaño mayor de la muestra, pero este valor no necesariamente es apropiado y no debe ser empleado arbitrariamente, por el contrario, sugiere que este parámetro sea establecido a partir de la experiencia o conocimiento del investigador. A continuación, se presenta en la Imagen 39 los resultados obtenidos para diferentes niveles de precisión, siguiendo los ejemplos presentados en el manual del usuario del software. Se tomó como nivel de precisión del estudio el 2%, aclarando que tanto el valor de la proporción esperada como el de la precisión se consideraron sin tener un estudio epidemiológico que los argumente, ya que este objetivo no se encuentra en el alcance del documento. El número de habitantes se tomó como un número de referencia para la estimación de una demanda de un servicio a ofertar y atender con el modelo logístico propuesto.

Imagen 39. Tamaño de la muestra.

**Datos:**

Tamaño de la población:	18.505
Proporción esperada:	20,000%
Nivel de confianza:	95,0%
Efecto de diseño:	1,0

**Resultados:**

Precisión (%)	Tamaño de la muestra
1,000	4.614
2,000	1.419
3,000	659
4,000	377
5,000	243

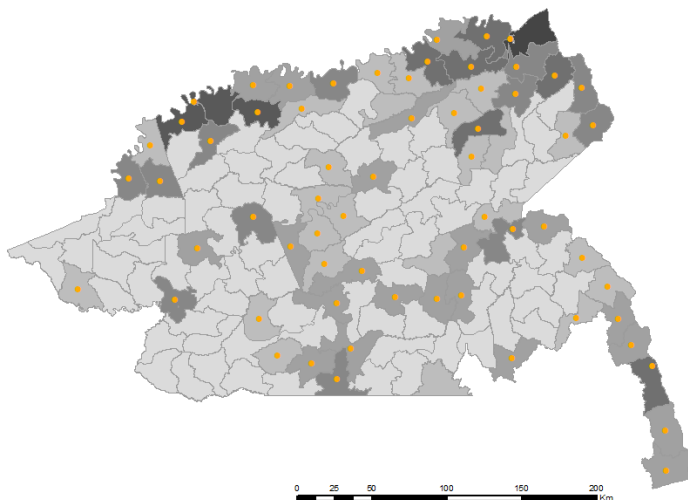
Nota: Valores calculados con EPIDAT V.4.2

### 6.4.1.2 Caracterización y agrupación demográfica

Una vez identificada la población a atender se estableció un total de 1.419 muestras representativas, las cuales contempladas como muestras tomadas de forma aleatoria. Este número corresponde al 7.7% de la población rural, por lo que se distribuyeron los casos en proporción a los habitantes de cada uno de los sectores rurales en los que se encuentra dividido Guainía.

Una vez distribuidas las muestras, dada la indivisibilidad de las mismas se obtuvo un total de 1.427 muestras agrupadas en 63 sectores rurales. Se resalta que en el proceso de agrupación demográfica se descartaron 79 sectores rurales del departamento, al no registrar población en las estadísticas del DANE.

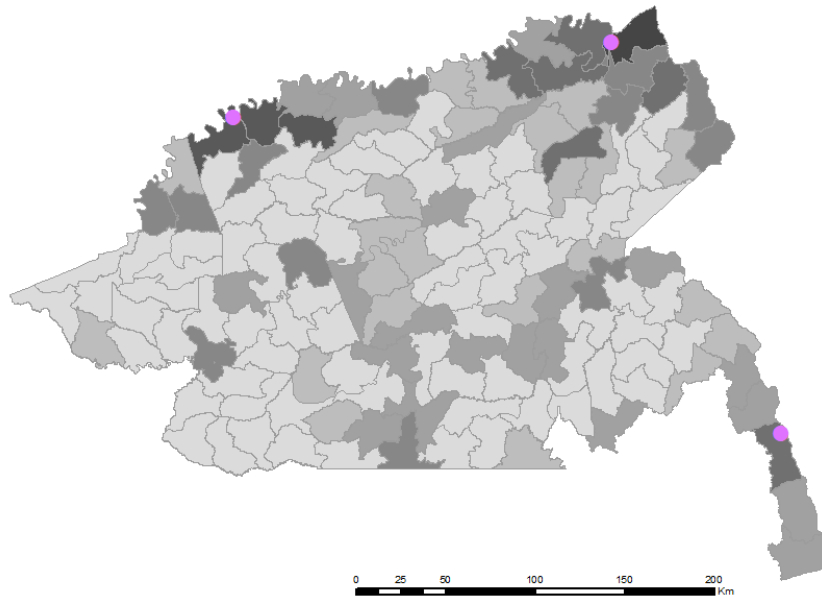
Imagen 40. Resultado de caracterización y agrupación demográfica.



### 6.4.1.3 *Identificación de las instalaciones de servicio*

De acuerdo a la información analizada, en el departamento de Guainía cuenta con 3 laboratorios clínicos con la capacidad de analizar muestras de sangre.

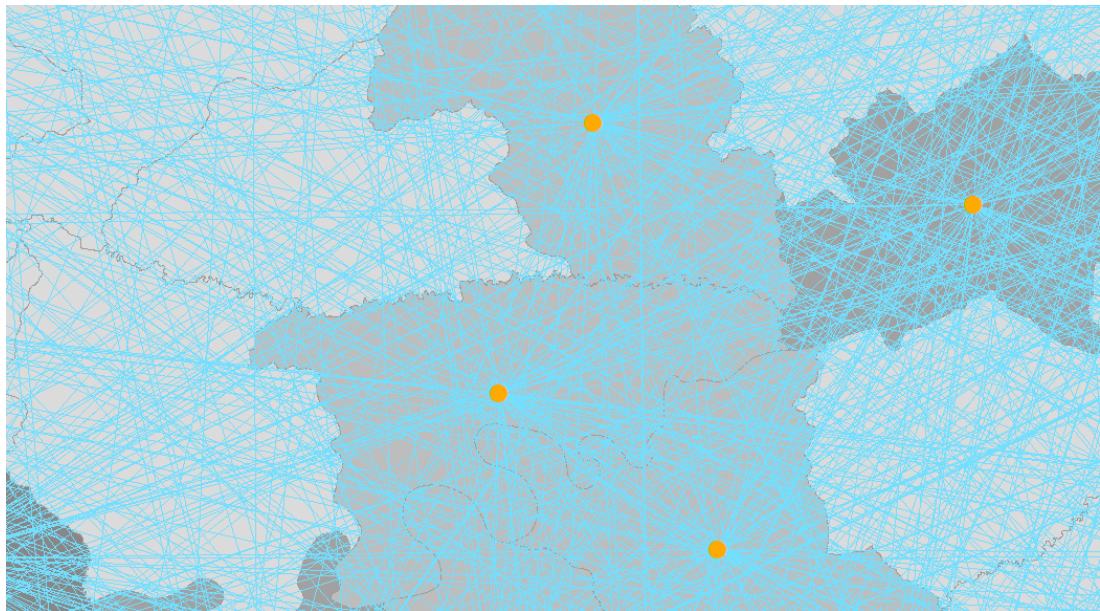
*Imagen 41. Identificación de las instalaciones de servicio.*



### 6.4.1.4 *Creación de red*

Se elaboro la red a partir de 63 nodos correspondientes al total de los sectores rurales del departamento de y 3 correspondientes a las instalaciones de servicio.

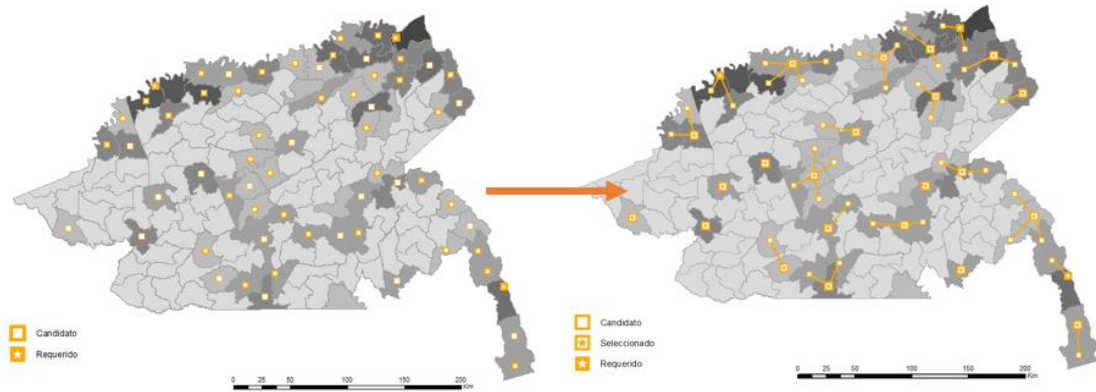
*Imagen 42. Creación de la red.*



**6.4.1.5 Ejecución y resultados de las 2 instancias: modelos de asignación localización para la definición de instalaciones intermedias y asignación- a instalaciones de servicio.**

En la primera instancia se designaron las instalaciones de servicio como requeridas y las agrupaciones demográficas como candidatas; para los diferentes escenarios se modeló la primera instancia dependiendo de las características relacionadas con el rango de los drones.

Imagen 43. Resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 1.



Como resultado se obtuvo la selección de instalaciones intermedias, asignando a cada una de estas los sectores rurales a atender y la demanda atendida, así como aquella que llega directamente a las instalaciones finales. Por otra parte, se obtuvo la distancia entre cada par origen-destino.

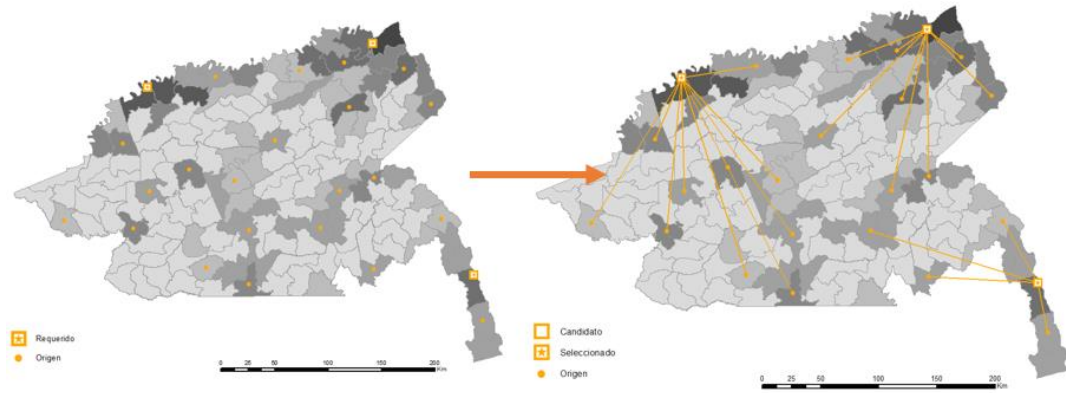
Imagen 44. Extracto del resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 1.

ObjectID	Shape	Name	FacilityType	Weight	Capacity	DemandCount	DemandWeight	SourceID	SourceOID	PosAlong	SideOfEdge	CurbApproach	Status	Total_Longitud	TotalWeighted_Longitud
137	Point	Location 64	Required	1	<Null>	3	327	RED_CTM12	598	0.000062	Right Side	Either side of vehicle	OK	34488.757957	1262025.896896
138	Point	Location 65	Required	1	<Null>	3	253	RED_CTM12	1914	0.000099	Left Side	Either side of vehicle	OK	44283.981271	2578164.631355
139	Point	Location 66	Required	1	<Null>	2	73	RED_CTM12	1923	0.000098	Right Side	Either side of vehicle	OK	19770.161716	237241.940594
74	Point	Location 1	Chosen	1	<Null>	3	87	RED_CTM12	9	0.000117	Right Side	Either side of vehicle	OK	48758.445751	1090148.272276
83	Point	Location 10	Chosen	1	<Null>	4	69	RED_CTM12	727	0.999782	Left Side	Either side of vehicle	OK	84350.014313	1204923.915336

A partir de los resultados obtenidos, se calculó la distancia total recorrida en la primera instancia como se indicó en la Ecuación 4.

Para la segunda instancia modeló la asignación a las instalaciones finales, seleccionando como puntos de origen las instalaciones intermedias y como puntos finales las instalaciones de servicio.

Imagen 45. Resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 2.



Como resultado se obtuvo la asignación de las instalaciones finales para cada instalación intermedia. Asimismo, se obtuvo la distancia para cada par origen-destino.

Imagen 46. Extracto del resultado del modelo evaluado en la etapa 1-instancia 2.

Lines								
	ObjectID	Shape	Name	FacilityID	DemandID	Weight	Total_Longitud	TotalWeighted_Longitud
▶	1581	Polyline	Location 1 - Location 1	140	350	87	38254.648578	3328154.426304
	1582	Polyline	Location 1 - Location 2	140	351	69	72027.950648	4969928.594704
	1583	Polyline	Location 1 - Location 3	140	352	62	31642.41679	1961829.841008
	1584	Polyline	Location 1 - Location 5	140	354	14	129136.35625	1807908.987497
	1585	Polyline	Location 1 - Location 6	140	355	55	63629.548589	3499625.172382

Nota: Gráficos generados a partir de la información analizada para cada departamento.

Para diseñar cada uno de los escenarios se planteó realizar viajes con un ciclo semanal (considerando 6 días laborales), variando la cantidad de drones que recolectaron las muestras en la primera instancia calculando el número de días necesarios para atender la demanda como se indicó en la Ecuación 5, el número de días necesarios para atender el total de la demanda como se indicó en la Ecuación 6 y la distancia total recorrida desde las instalaciones intermedias hasta las instalaciones finales como se indicó en la Ecuación 8.

#### 6.4.1.6 Evaluación de escenarios

Se evaluaron 22 escenarios variando el tipo y numero de drones que atendieron la primera instancia. Dadas las longitudes entre las instalaciones intermedias e instalaciones finales, para la segunda instancia se seleccionó como vehículo de transporte el Dron-180.

### 6.4.1.6.1 Escenarios Dron-30

A continuación en la Imagen 47 y la Imagen 48 se presentan los resultados gráficos de la modelación en la primera y segunda instancia.

Imagen 47. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-30

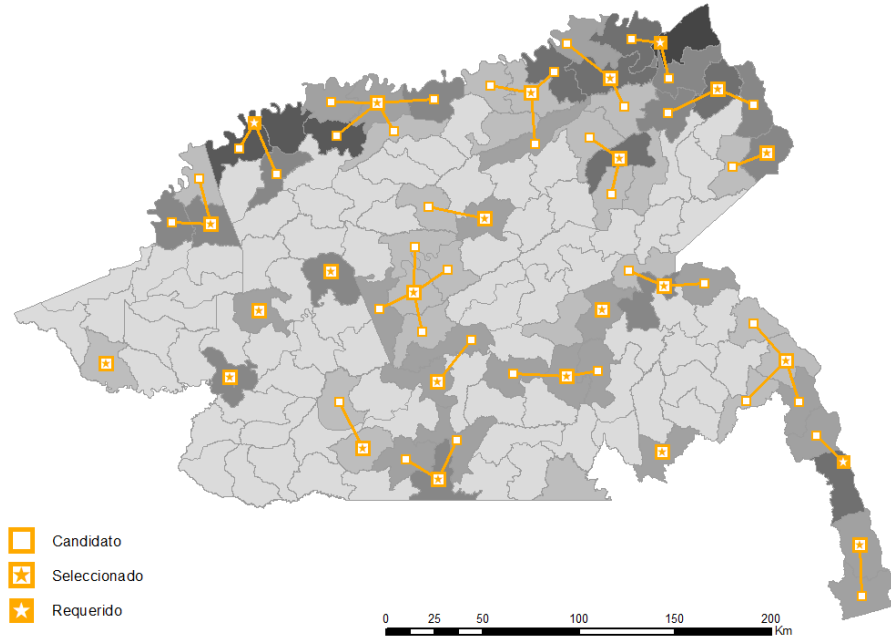
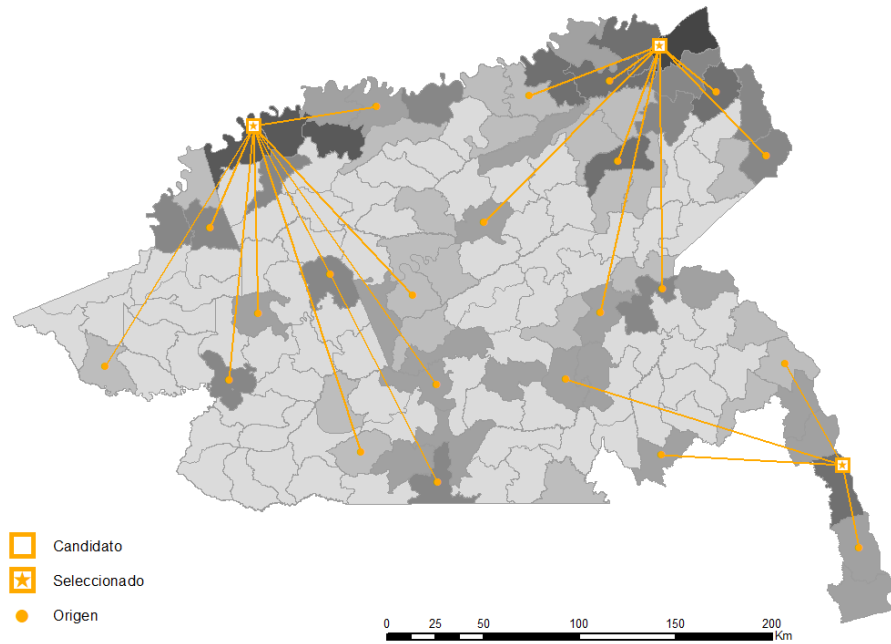


Imagen 48. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-30





Se evaluaron 3 escenarios con el Dron-30, estimando un rendimiento de 4 operaciones diarias, posteriormente se varió el número de vehículos usados para la recolección en la primera instancia, hasta encontrar el número necesario de drones para transportar la totalidad de muestras hasta las instalaciones finales en un tiempo máximo en 6 meses.

Se transportaron 774 muestras a las instalaciones intermedias y 653 muestras llegaron directamente a las instalaciones finales, para un total de 1427 ejemplares transportados. En la primera instancia se seleccionaron 22 instalaciones como intermedias, en donde se recorrió una distancia de 26726 km y en la segunda instancia la longitud recorrida a las instalaciones finales fue de 7591 km para el escenario con un dron, 5773 km para el escenario con dos drones y 4486 km para el escenario con tres drones.

El tiempo necesario para recoger el total de las muestras y llevarlas a las instalaciones finales para el primer escenario fue de 15 meses, para el de 8 meses y para el tercero de 6 meses. En la Tabla 13 se presentan los principales resultados de las modelaciones para el Dron-30.

Tabla 13. Resumen de resultados modelación Dron-30

	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>
<i>Tipo de Dron instancia 1</i>	DRON-30	DRON-30	DRON-30
<i>Tipo de dron instancia 2</i>	DRON-180	DRON-180	DRON-180
<i>Numero de drones</i>	1	2	3
<i>Instalaciones intermedias</i>	und 22	22	22
<i>Distancia recorrida 1era instancia</i>	km 26726	26726	26726
<i>Distancia recorrida 2da instancia</i>	km 7591	5773	4486
<i>Distancia total recorrida</i>	km 34317	32499	31212
<i>Muestras a inst. intermedias</i>	und 774	774	774
<i>Muestras a inst. finales en la 1era instancia</i>	und 653	653	653
<i>Total, de muestras transportadas</i>	und 1427	1427	1427
<i>Número de Operaciones diarias</i>	und 4	4	4
<i>Días recolección instalaciones intermedias</i>	día 197	99	67
<i>Días recolección instalaciones finales</i>	día 163	82	54
<i>Días</i>	360	181	121
<i>meses</i>	15	8	6



### 6.4.1.6.2 Escenarios Dron-60

A continuación, en la Imagen 49 y la Imagen 50 se presentan los resultados gráficos de la modelación en la primera y segunda instancia.

Imagen 49. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-60

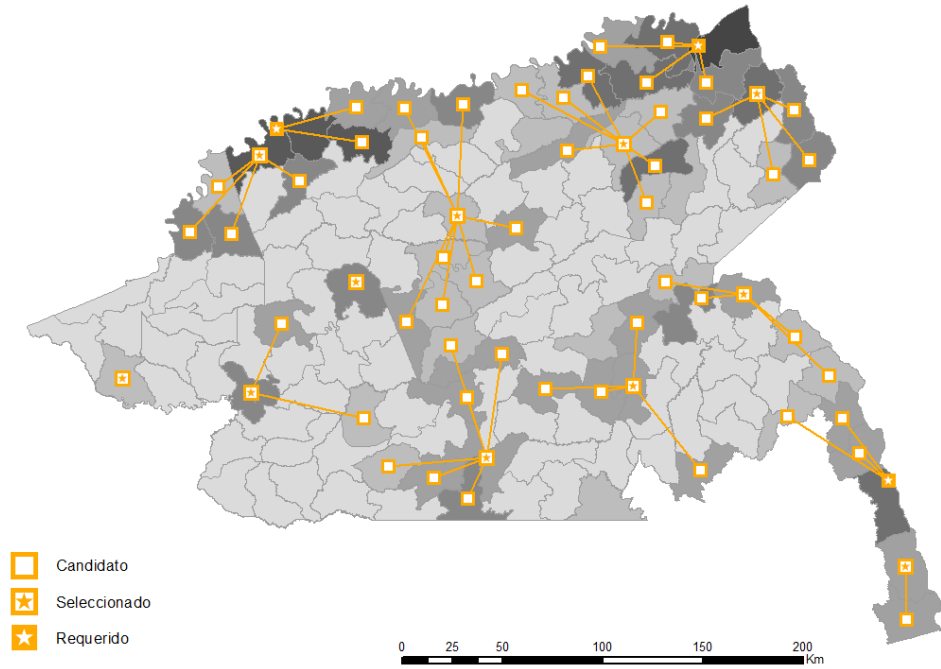
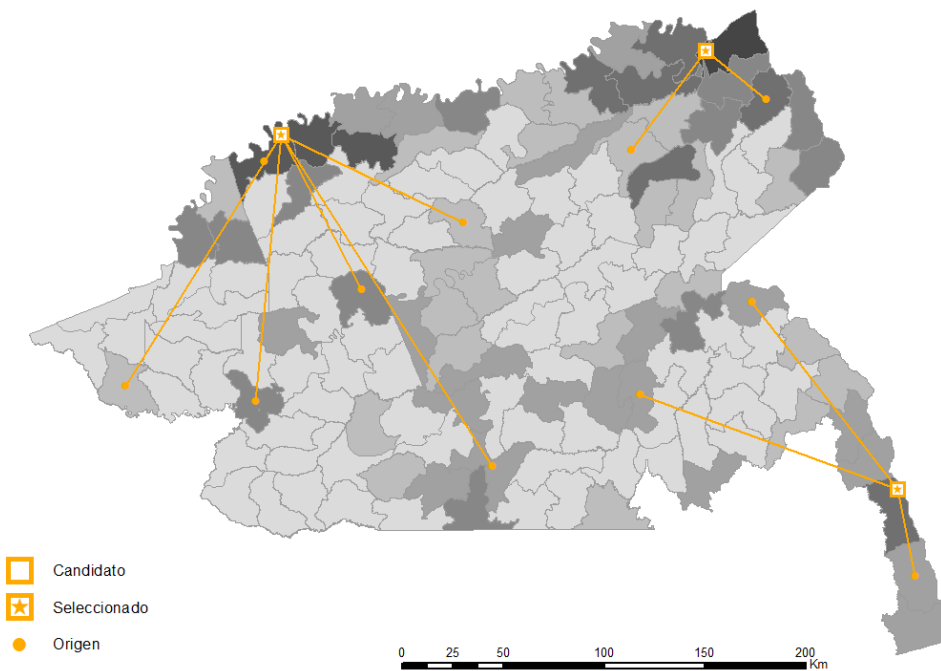


Imagen 50. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-60



Se evaluaron 4 escenarios con el Dron-60, estimando un rendimiento de 3 operaciones diarias por vehículo, posteriormente se varió el número de drones usados para la recolección en la primera instancia, hasta encontrar el número necesario de drones para transportar la totalidad de muestras hasta las instalaciones finales en un tiempo máximo en 6 meses.

Se transportaron 761 muestras a las instalaciones intermedias y 666 muestras llegaron directamente a las instalaciones finales, para un total de 1427 ejemplares transportados. En la primera instancia se seleccionaron 11 instalaciones como intermedias, en donde se recorrió una distancia de 51293 km y en la segunda instancia la longitud recorrida a las instalaciones finales fue de 7455 km para el escenario con un dron, 4591 km para el escenario con dos drones, 3231 km para el escenario con tres drones, y 3000 km para el escenario con cuatro drones.

El tiempo necesario para recoger el total de las muestras y llevarlas a las instalaciones finales para el cuarto escenario fue de 20 meses, para el quinto escenario de 10 meses, para el sexto escenario de 7 meses y para el séptimo escenario de 6 meses. En la Tabla 14 se presentan los principales resultados de las modelaciones para un Dron-60.

Tabla 14. Resumen de resultados modelación Dron-60

	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Escenario 7
<i>Tipo de Dron instancia 1</i>	DRON-60	DRON-60	DRON-60	DRON-60
<i>Tipo de dron instancia 2</i>	DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180
<i>Numero de drones</i>	1	2	3	4
<i>Instalaciones intermedias</i>	und 11	11	11	11
<i>Distancia recorrida 1era instancia</i>	km 51293	51293	51293	51293
<i>Distancia recorrida 2da instancia</i>	km 7455	4591	3231	3000
<i>Distancia total recorrida</i>	km 58748	55884	54524	54293
<i>Muestras a inst. intermedias</i>	und 761	761	761	761
<i>Muestras a inst. finales en la 1era instancia</i>	und 666	666	666	666
<i>Total, de muestras transportadas</i>	und 1427	1427	1427	1427
<i>Número de Operaciones diarias</i>	und 3	3	3	3
<i>Días recolección instalaciones intermedias</i>	día 254	127	86	66
<i>Días recolección instalaciones finales</i>	día 221	111	74	56
<i>Días</i>	475	238	160	122
<i>meses</i>	20	10	7	6

### 6.4.1.6.3 Escenarios Dron-90

A continuación, en la Imagen 51 y la Imagen 52 se presentan los resultados gráficos de la modelación en la primera y segunda instancia.

Imagen 51. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-90

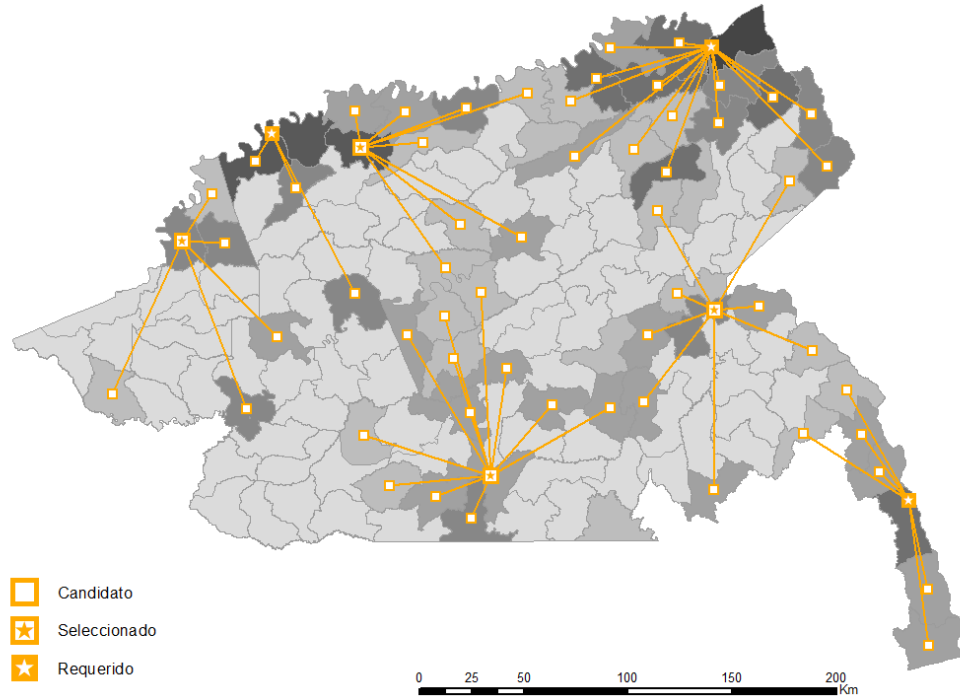
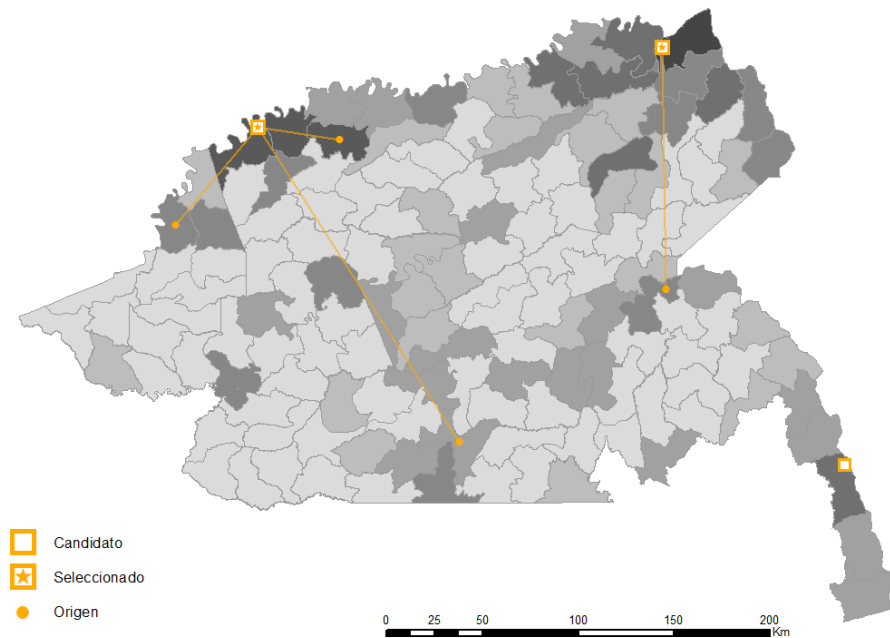


Imagen 52. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-90



Se evaluaron 5 escenarios con el Dron-90, estimando un rendimiento de 2 operaciones diarias por vehículo, posteriormente se varió el número de drones usados para la recolección en la primera instancia, hasta encontrar el número necesario de drones para transportar la totalidad de muestras hasta las instalaciones finales en un tiempo máximo de 6 meses.

Se transportaron 438 muestras a las instalaciones intermedias y 989 muestras llegaron directamente a las instalaciones finales, para un total de 1427 ejemplares transportados. En la primera instancia se seleccionaron 4 instalaciones como intermedias, en donde se recorrió una distancia de 72548 km y en la segunda instancia la longitud recorrida a las instalaciones finales fue de 7691 km para el escenario con un dron, 3846 km para el escenario con dos drones, 2897 km para el escenario con tres drones, 2287 km para el escenario con cuatro drones y 1559 para el escenario con seis drones.

El tiempo necesario para recoger el total de las muestras y llevarlas a las instalaciones finales para el octavo escenario fue de 30 meses, para el noveno escenario de 15 meses, para el décimo escenario de 10 meses, para el decimoprimer escenario de 8 meses y para decimosegundo escenario de 5 meses. En la Tabla 15 se presentan los principales resultados de las modelaciones para un Dron-90.

Tabla 15. Resumen de resultados modelación Dron-90

	Escenario 8	Escenario 9	Escenario 10	Escenario 11	Escenario 12
<i>Tipo de Dron instancia 1</i>	DRON-90	DRON-90	DRON-90	DRON-90	DRON-90
<i>Tipo de dron instancia 2</i>	DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180
<i>Numero de drones</i>	1	2	3	4	6
<i>Instalaciones intermedias</i>	und 4	4	4	4	4
<i>Distancia recorrida 1era instancia</i>	km 72548	72548	72548	72548	72548
<i>Distancia recorrida 2da instancia</i>	km 7691	3846	2897	2287	1559
<i>Distancia total recorrida</i>	km 80239	76393	75445	74834	74106
<i>Muestras a inst. intermedias</i>	und 438	438	438	438	438
<i>Muestras a inst. finales en la 1era instancia</i>	und 989	989	989	989	989
<i>Total, de muestras transportadas</i>	und 1427	1427	1427	1427	1427
<i>Número de Operaciones diarias</i>	und 2	2	2	2	2
<i>Días recolección instalaciones intermedias</i>	día 220	110	74	56	37
<i>Días recolección instalaciones finales</i>	día 495	247	165	124	83
<i>Días</i>	715	357	239	180	120
<i>meses</i>	30	15	10	8	5

#### 6.4.1.6.4 Escenarios Dron-120

A continuación, en la Imagen 53 y la Imagen 54 se presentan los resultados gráficos de la modelación en la primera y segunda instancia.

Imagen 53. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-120

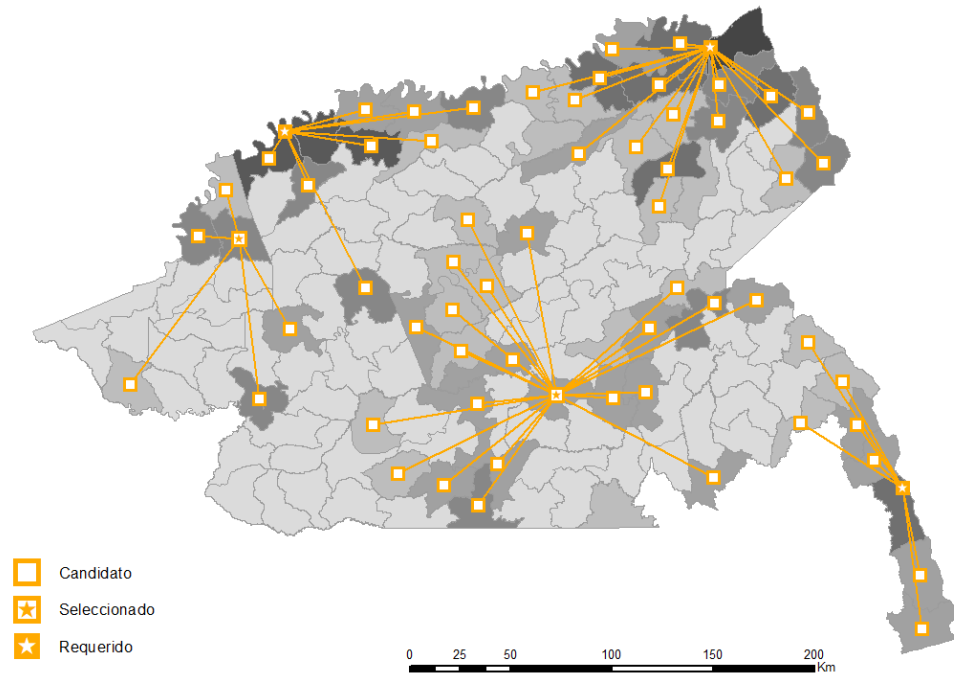
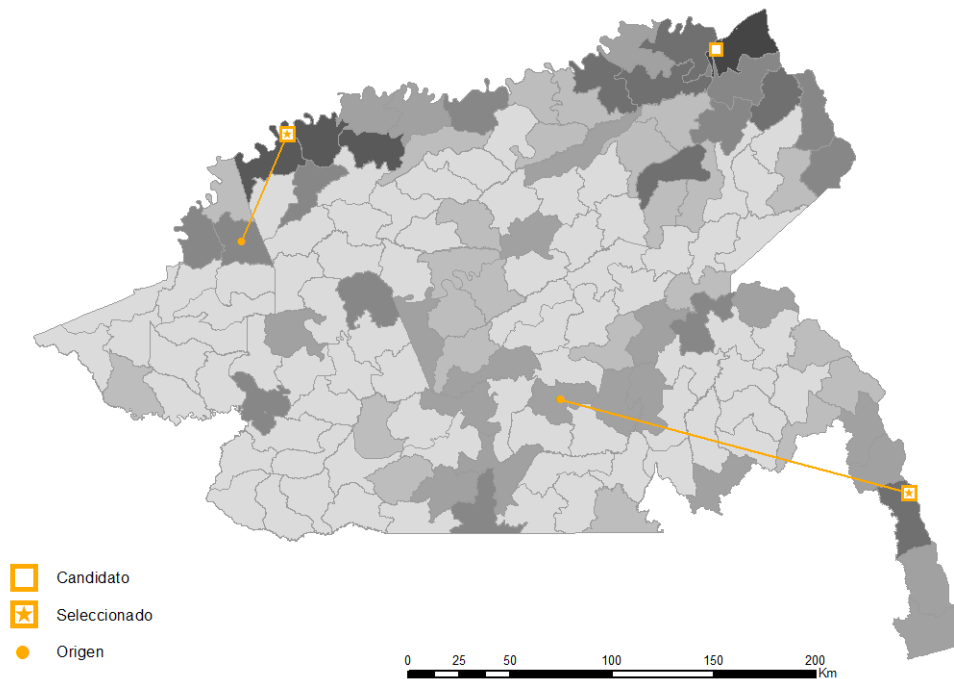


Imagen 54. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-120



Se evaluaron 5 escenarios con el Dron-120, estimando un rendimiento de 1 operación diaria por vehículo, posteriormente se varió el número de drones usados para la recolección en la primera instancia, hasta encontrar el número necesario de drones para transportar la totalidad de muestras hasta las instalaciones finales en un tiempo máximo de 6 meses.

Se transportaron 287 muestras a las instalaciones intermedias y 1140 muestras llegaron directamente a las instalaciones finales, para un total de 1427 ejemplares transportados. En la primera instancia se seleccionaron 2 instalaciones como intermedias, en donde se recorrió una distancia de 94393 km y en la segunda instancia la longitud recorrida a las instalaciones finales fue de 13785 km para el escenario con un dron, 6950 km para el escenario con dos drones, 4832 km para el escenario con tres drones, 3652 km para el escenario con cuatro drones y 1294 para el escenario con once drones.

El tiempo necesario para recoger el total de las muestras y llevarlas a las instalaciones finales para el decimotercero escenario fue de 60 meses, para el decimocuarto escenario de 30 meses, para el decimoquinto escenario de 20 meses, para el decimosexto escenario de 15 meses y para decimoséptimo escenario de 6 meses. En la Tabla 16 se presentan los principales resultados de las modelaciones para un Dron-120.

Tabla 16. Resumen de resultados modelación Dron-120

	Escenario 13	Escenario 14	Escenario 15	Escenario 16	Escenario 17
<i>Tipo de Dron instancia 1</i>	DRON-120	DRON-120	DRON-120	DRON-120	DRON-120
<i>Tipo de dron instancia 2</i>	DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180
<i>Numero de drones</i>	1	2	3	4	11
<i>Instalaciones intermedias</i>	und 2	2	2	2	2
<i>Distancia recorrida 1era instancia</i>	km 94393	94393	94393	94393	94393
<i>Distancia recorrida 2da instancia</i>	km 13785	6950	4832	3652	1294
<i>Distancia total recorrida</i>	km 108178	101343	99225	98046	95687
<i>Muestras a inst. intermedias</i>	und 287	287	287	287	287
<i>Muestras a inst. finales en la 1era instancia</i>	und 1140	1140	1140	1140	1140
<i>Total de muestras transportadas</i>	und 1427	1427	1427	1427	1427
<i>Número de Operaciones diarias</i>	und 1	1	1	1	1
<i>Días recolección instalaciones intermedias</i>	día 287	144	96	72	26
<i>Días recolección instalaciones finales</i>	día 1140	571	380	285	104
<i>Días</i>	1427	715	476	357	130
<i>meses</i>	60	30	20	15	6

#### 6.4.1.6.5 Escenarios Dron-180

A continuación, en la Imagen 55 y la Imagen 56 se presentan los resultados gráficos de la modelación en la primera y segunda instancia.

Imagen 55. Resultado de la modelación de la primera instancia para un Dron-180

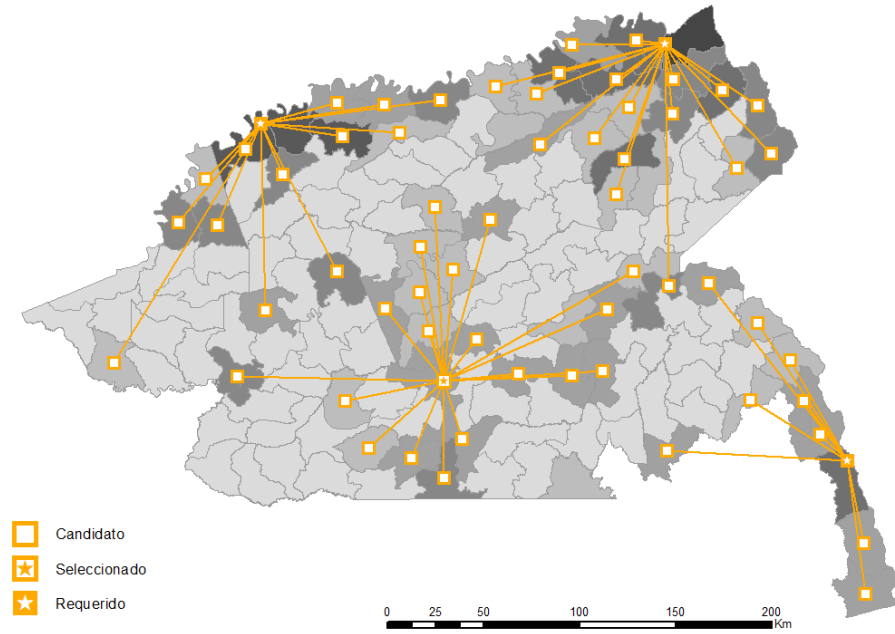
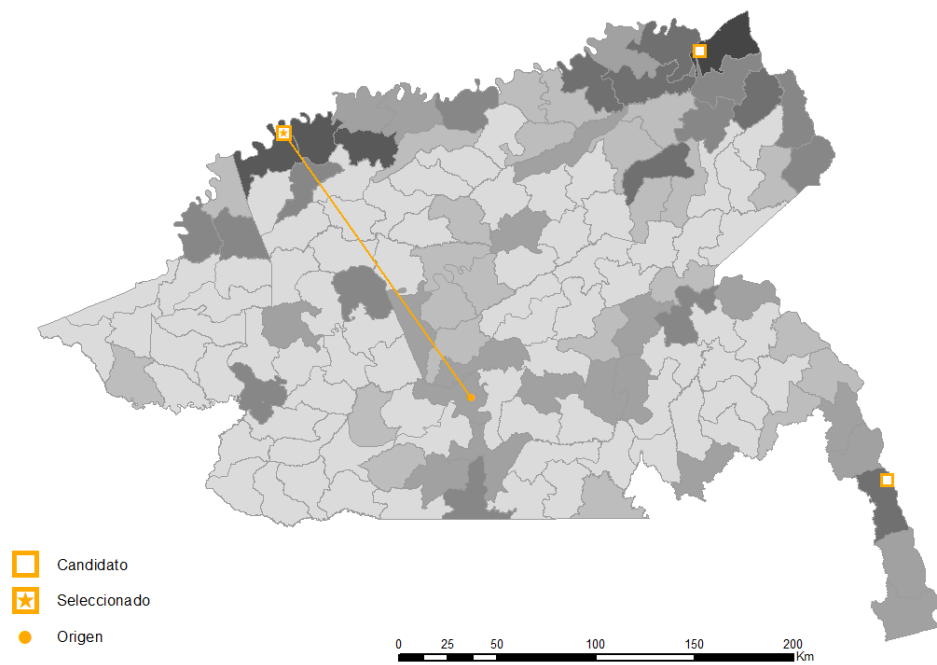


Imagen 56. Resultado de la modelación de la segunda instancia para un Dron-30



Se evaluaron 5 escenarios con el Dron-180, estimando un rendimiento de 1 operación diaria por vehículo, posteriormente se varió el número de drones usados para la recolección en la primera instancia, hasta encontrar el número necesario de drones para transportar la totalidad de muestras hasta las instalaciones finales en un tiempo máximo de 6 meses.

Se transportaron 168 muestras a las instalaciones intermedias y 1259 muestras llegaron directamente a las instalaciones finales, para un total de 1427 ejemplares transportados. En la primera instancia se seleccionó 1 instalación como intermedia, en donde se recorrió una distancia de 102603 km y en la segunda instancia la longitud recorrida a las instalaciones finales fue de 9207 km para el escenario con un dron, 4604 km para el escenario con dos drones, 3288 km para el escenario con tres drones, 2302 km para el escenario con cuatro drones y 986 para el escenario con once drones.

El tiempo necesario para recoger el total de las muestras y llevarlas a las instalaciones finales para el decimotercero escenario fue de 60 meses, para el decimonoveno escenario de 30 meses, para el vigésimo escenario de 20 meses, para el vigesimoprimer escenario de 15 meses y para vigesimosegundo escenario de 6 meses. En la Tabla 16 se presentan los principales resultados de las modelaciones para un Dron-180.

Tabla 17. Resumen de resultados modelación Dron-180

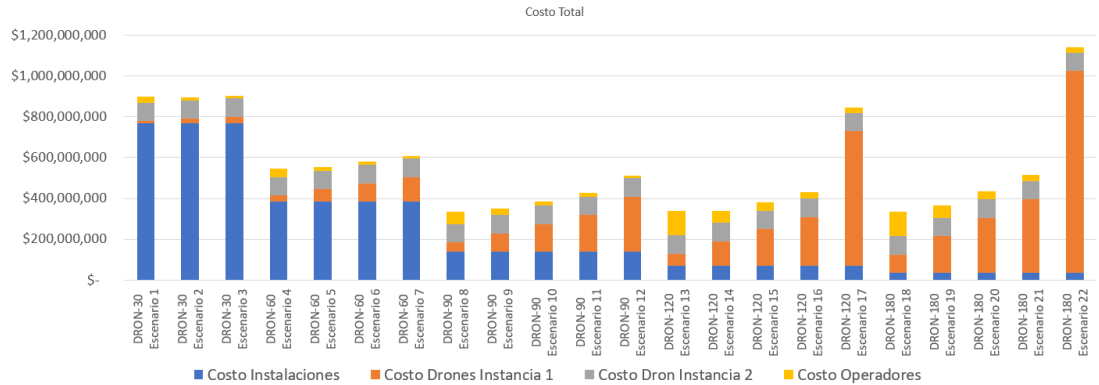
		Escenario 18	Escenario 19	Escenario 20	Escenario 21	Escenario 22
<i>Tipo de Dron instancia 1</i>		DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180
<i>Tipo de dron instancia 2</i>		DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180	DRON-180
<i>Numero de drones</i>		1	2	3	4	11
<i>Instalaciones intermedias</i>	und	1	1	1	1	1
<i>Distancia recorrida 1era instancia</i>	km	102603	102603	102603	102603	102603
<i>Distancia recorrida 2da instancia</i>	km	9207	4604	3288	2302	986
<i>Distancia total recorrida</i>	km	111810	107207	105892	104905	103590
<i>Muestras a inst. intermedias</i>	und	168	168	168	168	168
<i>Muestras a inst. finales en la 1era instancia</i>	und	1259	1259	1259	1259	1259
<i>Total de muestras transportadas</i>	und	1427	1427	1427	1427	1427
<i>Número de Operaciones diarias</i>	und	1	1	1	1	1
<i>Días recolección instalaciones intermedias</i>	día	168	84	56	42	15
<i>Días recolección instalaciones finales</i>	día	1259	630	419	315	114
<i>Días</i>		1427	714	475	357	129
<i>meses</i>		60	30	20	15	6



### 6.4.1.7 Evaluación Económica

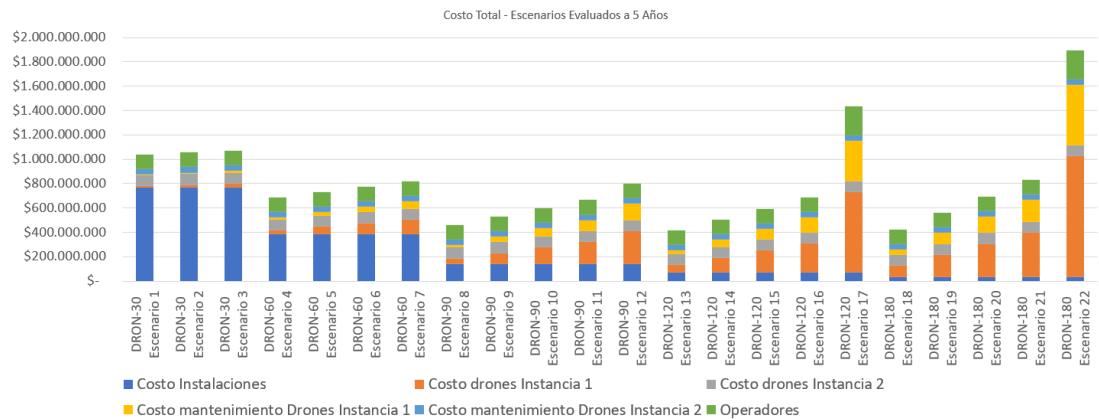
Para cada uno de los escenarios evaluados se calculó el valor total de una campaña de recolección de muestras de sangre, discriminando el costo de: las instalaciones, los drones necesarios para recolectar las muestras en la instancia 1, los vehículos necesarios para recolectar las muestras en la instancia 2 y los operadores. A Continuación, en la Imagen 57 se presentan los resultados de los cálculos realizados.

Imagen 57. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de Malaria, en el departamento de Guainía.



por otra parte, se evaluaron los escenarios en un periodo de 5 años. A continuación, en la Imagen 58 se presentan los resultados de los cálculos realizados.

Imagen 58. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de Malaria en un periodo de 5 años, en el departamento de Guainía.



## **6.4.2 Estudio del modelo en la etapa 2: cobertura de servicios en el departamento de Valle del Cauca.**

Se simuló mediante el software ArcGIS el modelo en la etapa 2 descrito, con el fin brindar la cobertura para la toma domiciliaria de muestras de sangre, buscando minimizar la longitud, tiempos y costos relacionados con el desplazamiento convencional de los pacientes hasta las instalaciones de servicio. Para la evaluación de escenarios se estudiaron 2 sectores rurales en el departamento resolviendo el modelo con vehículos tipo dron y tipo motocicleta. Se evaluaron en total 10 escenarios como se presenta a continuación.

La información evaluada y los diferentes escenarios estudiados fueron evaluados en el sistema de coordenadas Origen Nacional CTM12.

### ***6.4.2.1 Identificación de la población a atender***

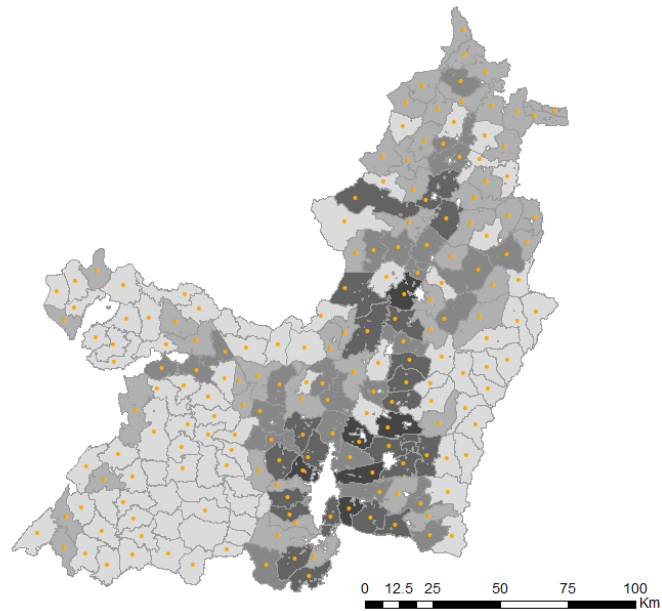
Como resultado del diagnóstico desarrollado en el numeral 6.1.7 Determinación de área de estudio a modelar, se seleccionó el departamento de Valle del Cauca para la recolección de muestras de sangre para el control de diabetes tipo 2.

En el departamento de Valle del Cauca se estimó una población de 542.043 habitantes en el área rural, y de acuerdo a lo expuesto en el numeral 6.1.2 Demanda de los servicios del sistema de salud se asumió una prevalencia de 8% de la enfermedad en la población rural, obteniendo una población de 43.364 personas a atender. Asimismo, como se analizó en el numeral 6.1.2 el examen clínico de hemoglobina glicosilada se debe realizar cada 3 meses, por lo que se tiene una demanda anual del servicio de 173.456 ejemplares.

### ***6.4.2.2 Caracterización y agrupación demográfica***

Se estableció una demanda a atender de 43.364 habitantes, la cual representa el 8% del total de la población rural. A partir de la Ecuación 1 se calculó el número total de arcos que pueden componer la red con 43.364 nodos donde se obtuvo un resultado de 940 mil millones, lo que resulta en un proceso computacional excesivo dadas las posibles soluciones que se podrían generar, las cuales son exponenciales al número de nodos y arcos de la red; por este motivo se realizó una primera agrupación en donde se distribuyeron los casos en proporción a las personas de cada uno de los sectores rurales en los que se encuentra dividido Valle del Cauca. Se seleccionaron 181 sectores rurales, descartando 14 sectores al no registrar población en las estadísticas del DANE.

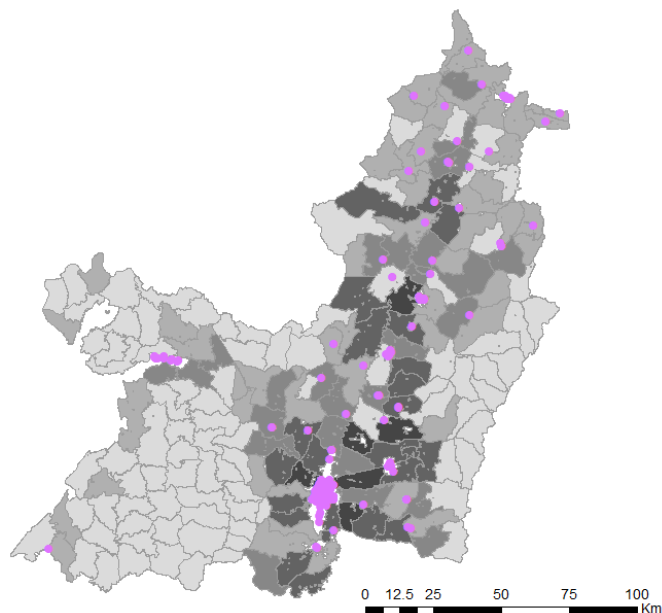
*Imagen 59. Resultado de caracterización y agrupación demográfica.*



#### **6.4.2.3 Identificación instalaciones de servicio instancia 1**

Para la primera instancia se seleccionaron los laboratorios clínicos del Valle del Cauca como instalaciones finales. Se identificaron 202 laboratorios clínicos.

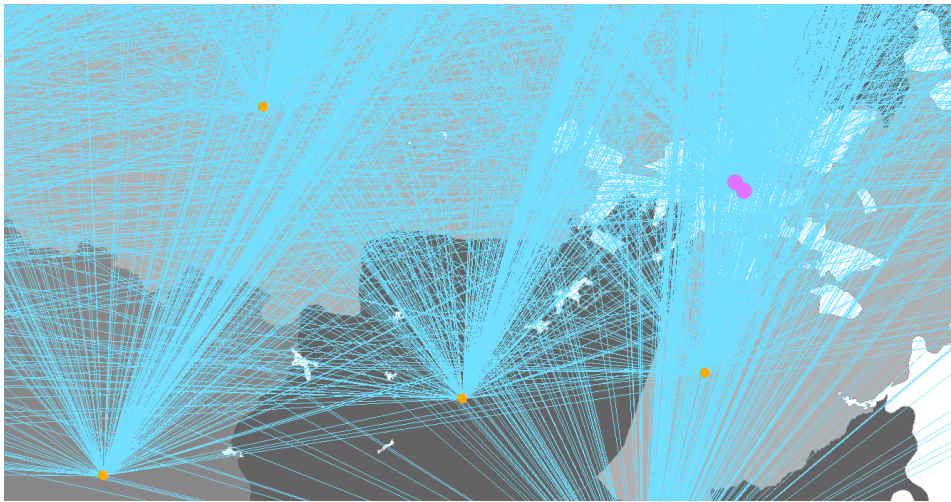
*Imagen 60. Resultado de la identificación de las instalaciones de servicio.*



#### **6.4.2.4 Creación de red instancia 1**

Se elaboro la red a partir de los 181 nodos correspondientes a la representación de las agrupaciones demográficas y 202 que representan los laboratorios clínicos.

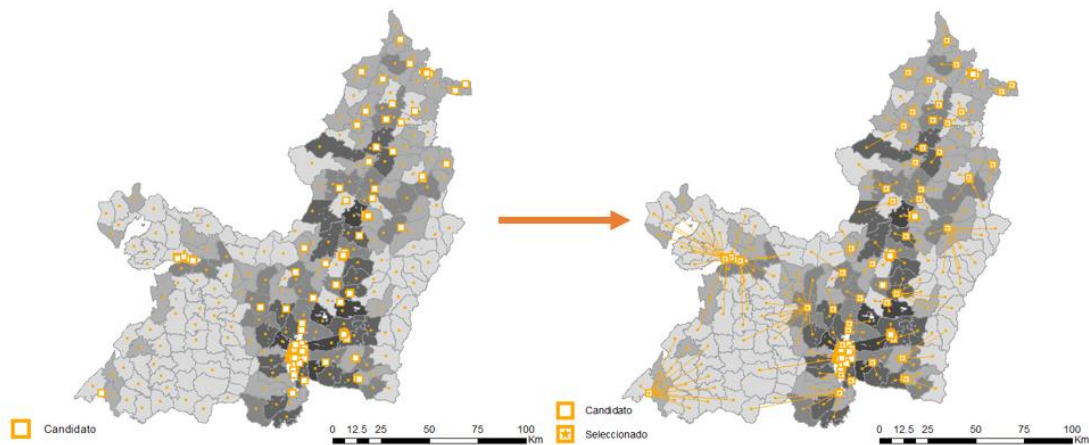
Imagen 61. Resultado de la creación de la red.



#### 6.4.2.5 Ejecución de la Instancia 1 modelo de Asignación – Localización. Definición de instalaciones

En la primera instancia se definió para cada sector rural la instalación que lo atenderá, con el fin de modelar y aprovechar la capacidad instalada se estableció el número de instalaciones a escoger igual 102, el cual corresponde al total de las instalaciones candidatas. El modelo se ejecutó seleccionando como vehículo de transporte un Dron-60 relacionando el límite de impedancia con el rango de cobertura del mismo.

Imagen 62. Resultado del modelo evaluado en la etapa 2-instancia 1.



Como resultado se obtuvo la selección de las instalaciones finales, asignando a cada una de estas sus correspondientes sectores rurales y demanda a atender. Por otra parte, se obtuvo la distancia entre cada par origen-destino.

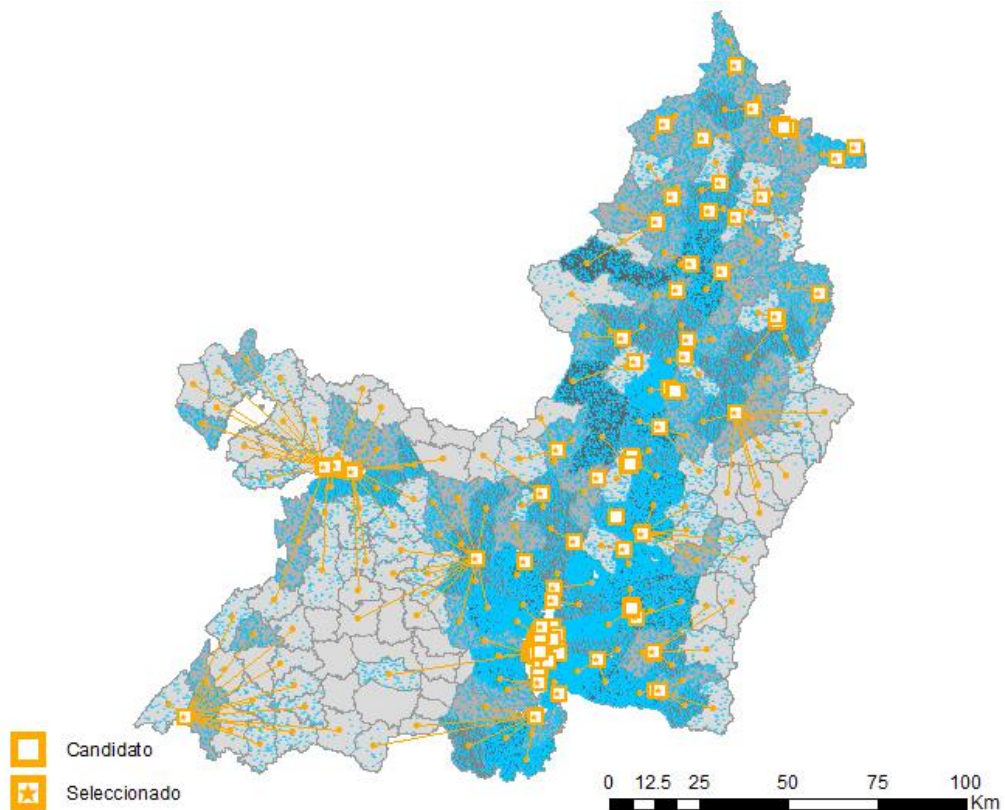
Con el fin de comprobar la utilidad de usar todas las instalaciones y validar la diferencia que pueden tener los problemas de asignación localización (utilizando un número específico de instalaciones o utilizando el menor número posible de instalaciones) se calculó la distancia total recorrida a partir de la Ecuación 4.

Para el primer caso en donde se tiene como objetivo principal minimizar la impedancia se obtuvo 68 instalaciones seleccionadas con una longitud de 743.556 km recorridos; Para el segundo caso donde el objetivo principal es minimizar las instalaciones se obtuvo 5 instalaciones seleccionadas con una longitud de 1.914.125 km recorridos.

#### 6.4.2.6 *Demanda por atender en la instancia 2 modelo VRP-ruteo de vehículos.*

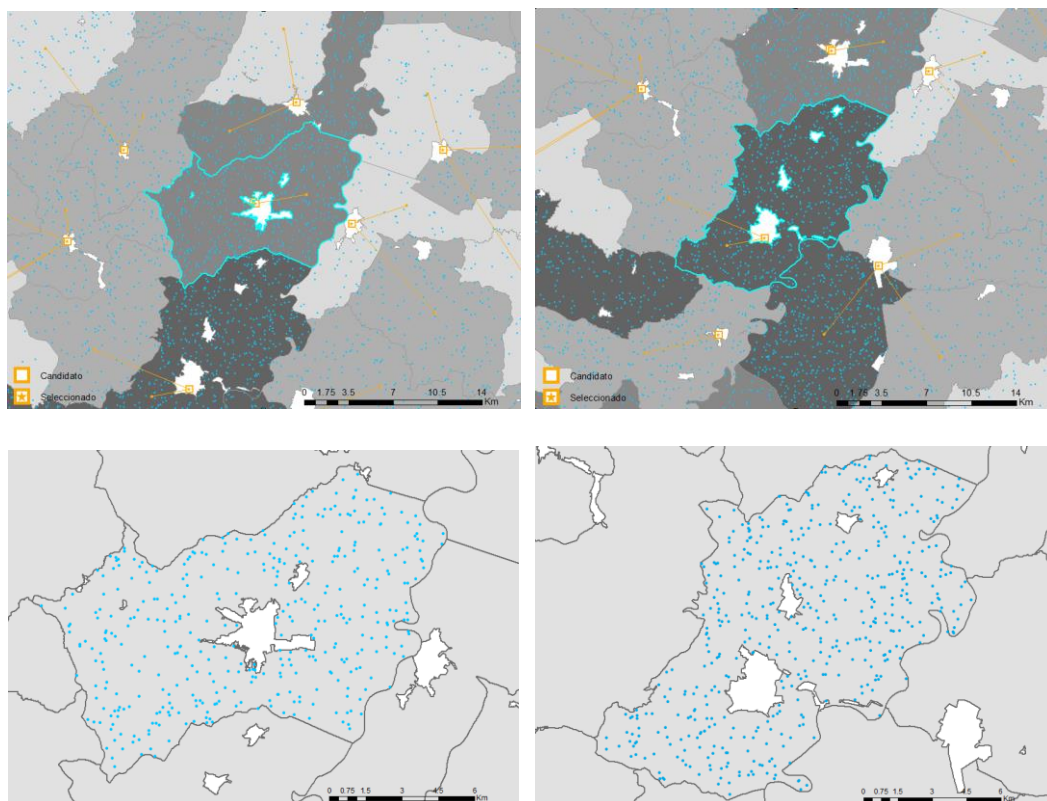
En la segunda instancia se distribuyó la demanda asignada en la primera, generando puntos aleatorios en el área del polígono.

*Imagen 63. Resultado de distribución aleatoria de la demanda.*



Para la segunda instancia se seleccionaron dos sectores rurales el primero localizado en el municipio de la Unión y el segundo en Roldanillo; estos se eligieron teniendo en cuenta que contarán con una red vial, con el fin de comparar los resultados de los modelos utilizando como vehículos drones y motocicletas.

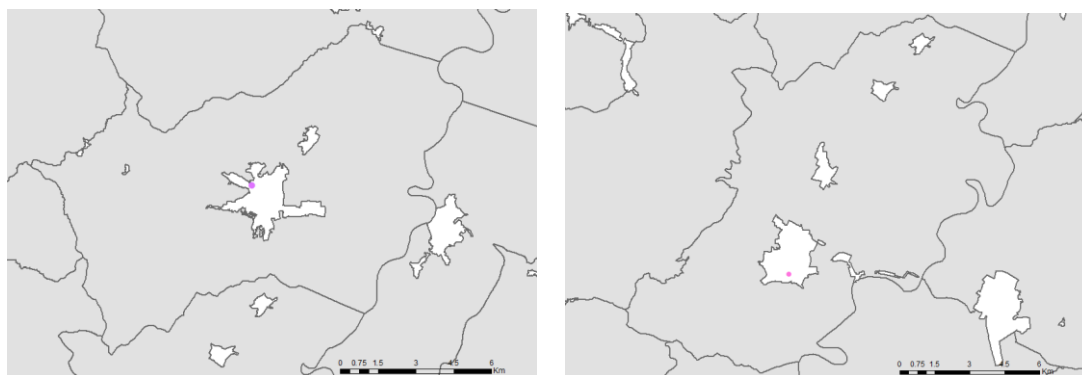
Imagen 64. Demanda a atender en los sectores rurales de La Unión y Roldanillo.



#### 6.4.2.7 Identificación de la instalación de servicio instancia 2

De acuerdo con los resultados de la instancia 1, se asignó la instalación de servicio para los dos casos analizados.

Imagen 65. Identificación de las instalaciones de servicio para los sectores rurales de La Unión y Roldanillo



#### 6.4.2.8 Creación de red instancia 2

Para cada uno de los casos analizados se elaboró una red para los vehículos tipo dron a partir de los nodos correspondientes a la demanda a atender y la instalación de servicio; por otra



parte, para las motocicletas la red que se utilizó fue la red vial existente empleada en el numeral 6.1 Diagnostico.

*Imagen 66. Redes generadas de los modelos en la etapa 2-instancia 2.*



En los escenarios donde se utilizaron motocicletas para evaluar el modelo logístico los puntos de demanda se asignaron a la ubicación más cercana de la red asumiendo una distancia máxima inicial desde el punto de demanda hasta la red de 500m, sin embargo, debido a la accesibilidad a las vías desde los puntos de demanda, varios no fueron localizados en la red.

En la Tabla 18, se presentan la cantidad de puntos de demanda no ubicados en función de la distancia a la red vial.

*Tabla 18. Puntos de demanda no localizados.*

<b>Sector</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Puntos de demanda localizados</b>	<b>Puntos de demanda no localizados</b>
<b>La Unión</b>	500	312	84
<b>La Unión</b>	1000	386	10
<b>Roldanillo</b>	500	368	134
<b>Roldanillo</b>	1000	471	31
<b>Roldanillo</b>	1500	496	6

#### **6.4.2.9 Instancia 2 modelo VRP-ruteo de vehículos.**

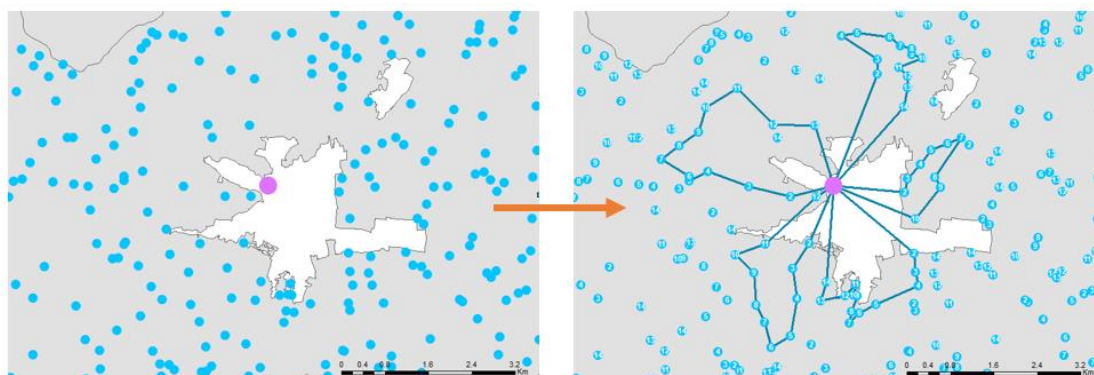
Para la segunda instancia se modeló el VRP designando las instalaciones y puntos de demanda identificados en los numerales precedentes. Por otra parte, se definieron los parámetros de los vehículos teniendo en cuenta la logística de la operación, asignando los tiempos que se describen en la Tabla 19.

Tabla 19. Parámetros de los vehículos

	Drones	Motocicletas
Tiempo de preparación en instalación (horas)	0.5	0.5
Tiempo de recepción en la instalación (horas)	0.5	0.5
Tiempo máximo de servicio (horas)	8	8
Tiempo máximo de viaje (horas)	0.5	-

La velocidad de operación de la red para el caso de los drones fue constante de 60 km/h; para las motocicletas el valor se asignó en función de la red vial como se describió en el numeral 6.1.5.

Imagen 67. Resultado del modelo evaluado en la etapa 2-instancia 2.



Como resultado se obtuvieron las rutas para atender el total de la demanda, indicando el orden y recorrido de cada trayecto.

Imagen 68. Extracto del resultado del modelo evaluado en la etapa 2-instancia 2.

OrderCount	TotalTravelTime	TotalCost	RegularTimeCost	OvertimeCost	DistanceCost	TotalTime	TotalOrderServiceTime	TotalBreakServiceTime	TotalDistance	StartTime	EndTime	StartTimeUTC	EndTimeUTC	TotalWait
11	0.125645	6.625645	6.625645	0	0	6.625645	5.5	0	7538.664117	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 1:37:32 p. m.		
12	0.139959	7.139959	7.139959	0	0	7.139959	6	0	8384.554359	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 2:08:24 p. m.		
9	0.105249	5.605249	5.605249	0	0	5.605249	4.6	0	6314.965992	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 12:36:19 p. m.		
13	0.127878	7.627878	7.627878	0	0	7.627878	6.5	0	7672.694472	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 2:37:40 p. m.		
13	0.136829	7.636829	7.636829	0	0	7.636829	6.5	0	8209.747775	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 2:38:13 p. m.		
13	0.169611	7.69611	7.69611	0	0	7.69611	6.5	0	10176.594805	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 2:41:11 p. m.		
13	0.164211	7.664211	7.664211	0	0	7.664211	6.5	0	9852.584808	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 2:39:51 p. m.		
13	0.204726	7.704726	7.704726	0	0	7.704726	6.5	0	12283.579544	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 2:42:17 p. m.		
11	0.177468	7.677468	7.677468	0	0	7.677468	6.5	0	10544.451447	3/09/2022 7:00	3/09/2022 7:00:00 a.	3/09/2022 2:40:21 p. m.		

Nota: Gráficos generados a partir de la información analizada para cada departamento.

Se modelaron dos escenarios para cada sector (variando tipo de vehículo) y a partir de los resultados obtenidos se extrapolaron los mismos, planteando escenarios a partir de los rendimientos registrados, con el fin de evaluar la atención del total de la demanda del valle del



cauca estudiando una recolección de anual para un total de 43.364 muestras y una recolección trimestral para un total 173.456 muestras, evaluadas en un periodo de 12 meses.

#### ***6.4.2.10 Evaluación de escenarios***

Se modelaron 4 escenarios variando la localización y el tipo de vehículo, a partir de estos se plantearon 8 escenarios adicionales atendiendo la demanda evaluada a un año del departamento del Valle del Cauca, con una recolección anual y otra trimestral para un total de 12 escenarios.

#### 6.4.2.10.1 Escenarios modelados en el municipio de La Unión.

Una primera modelación consistió en calcular la distancia total acumulada recorrida desde cada uno de los puntos de demanda hasta la instalación de servicio, realizando viajes sencillos y directos. A continuación, en la Imagen 69 y en la Tabla 20 se presentan los resultados del análisis. Se evaluaron dos modelos variando en tipo de vehículo que transporta la muestra (dron o motocicleta).

Imagen 69. Resultado de la modelación – distancia total acumulada.

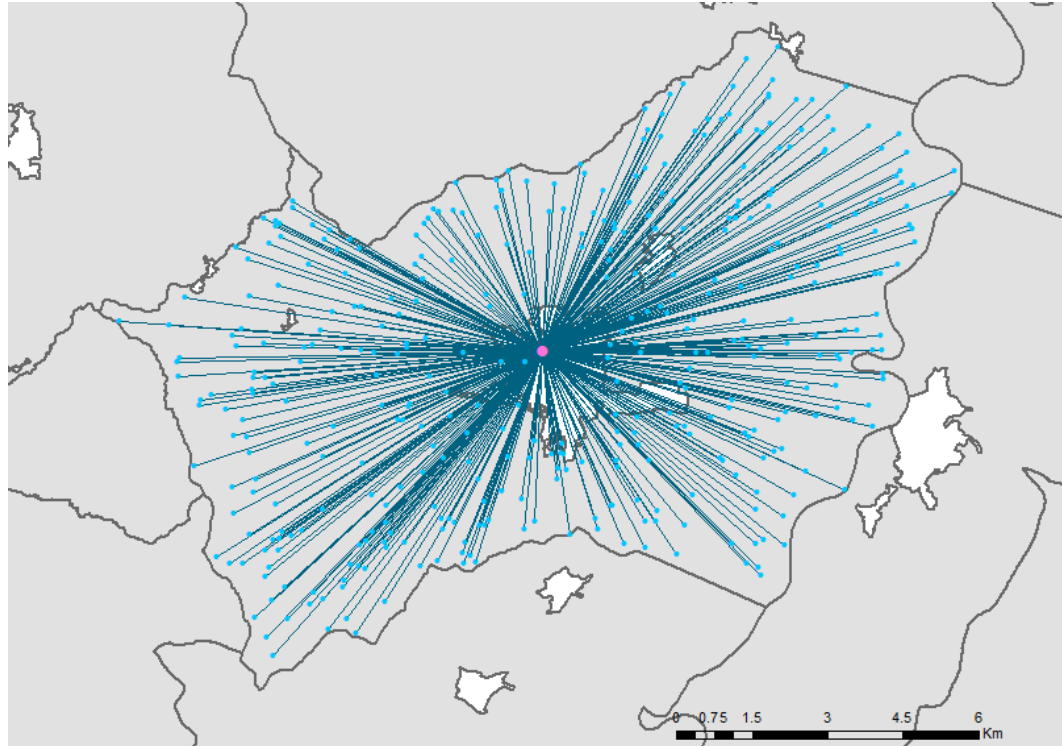


Tabla 20. Resumen de resultados modelación de viajes directos en el municipio de la unión transportando las muestras en drones.

<b>Vehículo</b>	<b>Longitud total recorrida (km)</b>
<b>Dron</b>	1874
<b>Motocicleta</b>	2707

A continuación, en la Imagen 70 y en la Imagen 71 se presentan los resultados gráficos de la modelación de la segunda instancia para el municipio de la unión en donde se utilizó un dron como vehículo para transportar las muestras de sangre.

Imagen 70. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante drones.

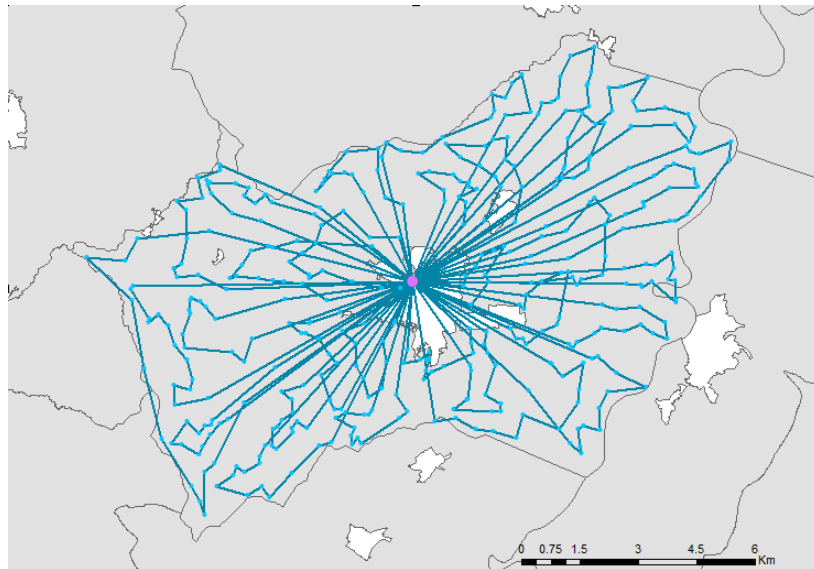
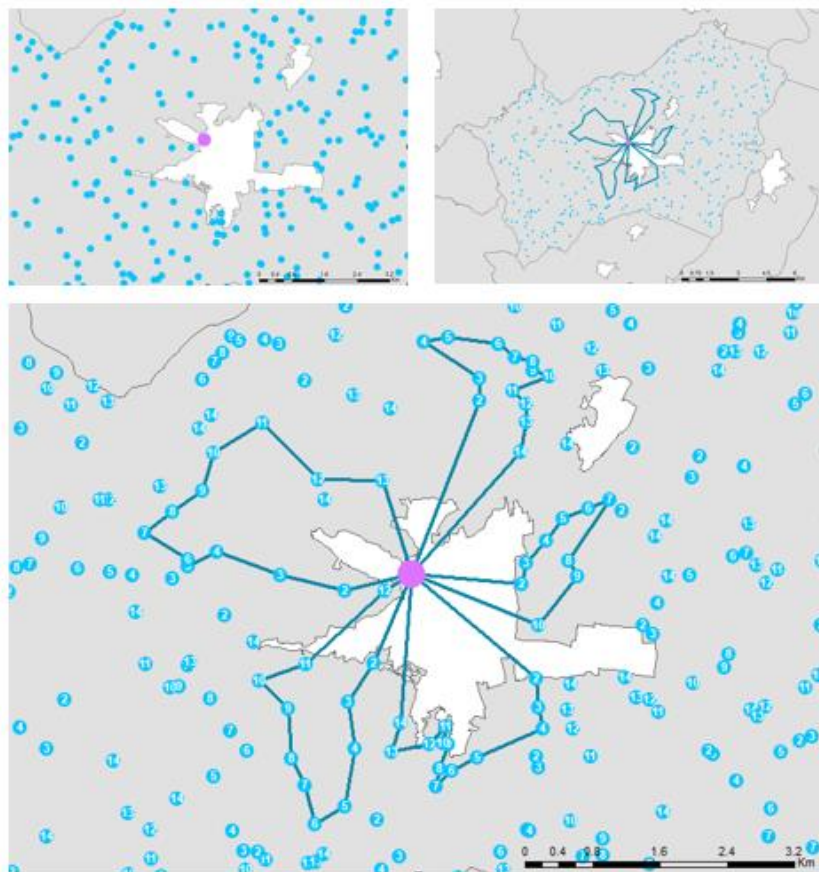


Imagen 71. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante drones.



La modelación presentada constituye el escenario 1, en el cual se transportaron 396 muestras planteando 31 rutas, las cuales fueron recorridas por un dron en un lapso de 31 días. En la operación se invirtieron 236 horas de las cuales 7 horas corresponden al tiempo de viaje. El resultado se extrapolo y se estimó que en el año se pueden transportar 3.394 muestras. Teniendo en cuenta los objetivos planteados, se calculó el número de drones necesarios para transportar 43.364 muestras (escenario 2) y 173.456 muestras (escenario 3) en un periodo anual.

Tabla 21. Resumen de resultados modelación escenario 1.

	<b>Longitud Total (km)</b>	<b>Número de horas</b>	<b>Numero horas viaje</b>	<b>Número de rutas</b>	<b>Número de días x vehículo</b>	<b>numero de muestras</b>
<b>Ruteo La Unión Drones</b>	416	236	7	31	31	396

Para transportar 43.364 muestras de sangre en un año se estimó a partir de los resultados del escenario 1 que se requieren 13 drones los cuales serán operados por dos personas. Asimismo, para transportar 173.456 muestras de sangre en un año se requieren de 52 drones operados por 6 personas.

Tabla 22. Resumen de resultados modelación escenarios 1,2 y 3.

	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>
<b>Equipos de cómputo y comunicaciones</b>	1	2	6
<b>Drones</b>	1	13	52
<b>Motos</b>	0	0	0
<b>días</b>	31	-	-
<b>meses</b>	1	12	12
<b>numero de muestras</b>	396	43.364	173.456
<b>numero de muestras/año</b>	3.394	43.364	173.456

A continuación, en la Imagen 72 y en la Imagen 73 se presentan los resultados gráficos de la modelación de la segunda instancia para el municipio de la unión en donde se utilizó una motocicleta como vehículo para transportar las muestras de sangre.

Imagen 72. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.

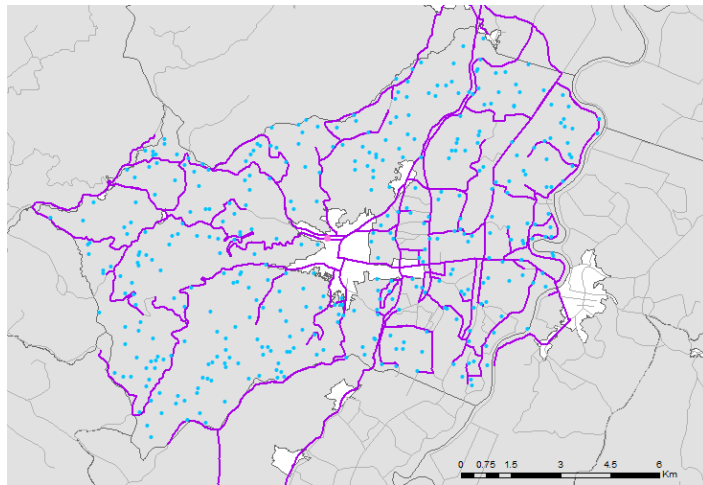
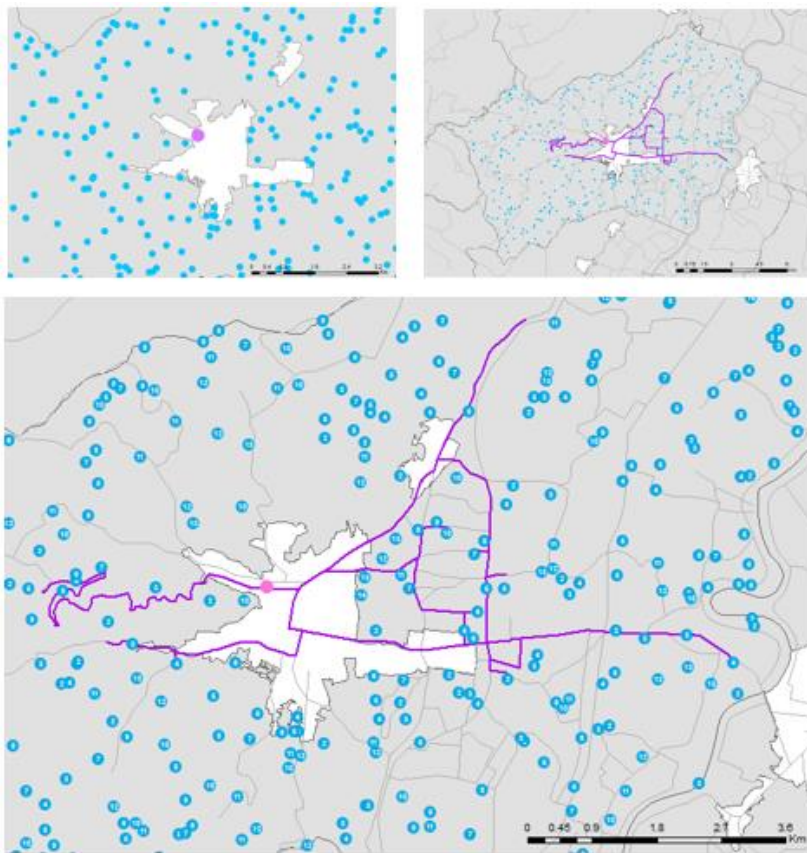


Imagen 73. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.



La modelación presentada constituye el escenario 4, en el cual se transportaron 396 muestras planteando 40 rutas, las cuales fueron recorridas por una motocicleta en un lapso de 40 días. En la operación se invirtieron 295 horas de las cuales 57 horas corresponden al tiempo de viaje. El resultado se extrapolo y se estimó que en el año se pueden transportar 2.640 muestras. Teniendo en cuenta los objetivos planteados, se calculó el número de motocicletas necesarios para transportar 43.364 muestras (escenario 5) y 173.456 muestras (escenario 6) en un periodo anual.

Tabla 23. Resumen de resultados modelación escenario 4.

	<b>Longitud Total (km)</b>	<b>Número de horas</b>	<b>Numero horas viaje</b>	<b>Número de rutas</b>	<b>Número de días x vehículo</b>	<b>numero de muestras</b>
<b>Ruteo La Unión - motocicletas</b>	900	295	57	40	40	396

Para transportar 43.364 muestras de sangre en un año se estimó a partir de los resultados del escenario 4 que se requieren 17 motocicletas. Asimismo, para transportar 173.456 muestras de sangre en un año se requieren de 66 motocicletas.

Tabla 24. Resumen de resultados modelación escenarios 4,5 y 6.

	<b>Escenario 4</b>	<b>Escenario 5</b>	<b>Escenario 6</b>
<b>Equipos de cómputo y comunicaciones</b>	0	0	0
<b>Drones</b>	0	0	0
<b>Motos</b>	1	17	66
<b>Días</b>	40	-	-
<b>meses</b>	2	12	12
<b>numero de muestras</b>	396	43.364	173.456
<b>numero de muestras/año</b>	2.640	43.364	173.456

#### 6.4.2.10.2 Escenarios modelados en el municipio de Roldanillo.

Una primera modelación consistió en calcular la distancia total acumulada recorrida desde cada uno de los puntos de demanda hasta la instalación de servicio, realizando viajes sencillos y directos. A continuación, en la Imagen 74 y en la Tabla 25 se presentan los resultados del análisis. Se evaluaron dos modelos variando en tipo de vehículo que transporta la muestra (dron o motocicleta).

Imagen 74. Resultado de la modelación de la segunda instancia – distancia total acumulada.

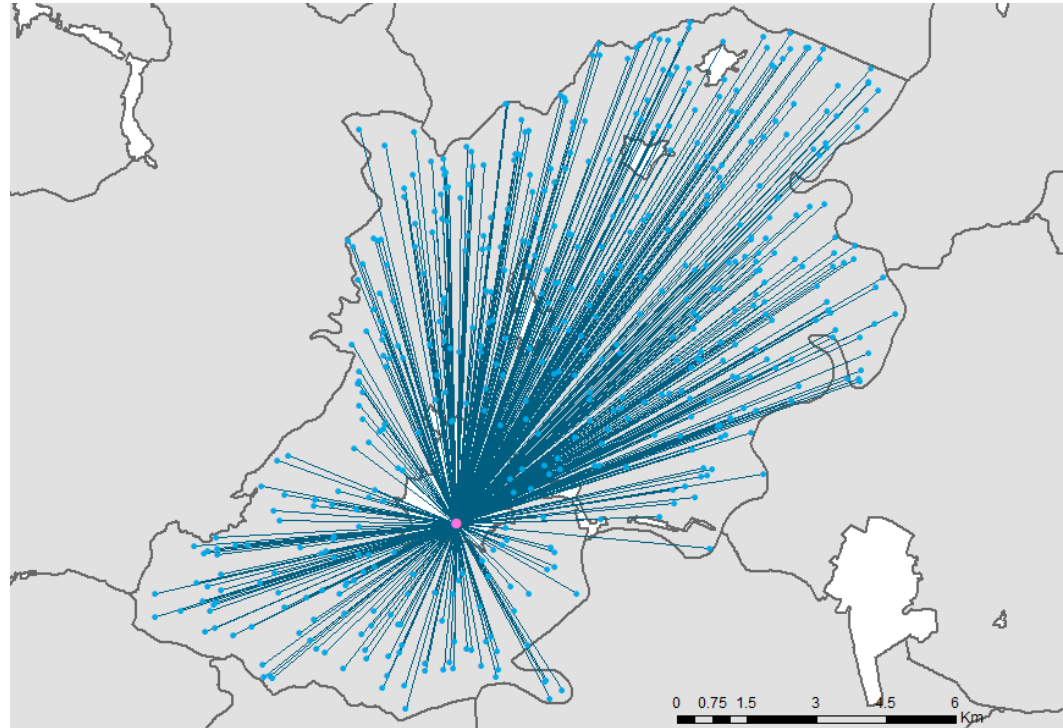


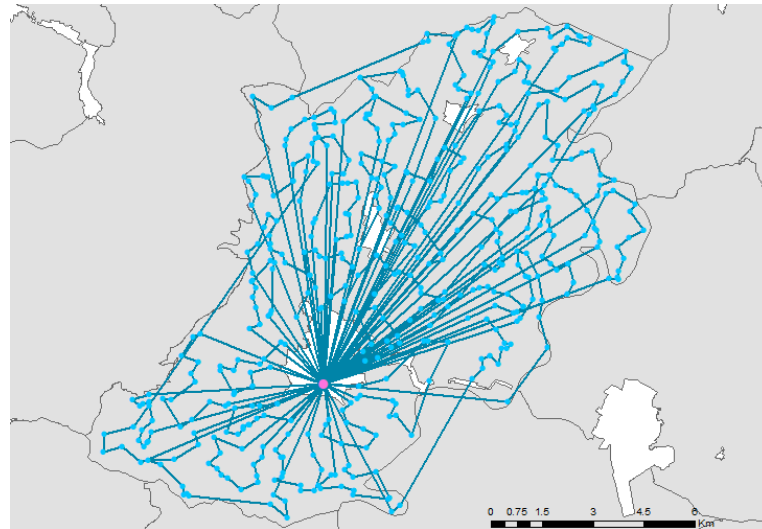
Tabla 25. Resumen de resultados modelación de viajes directos en el municipio de la unión transportando las muestras en drones.

<b>Vehículo</b>	<b>Longitud total recorrida (km)</b>
<b>Dron</b>	3110
<b>Motocicleta</b>	4169

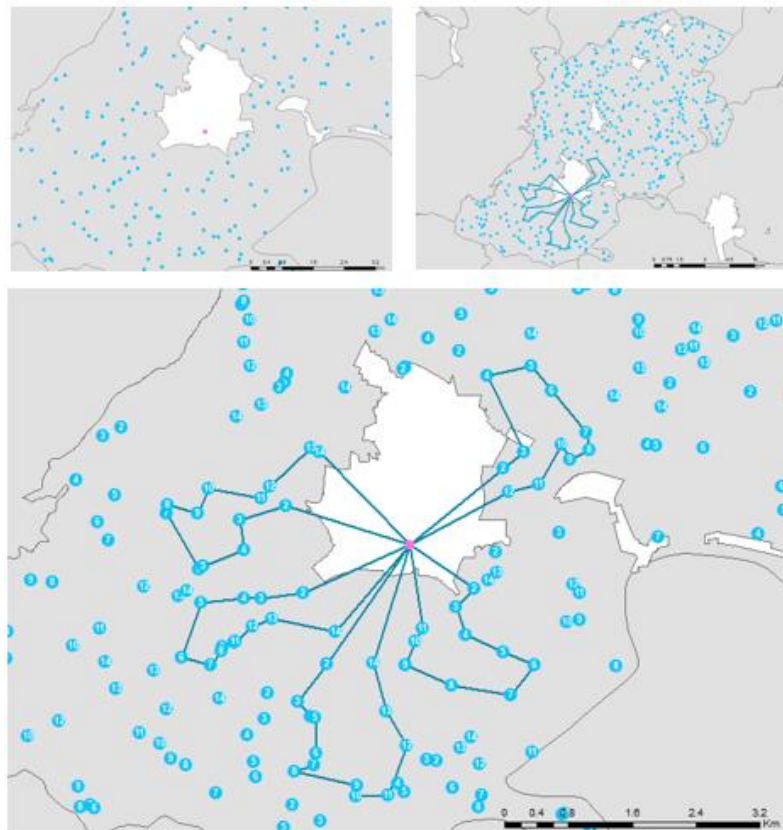


A continuación, en la Imagen 75 y en la Imagen 76 se presentan los resultados gráficos de la modelación de la segunda instancia para el municipio de Roldanillo en donde se utilizó un dron como vehículo para transportar las muestras de sangre.

*Imagen 75. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante drones.*



*Imagen 76. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante drones.*





La modelación presentada constituye el escenario 7, en el cual se transportaron 502 muestras planteando 39 rutas, las cuales son recorridas por un dron en un lapso de 39 días. En la operación se invirtieron 301 horas de las cuales 11 horas corresponden al tiempo de viaje. El resultado se extrapolo y se estimó que en el año se pueden transportar 3.347 muestras. Teniendo en cuenta los objetivos planteados, se calculó el número de drones necesarios para transportar 43.364 muestras (escenario 8) y 173.456 muestras (escenario 9) en un periodo anual.

*Tabla 26. Resumen de resultados modelación escenario 7.*

	<b>Longitud Total (km)</b>	<b>Número de horas</b>	<b>Numero horas viaje</b>	<b>Número de rutas</b>	<b>Número de días x vehículo</b>	<b>numero de muestras</b>
<b>Ruteo Roldanillo - drones</b>	643	301	11	39	39	502

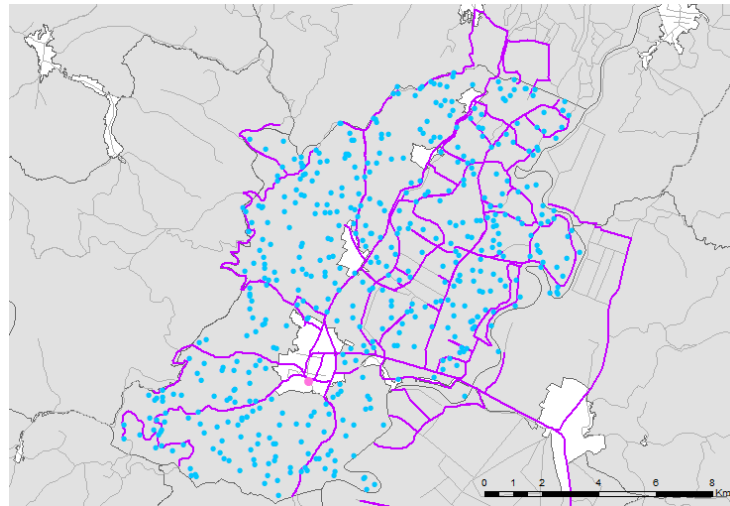
Para transportar 43.364 muestras de sangre en un año se estimó a partir de los resultados del escenario 7 que se requieren 13 drones los cuales serán operados por dos personas. Asimismo, para transportar 173.456 muestras de sangre en un año se requieren de 52 drones operados por 6 personas.

*Tabla 27. Resumen de resultados modelación escenarios 7,8 y 9.*

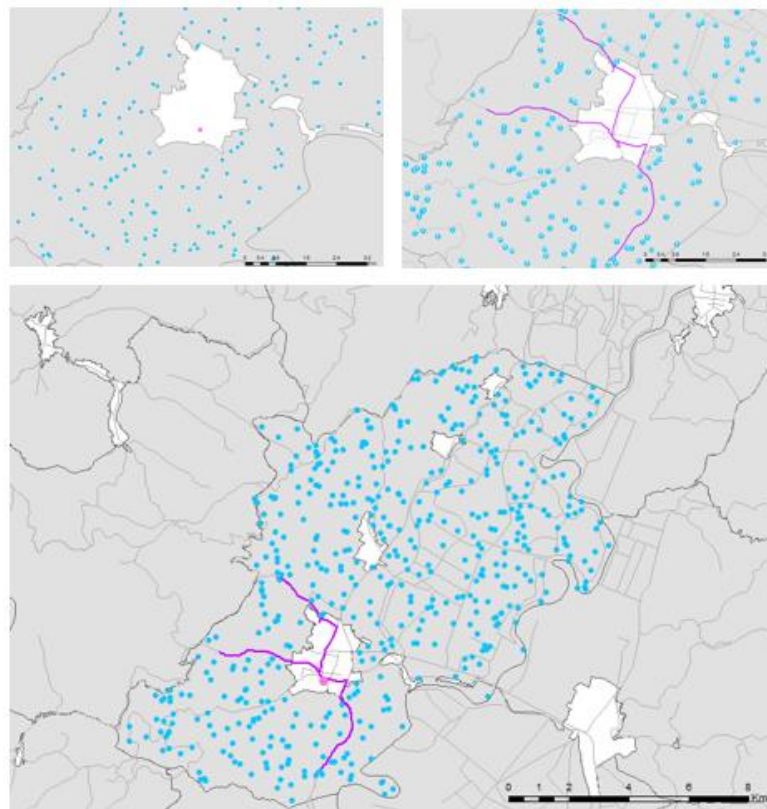
	<b>Escenario 7</b>	<b>Escenario 8</b>	<b>Escenario 9</b>
<b>Equipos de cómputo y comunicaciones</b>	1	2	6
<b>Drones</b>	1	13	52
<b>Motos</b>	0	0	0
<b>Días</b>	39	-	-
<b>meses</b>	2	12	12
<b>numero de muestras</b>	502	43.364	173.456
<b>numero de muestras/año</b>	3.347	43.364	173.456

A continuación, en la Imagen 77 y en la Imagen 78 se presentan los resultados gráficos de la modelación de la segunda instancia para el municipio de la unión en donde se utilizó una motocicleta como vehículo para transportar las muestras de sangre.

*Imagen 77. Resultado de la modelación de la segunda instancia transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.*



*Imagen 78. Detalle del resultado de las rutas 1 a 5 transportando las muestras de sangre mediante motocicletas.*



La modelación presentada constituye el escenario 10, en el cual se transportaron 502 muestras planteando 47 rutas, las cuales son recorridas por una motocicleta en un lapso de 47 días. En la operación se invirtieron 353 horas de las cuales 56 horas corresponden al tiempo de viaje. El resultado se extrapolo y se estimó que en el año se pueden transportar 2.869 muestras. Teniendo en cuenta los objetivos planteados, se calculó el número de drones necesarios para transportar 43.364 muestras (escenario 11) y 173.456 muestras (escenario 12) en un periodo anual.

*Tabla 28. Resumen de resultados modelación escenario 10.*

	<b>Longitud Total (km)</b>	<b>Número de horas</b>	<b>Numero horas viaje</b>	<b>Número de rutas</b>	<b>Número de días x vehículo</b>	<b>numero de muestras</b>
<b>Ruteo Roldanillo - motocicletas</b>	1189	353	56	47	47	502

Para transportar 43.364 muestras de sangre en un año se estimó a partir de los resultados del escenario 10 que se requieren 16 motocicletas. Asimismo, para transportar 173.456 muestras de sangre en un año se requieren de 61 motocicletas.

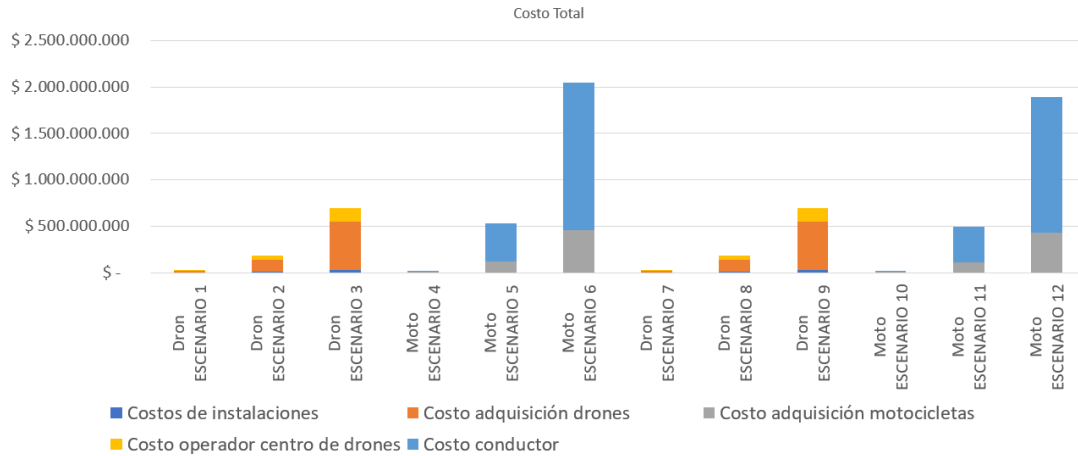
*Tabla 29. Resumen de resultados modelación escenarios 10,11 y 12.*

	<b>Escenario 10</b>	<b>Escenario 11</b>	<b>Escenario 12</b>
<b>Equipos de cómputo y comunicaciones</b>	0	0	0
<b>Drones</b>	0	0	0
<b>Motos</b>	1	16	61
<b>Días</b>	47	-	-
<b>meses</b>	2	12	12
<b>numero de muestras</b>	502	43.364	173.456
<b>numero de muestras/año</b>	2.869	43.364	173.456

### 6.4.2.11 Evaluación Económica

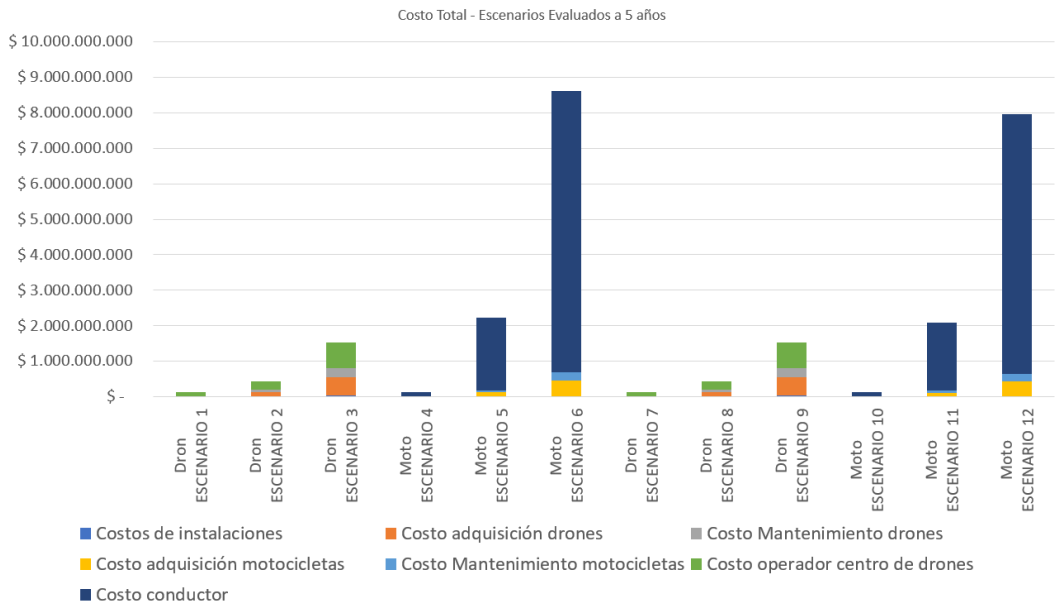
Para cada uno de los escenarios evaluados se calculó el valor total de una campaña de recolección de muestras de sangre, discriminando el costo de: las instalaciones, los drones necesarios para recolectar las muestras, los vehículos necesarios y los operadores. A Continuación, en la Imagen 79 se presentan los resultados de los cálculos realizados.

Imagen 79. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de sangre, en el departamento de Valle del Cauca.



por otra parte, se evaluaron los escenarios en un periodo de 5 años. A continuación, en la Imagen 80 se presentan los resultados de los cálculos realizados.

Imagen 80. Resultado del costo Total de la recolección de muestras de sangre en un periodo de 5 años, en el departamento de Valle del Cauca.



## 6.5 Análisis de resultados

### 6.5.1 Modelo etapa 1, evaluado en el departamento de Guainía

En el departamento de Guainía a partir del modelo se planteó la posibilidad de aumentar la accesibilidad para la toma y análisis de muestras de sangre requeridas para detectar malaria, con una cobertura de la totalidad del departamento. En consecuencia y ante el déficit de infraestructura vial en el departamento el modelo resulta como una solución para resolver algunos temas de accesibilidad presentes en la región.

En relación al tiempo de desplazamiento estos se reducen a cero teniendo en cuenta que se propuso un servicio domiciliario, por otra parte, el tiempo para el análisis de una muestra dependerá de la localización dentro de la red, con la posibilidad de reducir este tiempo únicamente al tiempo de desplazamiento de requerirse un análisis prioritario, aunque los costos de transporte pueden incrementar al no estar asociado al modelo logístico planteado.

Para la implementación del modelo y una detección o monitoreo de la malaria es importante involucrar el componente epidemiológico el cual encamine la toma de muestras que caractericen adecuadamente a la población objetivo. En este estudio se desarrolló una metodología para modelar una aleatoriedad y presentando la una forma de calcular el tamaño de una muestra para que esta sea representativa.

Los diferentes escenarios evaluados presentan variabilidad en el tiempo de recolección, por lo que estos se pueden adaptar a un ciclo o pico de una enfermedad, en función de las instalaciones intermedias que se pueden construir, el tipo y número de drones.

Dentro del análisis de la primera instancia se evidenció que las instalaciones intermedias varían dependiendo del rango del vehículo, por lo que también se puede inferir que cualquier cambio en la distribución de la población, generará una localización de instalaciones intermedias diferentes; este factor puede ser determinante al evaluar de forma macroproyectos de esta índole, en donde se puedan incluir variables del problema actual, pero también usos potenciales. Sin embargo, teniendo en cuenta que la demanda de servicios de salud está ligado proporcionalmente a la población una buena aproximación de localización de instalaciones intermedia se puede acercar a las planteadas.

En cuanto a la variación de drones para cada escenario base se observó una mayor optimización cuando se empezaron a incluir más drones (de 1 a 2) ya que en la medida que se empezaron a incluir más drones se apreció una subutilización de los mismos, dado que el modelo plantea recoger la totalidad de las muestras de cada instalación intermedia hasta pasar a la siguiente.

El desarrollo del modelo de la primera instancia puede racionalizar el problema la selección de la localización de instalaciones como laboratorios el cual disminuya la distancia total recorrida para la recolección total de muestras.

Al ser un problema que se analizó desde un nivel estratégico el centroide del polígono representa un rango en el cual el dron está en la capacidad de recolectar las muestras de sangre, siendo la base para implementar el modelo en la etapa 2: nivel táctico- operativo.

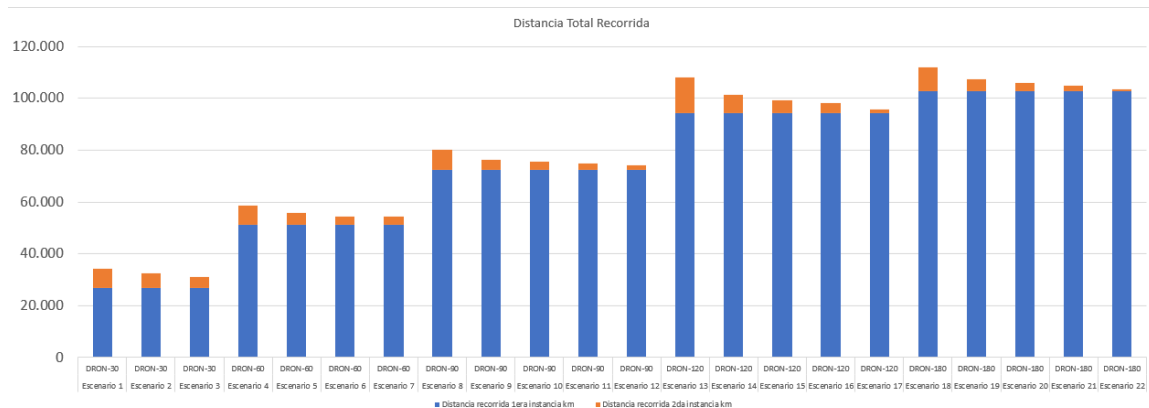
Uno de los factores que se resalta es la capacidad de agrupar muestras en instalaciones intermedias, aprovechando las mayores capacidades y dimensiones de los drones para transportar las muestras a las instalaciones finales, lo cual se reflejó en menores distancias y costos asociados.

Los modelos presentados con drones de menor rango ofrecen un número mayor de operaciones diarias, lo cual puede ofrecer un modelo más flexible en cuanto a los tiempos de planeación y recolección de muestras, teniendo una menor incidencia algún retraso o reprogramación de rutas.

Los escenarios evaluados con drones de menor rango suponen la facilidad de la construcción de instalaciones intermedias, en contraste los escenarios evaluados con drones de mayor rango suponen la dificultad de la construcción de las mismas.

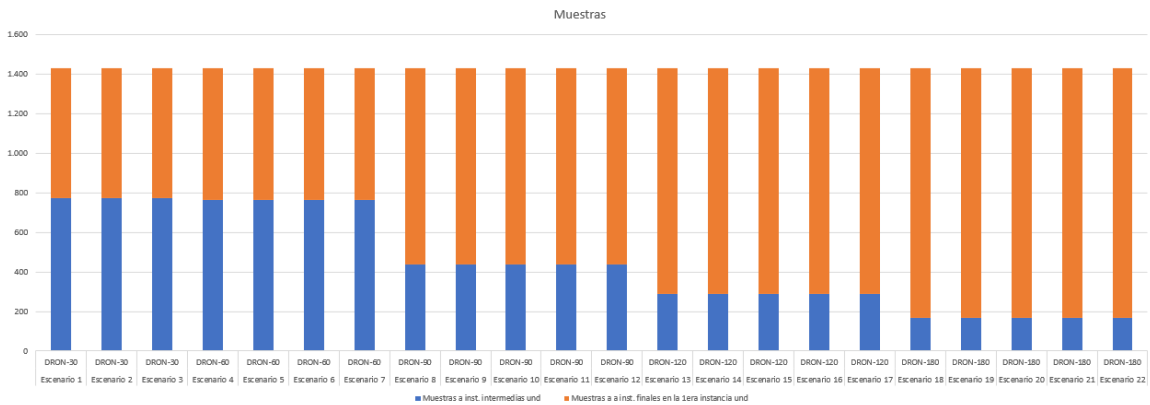
En cuanto a la distancia total recorrida, la mayor proporción de distancia se recorrió en la recolección de muestras a instalaciones intermedias; a su vez los modelos con drones de menor rango recorrieron menos distancia que modelos evaluados con drones de mayor rango. Asimismo, el aumento del número de drones represento una disminución en la distancia total recorrida debido a la agrupación de muestras.

*Imagen 81. Resultado de la distancia total recorrida para cada escenario*



En la primera instancia para el escenario 1 se recolectaron el 46% de las muestras las cuales llegaron directamente a las instalaciones finales, mientras que para el escenario 22 se recolectaron 88% de las muestras que llegaron a las instalaciones finales. Este porcentaje se traduce en un diagnóstico más rápido, pero a un mayor costo dado que estas fueron trasladadas individualmente a diferencia de las transportadas en la segunda instancia las cuales fueron transportadas en viajes agrupados.

Imagen 82. Resultado de la recolección de muestras para cada escenario.



En los escenarios normalizados y proyectados a 5 años se observa que la distancia total recorrida aumento proporcionalmente con el rango de los drones y con el tamaño de la flota. El aumento del tamaño de la flota incremento la capacidad de recolección de los modelos y particularmente el escenario 12 el cual plantea 3 instalaciones finales, 4 instalaciones intermedias y un tamaño de flota de 6 drones fue el escenario con mejores resultados al recolectar 17.124 muestras en 5 años.

Imagen 83. Resultado de la distancia total recorrida para cada escenario en un periodo de 5 años

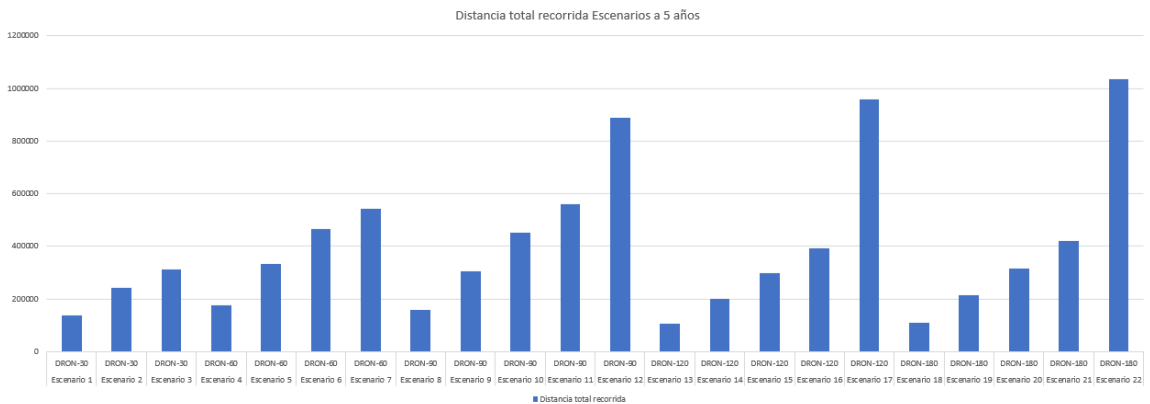
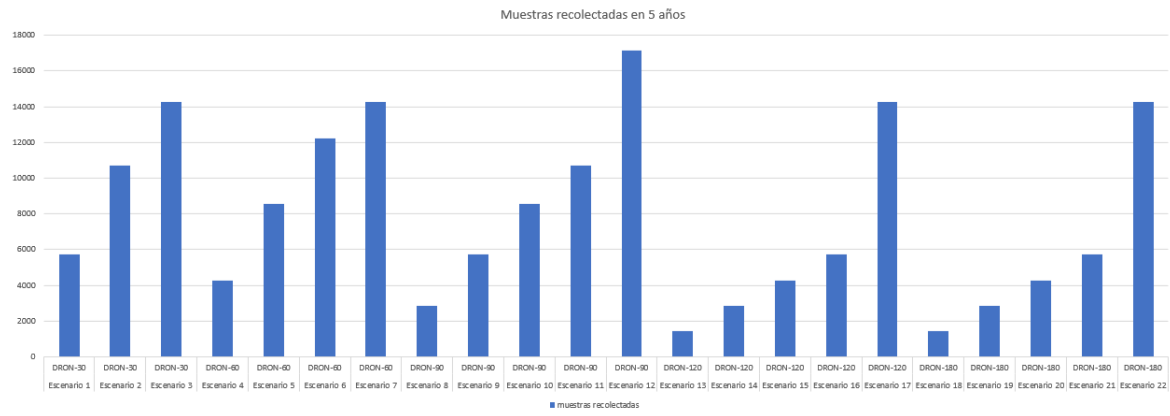


Imagen 84. Resultado del total de muestras recolectadas en un periodo de 5 años



### 6.5.2 Modelo etapa 2, evaluado en el departamento de Valle del Cauca

El modelo en la etapa 2 permitió evaluar la implementación de un modelo de recolección de muestras de sangre validando la cobertura utilizando drones y comparando su eficiencia con modos motorizados tradicionales. En primer lugar, se observó independientemente del vehículo utilizado, una disminución de la distancia total recorrida al implementar un modelo de asignación-localización y posteriormente un ruteo de vehículos, resaltando la importancia y ventajas de la implementación del modelo logístico planteado.

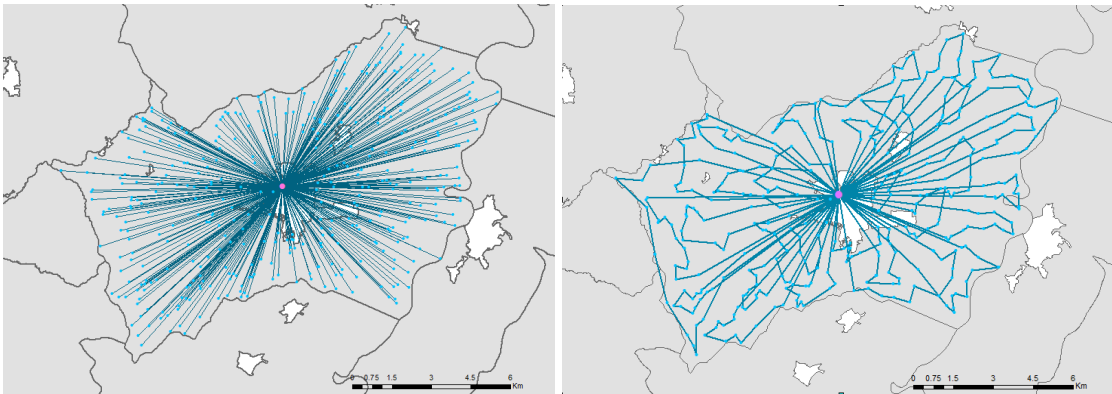
Respecto a las distancias totales recorridas, a partir de los viajes individuales se observó un aumento entre el 34% y 44% para los viajes realizados con motocicletas, esto como resultado de la capacidad de los drones de realizar viajes en tramos rectos y no estar restringidos por una red física, como las vías.

Analizando la distancia total recorrida, comparado con los viajes realizados por los pacientes se obtuvo una reducción de la distancia entre un 67% y 71% teniendo como vehículo de transporte motocicletas y una reducción de la distancia entre el 78% y 79% para los escenarios evaluados con drones.

En cuanto a los tiempos de viaje el número de horas de los escenarios analizados con drones demandaron entre un 15% y 20% menos horas; por otra parte se observó para los ruteos analizados que el mayor porcentaje de tiempo empleado, entre un 96% a 97% para los escenarios evaluados con drones y entre un 81% a 83% para los escenarios evaluados con motocicletas, corresponde al tiempo de servicio entre cada una de las paradas, por lo que una disminución en los tiempos de recogida, recarga y despacho de la muestra puede mejorar drásticamente los resultados de las modelaciones mejorando el desempeño de los mismos.

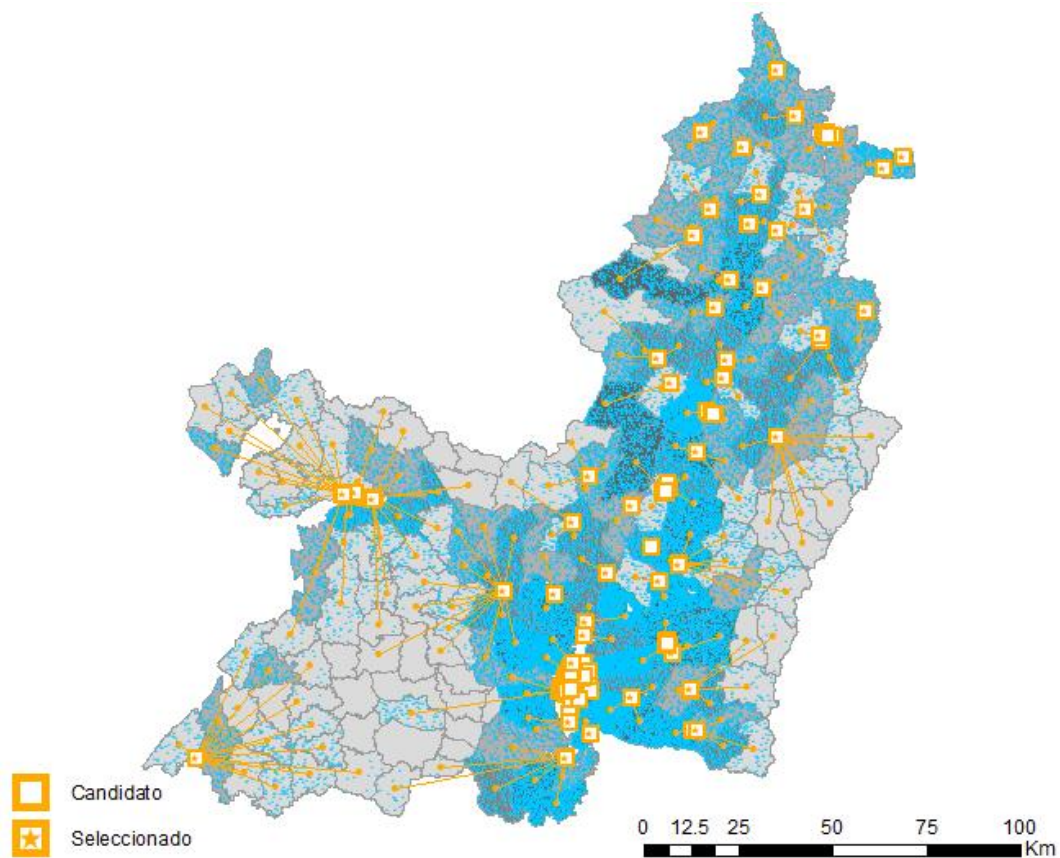


Imagen 85. Optimización de los desplazamientos y tiempos de viaje al emplear el modelo logístico.



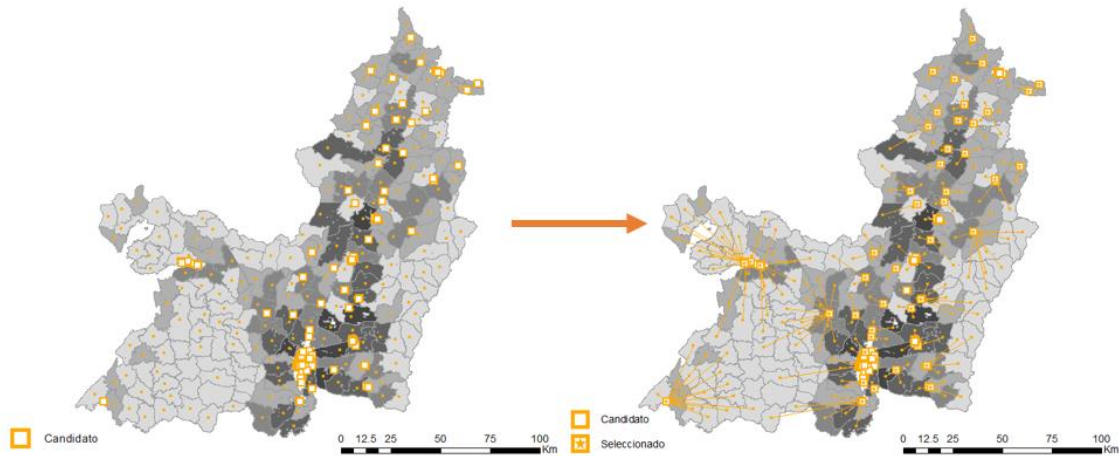
Respecto a la accesibilidad, el modelo propuesto con drones puede estar en la capacidad de dar una cobertura total al departamento del valle del Cauca, a diferencia del modelo propuesto con motocicletas al estar limitado a una infraestructura vial. De igual forma los tiempos de desplazamiento se reducen a cero al prestarse un servicio domiciliario; el tiempo de análisis de las muestras se puede realizar el mismo día al llegar directamente a instalaciones finales o laboratorios clínicos.

Imagen 86. Cobertura del servicio en el departamento de Valle del Cauca.



La resolución de problemas con una cantidad de ordenes como la analizada (173.456 muestras) puede presentar problemas de ejecución al intentar procesar las muestras particularmente, esto debido al tamaño de la red y crecimiento exponencial de las soluciones posibles, por lo tanto, un primer paso que se resalta de la metodología propuesta es la categorización y agrupación de la demanda para el posterior desarrollo en dos fases del problema propuesto.

*Imagen 87. Agrupación de la demanda y resolución de la etapa 2-instancia 1.*



La definición y determinación de límites físicos, que para el caso evaluado fue el límite departamental o los sectores rurales, tienen como resultado barreras dentro de la agrupación del problema, lo que conlleva a condiciones especiales o particulares para los elementos que se encuentren cerca de la frontera ya que se puede presentar el caso de que puedan tener una instalación física más cercana pero la cual fue restringida por los límites enunciados.

Los modelos efectuados, especialmente el evaluado en la primera instancia plantea la posibilidad de discretizar el espacio lo que conlleva al diseño de una red, con una arquitectura optimizada y con menor número de nodos, lo que resulta en un análisis, control y operación del espacio más efectivo, pero con rutas menos eficientes al imposibilitar los viajes en un trayecto recto.

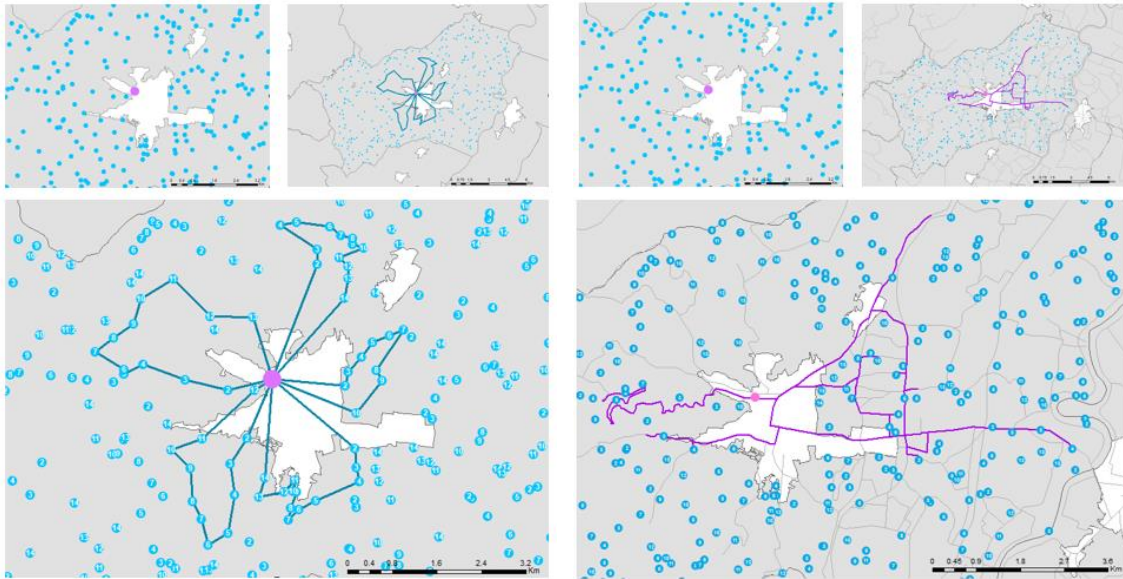
El problema planteado en la primera instancia se caracteriza por ser un problema de asignación-localización, teniendo en cuenta como objetivo minimizar la longitud y adicionalmente aprovechar al máximo la capacidad instalada, es decir los laboratorios clínicos existentes.

Para la segunda instancia el modelo presentó una solución para la recolección de muestras en donde se resalta la planeación intrínseca en la resolución de problemas VRP para la resolución de problemas de ruteo, en el que se identificó una mayor rigidez del problema solucionado con motocicletas debido a la dependencia directa de la red vial a diferencia de una mayor flexibilidad

y una resolución que se acerca a la óptima al tener y aplicar las características asociadas a la programación y diseño de rutas de vehículos.

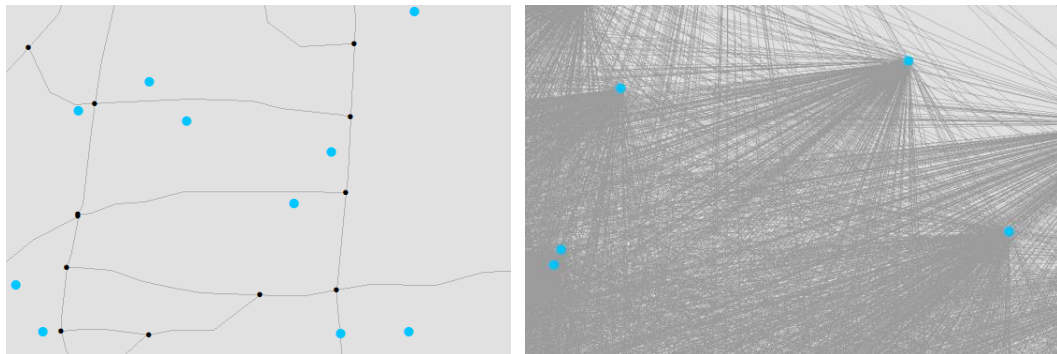
Aunque el problema de VRP fue resuelto por métodos heurísticos, se observó que la resolución de los mismos se alineó con los principios de una buena programación y diseño de rutas planteado por (Ballou, 2004) y en mayor medida los escenarios evaluados con drones.

*Imagen 88. Resultados del VRP para drones y motocicletas.*



Respecto a la arquitectura de las redes, la vial puede presentar un mejor procesamiento al estar más discretizada a diferencia de las plateadas con los drones ya que se generaron arcos para cada uno de los nodos. Sin embargo, se apreció que la red vial no tiene la posibilidad de llegar hasta el destino, lo cual se vio reflejado en que fue necesario localizar puntos fuera de la red al punto más cercano con una distancia de hasta 1.5 km.

*Imagen 89. Comparación de la red vial y la de drones*



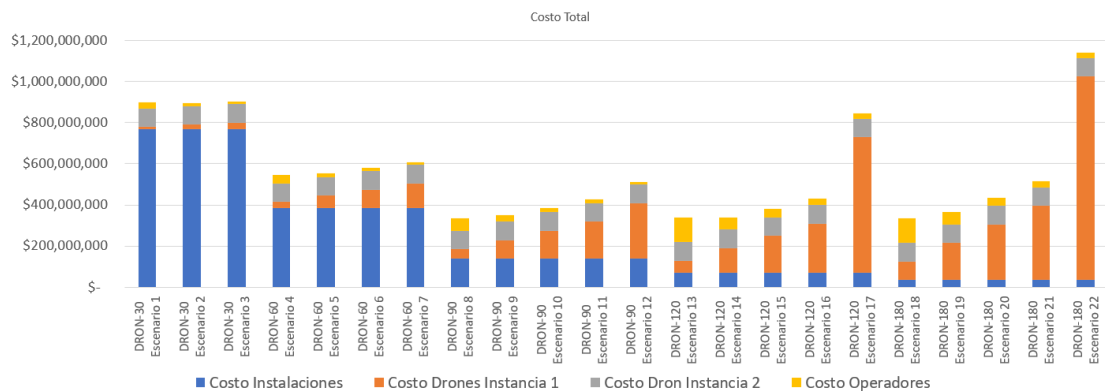
A partir de los escenarios analizados se observó que para demandas bajas puede ser más efectivo los programas de recolección de muestras mediante motocicletas, resaltando una mayor ventaja y desempeño de los modelos evaluados con drones proporcional al aumento de la demanda.

### 6.5.3 Análisis de Resultados Económicos

#### 6.5.3.1 Modelo etapa 1, evaluado en el departamento de Guainía

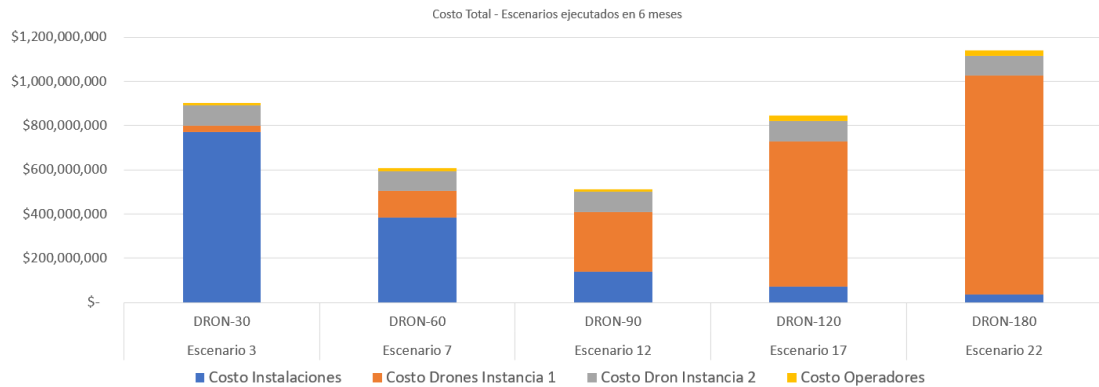
A partir de los costos de referencia se estimó que el valor de recolectar la 1.427 muestras, equivalentes al número de muestras representativas para monitorear la malaria, varía entre \$335.000.000 y \$1.139.000.000; los escenarios que presentaron un mayor costo fueron aquellos que utilizaron los drones de menor rango de operación o los que utilizaron los drones de mayor rango de operación. Los escenarios con menor costo fueron aquellos que utilizaron drones de un alcance intermedio (Dron-90). La mayor proporción en los costos en los escenarios con drones de menor rango de operación se relacionaron con el costo de las instalaciones, mientras la mayor proporción de los costos en los escenarios con drones de mayor rango se relacionaron con el costo de adquisición de los vehículos.

Imagen 90. Costo total de los escenarios analizados.



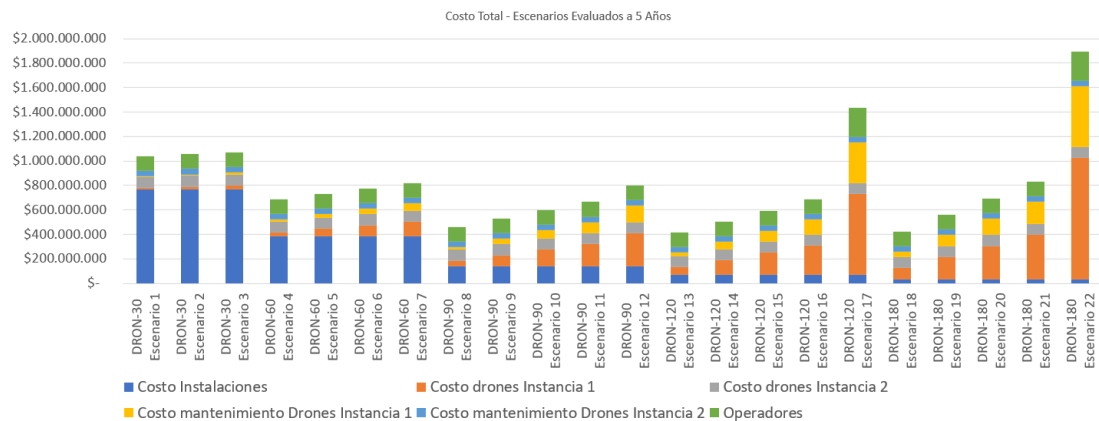
Teniendo en cuenta que la totalidad de muestras se recolectaron en diferentes periodos, se compararon los escenarios en los cuales se determinó un periodo de 6 meses como el periodo de recolección. Como resultado el escenario evaluado con el Dron-90 es el que presenta un menor costo con un valor de 510.000.000.

Imagen 91. Costo total de los escenarios evaluados en un periodo de recolección de 6 meses.



Una vez evaluados los escenarios en un periodo de 5 años, se continúa observando una misma tendencia en los costos relacionados con el rango de los drones utilizados en la operación, con costos que variaron entre los \$530.000.000 y \$1.895.000.000. Comparando los escenarios evaluados inicialmente (1 campaña) a los evaluados a 5 años los escenarios con drones de menor rango presentan una menor variación en el costo total de las operaciones (desde 16%) mientras que los escenarios evaluados con drones de mayor rango son aquellos que presentaron una mayor variación (hasta un 66%). Este comportamiento se debe a que en los primeros escenarios los mayores costos se relacionaban con las instalaciones (costos fijos) mientras que en los últimos escenarios la mayor parte de los costos está relacionada con la flota y la operación (costos variables).

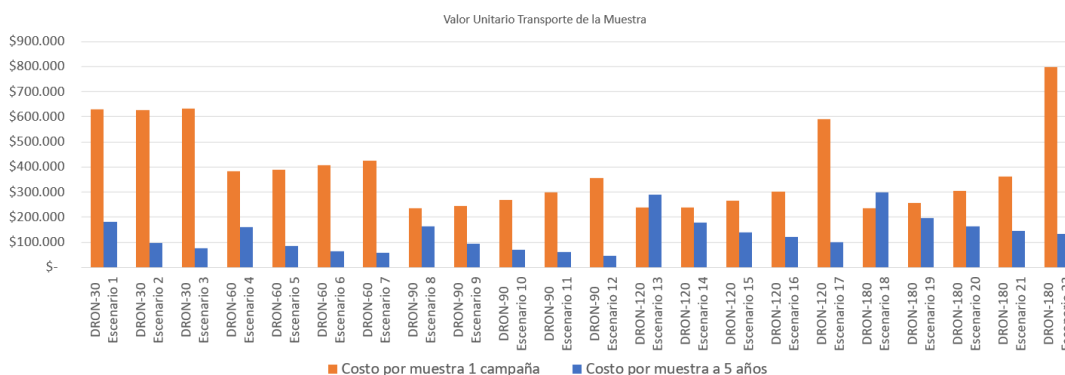
Imagen 92. Costo total de los escenarios evaluados a 5 años.



En relación al costo unitario de las muestras, se aprecia que en un periodo de tiempo de 5 años los costos fijos se distribuyeron entre una mayor cantidad de muestras recolectadas, por lo que el valor unitario fue menor. El menor valor unitario en un periodo a 5 años fue el del escenario 12 con un valor de \$46.718 por muestra.



Imagen 93. Valor unitario de la muestra.

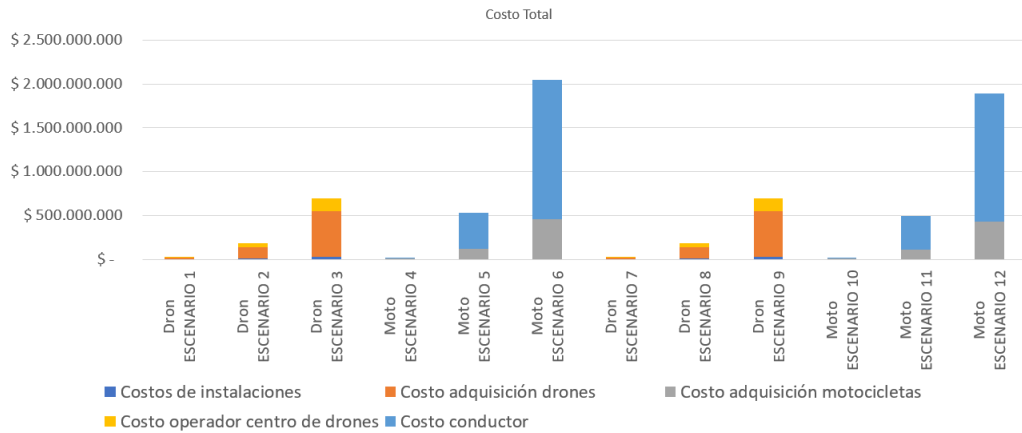


Desde el punto de vista económico y a partir de los valores de referencia tomados, los escenarios con mejor desempeño desde el punto de vista de costos fueron aquellos en donde se utilizó para la primera instancia un dron con un rango de 90 km (Dron-90) encontrando un valor óptimo de instalaciones intermedias, lo cual equilibrio los costos de las instalaciones y el costo de la adquisición de drones. Si bien el escenario con menor costo, evaluado en 1 campaña y a 5 años fue el número 8, el que representa un menor costo unitario fue el escenario número 12, esto debido a que este escenario utiliza el mismo número de instalaciones, pero al tener una mayor flota permitió una agrupación de las muestras, que se representa en un menor tiempo para la recolección de muestras y un menor costo en el transporte en la segunda instancia del modelo.

### 6.5.3.2 Modelo Etapa 2, evaluado en el departamento de Valle de Cauca

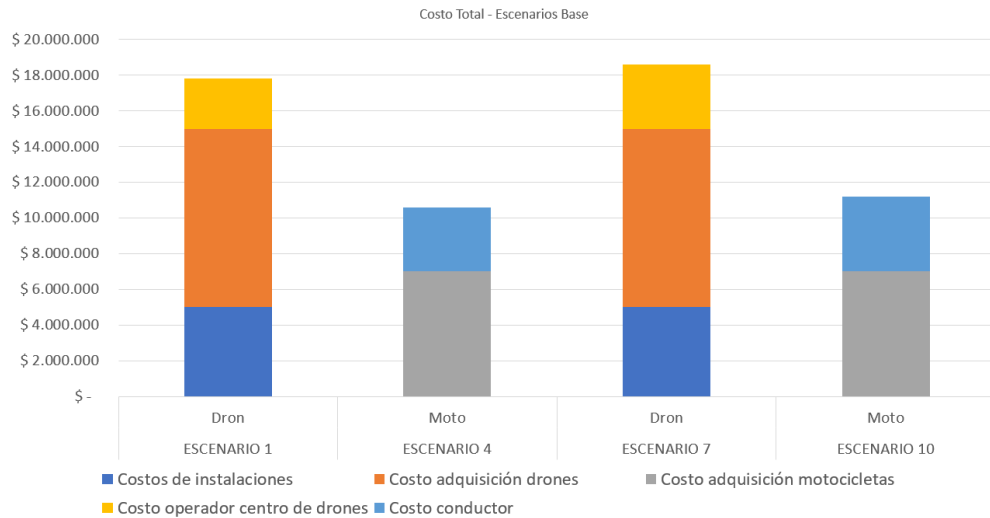
Teniendo en cuenta los costos de referencia se estimó que el costo total para la recolección de muestras de sangre para monitorear la diabetes tipo 2 en el departamento del Valle del Cauca puede variar de \$188.000.000 a \$1.891.000.000. Estos valores no tuvieron en cuenta los costos totales de los escenarios base, ya que estos se evaluaron para dos sectores rurales en específico. En los escenarios evaluados con drones se observó que la mayor proporción de los costos correspondió al relacionado con la adquisición de los drones, mientras que en los escenarios evaluados con motocicletas el mayor valor correspondió a los relacionados con el conductor (excepto en los escenarios base 4 y 10).

Imagen 94. Costo total de los escenarios evaluados en el Valle del Cauca



Comparando el costo total de los escenarios base, se apreció que fueron más costosos los escenarios evaluados con drones comparados con los escenarios de motocicletas, esta diferencia se presentó principalmente por los costos relacionados con la adquisición de los vehículos. Por otra parte, se observó un valor similar entre los escenarios base que se evaluaron con el mismo tipo de vehículo, por lo que en principio los escenarios que se extrapolaron de estos pueden presentar un panorama general de la recolección de muestras para todo el departamento, sin embargo, un mejor acercamiento se puede obtener modelando la operación logística para la totalidad del departamento.

Imagen 95. Costo total de los escenarios base evaluados en el Valle del Cauca



En los escenarios evaluados con el objetivo de recolectar la 43.364 muestras ( 1 muestra por paciente anual) y 173.456 muestras ( 4 muestras por paciente anual) se observa que los

escenarios con un menor costo fueron los ejecutados drones con un valor de \$188.000.000 para la recolección de 43.364 muestras anuales y de \$694.000.000 para la recolección de 173.456 muestras anuales; en contraste los escenarios de recolección con motocicletas tuvo un costo entre \$496.000.000 y \$1.891.000.000 lo que representa un aumento entre el 164% y 172% entre los modelos evaluados. Se observó que la principal diferencia en los costos se relacionó con los operadores de los vehículos, resaltando la capacidad de los modelos con drones en los cuales un solo operador puede operar varios vehículos al tiempo.

Imagen 96. Costo total de los escenarios planteando la recolección de una muestra anual por paciente.

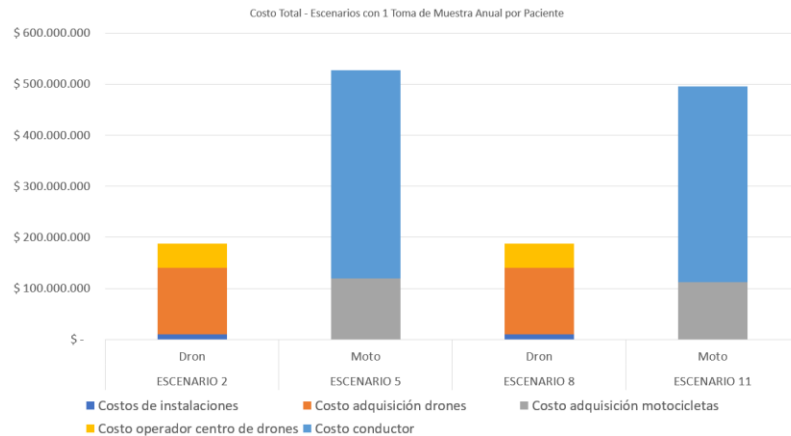
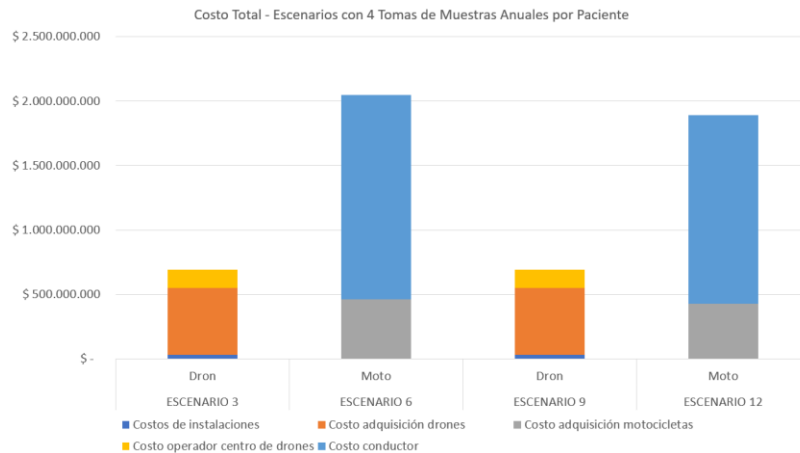


Imagen 97. Costo total de los escenarios planteando la recolección de cuatro muestras anuales por paciente.

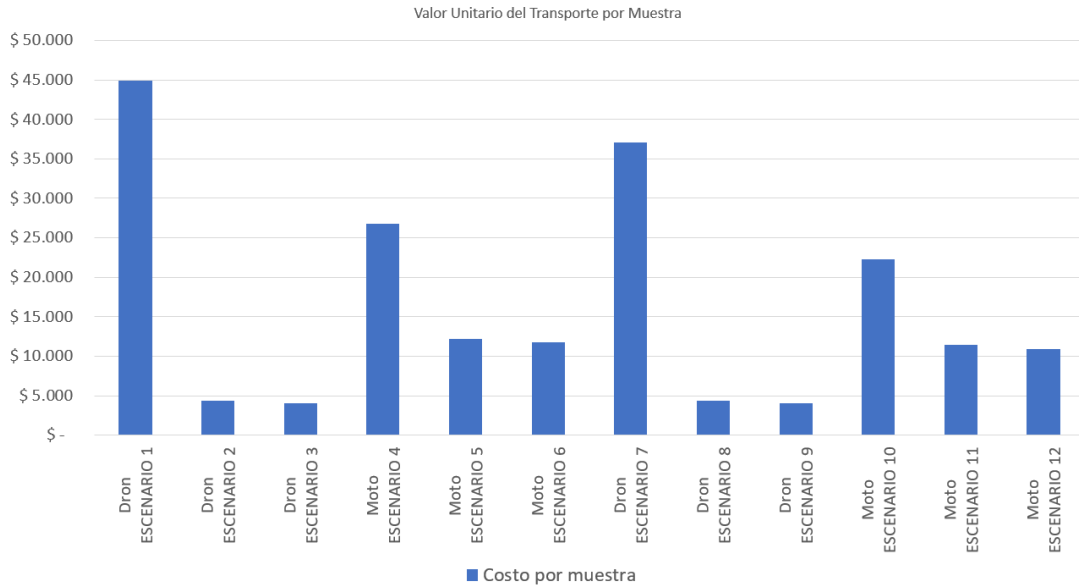


En relación al costo unitario por muestra, los escenarios que presentan un mayor valor fueron aquellos con el menor número de muestras, disminuyendo su costo unitario al aumentar el número de ejemplares recogidos y en mayor proporción para los escenarios evaluados con drones. El menor valor unitario se encontró en los escenarios en donde se recolectaron 173.456



con un valor de \$4.001 para el escenario evaluado con drones y de \$10.902 para el mejor escenario evaluado con motocicletas, presentando una diferencia del 172%

Imagen 98. Valor unitario del transporte de una muestra en el departamento del Valle del Cauca



En los escenarios evaluados a 5 años se observó que siguen la misma tendencia de los escenarios evaluados a 1 año, presentando una mayor diferencia en los costos totales de los escenarios evaluados con drones y motocicletas, con un costo total que varió entre los 445.000.000 a \$1.530.000.000 entre los escenarios con drones y entre \$2.088.000.000 a 7.960.500.000 para los escenarios con motocicletas, presentando una diferencia entre el 369% y 420%. Comparando los escenarios anuales y los evaluados a 5 años se presentó un incremento hasta del 137% para los escenarios evaluados con drones y del 321% para los escenarios evaluados con motocicletas.

Lo anterior representa un mejor desempeño de los escenarios evaluados a 5 años tanto para motocicletas como para drones, presentando un mayor impacto en los escenarios de los drones en los que se recolectaron 5 veces más muestras con un aumento del solo del 137% de los costos, los cuales se dividen en proporciones similares entre el costo de adquisición de los drones y el costo de operación en los 5 años.

Imagen 99. Costo total de los escenarios evaluados a 5 años en el Valle del Cauca.

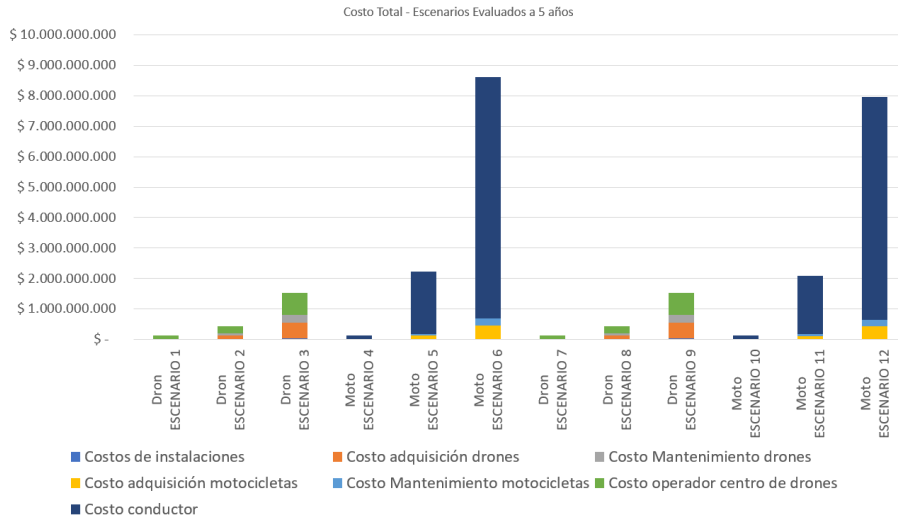


Imagen 100. Costo total de los escenarios planteando la recolección de una muestra anual por paciente.

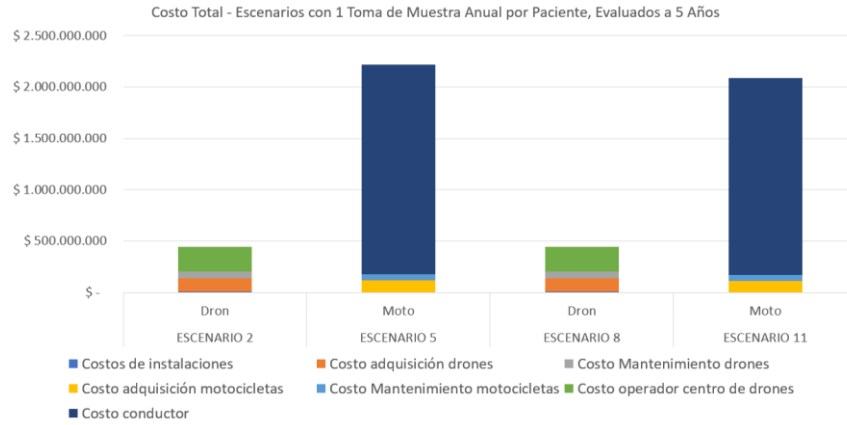
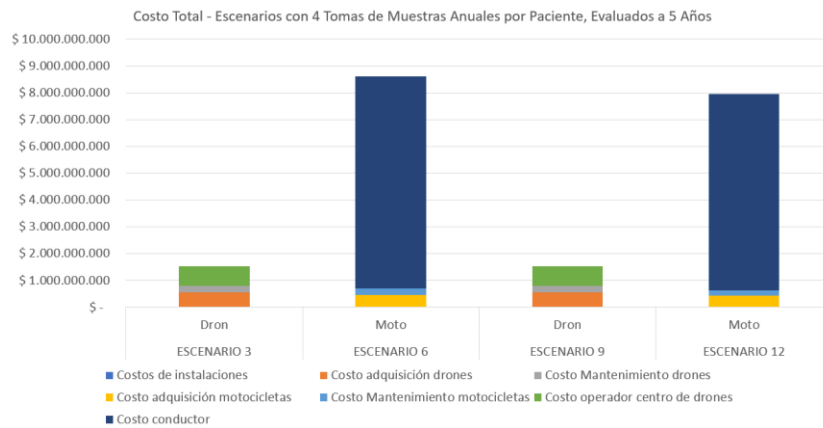
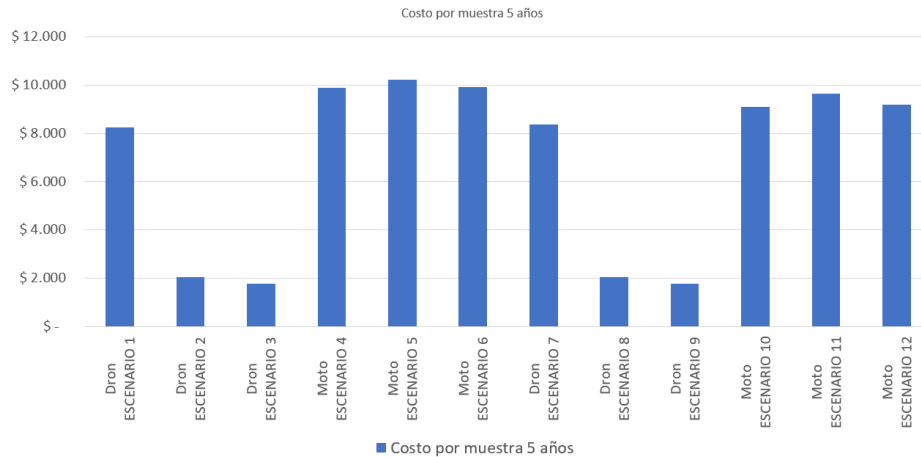


Imagen 101. Costo total de los escenarios planteando la recolección de cuatro muestras anuales por paciente.



Respecto al costo unitario por muestra en los escenarios evaluados a 5 años, se presentan una reducción en el costo unitario por muestra, tanto en los escenarios evaluados con drones como en los escenarios evaluados con motocicletas; para el caso de los drones se estimó un costo unitario de \$1.764 mientras que para las motocicletas de \$9.179 presentando una diferencia del 420%.

*Imagen 102. Valor unitario del transporte de una muestra en el departamento del Valle del Cauca, evaluado a 5 años*



#### 6.5.4 Análisis generales

Los modelos presentados fueron analizados en un ámbito de aplicación para suplir necesidades esenciales y prioritarias relacionadas con la salud, pero se pueden emplear en la solución de problemas logísticos relacionados con asignación de demanda, localización o selección de instalaciones y ruteo de vehículos. Particularmente se considera que los modelos elaborados tienen un ámbito de aplicación relacionado con recogida y entrega de paquetes de tamaño y peso pequeños, pero que pueden estar relacionados con un beneficio o valor importante por la información que contiene, así como presentar una solución para el transporte de mercancías que se requieran con prioridad o en un tiempo reducido.

Dentro de los análisis efectuados se observó que los viajes de ida son viajes que van vacíos, por lo que se plantea la posibilidad en un estudio complementario, de realizar viajes combinados o multipropósito, al llevar a los destinos mercancías o insumos esenciales que se requieran, los cuales son escasos en zonas con baja infraestructura vial.

En el planteamiento de los modelos realizados se omitieron otras condiciones que se pueden evaluar como condiciones de barrera, zonas de restricción, entre otros, los cuales afectan la matriz de costos y pueden generar resultados diferentes a los presentados.

Otro aspecto no analizado y el cual se puede considerar un punto crítico para los modelos logísticos en los que se transporte mercancías con drones es el relacionado con la batería, ya que este puede limitar las operaciones planteadas, sin embargo y dados los avances tecnológicos relacionados con un aumento de la capacidad de carga, disminución de los tiempos de recarga o la utilización de fuentes de energía híbridas se puede tener una mayor fiabilidad y viabilidad respecto a los modelos propuestos.

Las etapas de los modelos analizados vislumbran la importancia de la red, sus características y su arquitectura, en las operaciones propuestas se optó por una red conformada por todos los nodos que hacen parte de la demanda y los puntos de oferta, posibilitando viajes directos entre cada uno de estos. Para los planteamientos que se realizaron a un nivel macro se aprecia como un método de resolución viable al no contar con un número amplio de soluciones, pero en cuanto se llega a un análisis a nivel táctico-operativo en donde se aumenta el número de actores, es necesario mejorar la arquitectura de la red, priorizando las rutas con mayor demanda o generando una arquitectura de red en cuadrícula que permita un manejo, control y operación de la misma, la cual a su vez puede estar restringida por aspectos relacionados con la infraestructura de comunicación o aspectos físicos como las condiciones climáticas adversas para los vuelos. La utilización de redes discretizadas o plantean una ventaja en cuanto a que los modelos no estarán amarrados a la localización puntual de los puntos de oferta y demanda sino a una organización del espacio aéreo, evitando reprocesos en la creación de una nueva red.

La caracterización y agrupación de la población objetivo se destaca como un insumo de valor para la ejecución de un modelo con un buen desempeño, resaltando la importancia del estudio y diagnóstico del problema a solucionar con el fin de seleccionar indicadores o características relevantes para realizar dicha actividad.

Dentro de los análisis iniciales se contempló la posibilidad de analizar los costos de los drones como un porcentaje por kilómetro recorrido en función de las horas de vida útil de los vehículos, sin embargo, este análisis se descartó teniendo en cuenta que en los escenarios analizados muy pocos drones fueron utilizados la cantidad de horas necesarias para que cumplieran su ciclo de vida.

Para los dos modelos analizados se obtuvieron diferentes escenarios, encontrando los escenarios con menores costos para cada uno; sin embargo, los otros escenarios que presentaron un costo mayor pueden representar una ventaja logística y de planeación ya que cada uno de ellos puede responder mejor ante un escenario en particular, como puede ser una ventana de tiempo

determinada, la existencia, facilidad o imposibilidad de construir instalaciones intermedias, entre otros factores.

## Capítulo VII

### Conclusiones

Se planteo un modelo de transporte de muestras de sangre por medio de drones, el cual se dividió en dos etapas: a nivel estratégico y a nivel táctico-operativo. Las operaciones logísticas propuestas se desarrollaron en un entorno de operación el cual se ejecutó bajo un marco regulatorio nacional que permite los vuelos de drones a una altura inferior a los 120m; aunque esta normativa se encuentra en una etapa de maduración y con diversos aspectos por definir. Respecto a la arquitectura del espacio aéreo se adoptó la propuesta de (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020) en donde se tienen cuenta tres aspectos fundamentales, relacionados con la identificación y clasificación del espacio aéreo, la automatización de las operaciones aéreas y la creación de una red capaz de solucionar posibles conflictos en las trayectorias.

Se realizó un diagnóstico cuantitativo y cualitativo a nivel departamental estudiando estadísticas poblacionales, de salud y de la infraestructura vial colombiana; identificando los departamentos con menor cobertura y acceso a los servicios de toma de muestras de laboratorio clínico. Para las enfermedades de malaria y diabetes tipo 2, las regiones con indicadores más bajos fueron Guainía y Valle del Cauca.

A nivel estratégico se planteó un modelo, con el fin aumentar la accesibilidad y cobertura de los servicios de salud, el cual fue desarrollado en dos instancias: la primera con el objetivo de minimizar las instalaciones o centros de recogida; la segunda buscando minimizar las instalaciones y la longitud total recorrida para transportar las muestras desde los centros de intermedios a los laboratorios clínicos.

A nivel táctico-operativo se planteó un modelo como fin brindar la cobertura de servicios en áreas rurales evitando los desplazamientos de los usuarios a las instalaciones de servicio, ofertando servicios de recolección domiciliaria minimizando la longitud total recorrida, el tiempo y costos, optimizando la recolección de muestras mediante la programación de rutas para los vehículos que recogieron los ejemplares.

Se demostró que independientemente de los vehículos a implementar en las operaciones, la planeación de un modelo logístico de asignación, localización y programación de rutas presentan una ventaja y reducción de costos al ofertar un servicio domiciliario especializado, comparado con la realización de los usuarios a instalaciones de servicios.

Los modelos propuestos se realizaron teniendo en cuenta cuatro variables principales: la localización, la demanda, el tiempo y la longitud de los recorridos, en estudios futuros con un nivel de detalle especializado en la operación es importante considerar incluir variables adicionales relacionadas con los drones como la

energía, el método de refrigeración y aspectos relacionados con el entorno como la topografía, condiciones climáticas y las redes de comunicación así como la arquitectura del espacio aéreo.

El primer modelo se evaluó en el departamento de Guainía en donde se buscó recolectar 1429 muestras en diferentes ventanas de tiempo. En ese se validó la optimización de la recolección al agrupar las muestras en instalaciones intermedias y luego ser transportadas a las instalaciones finales. Se evaluaron 22 escenarios y se concluyó que aquellos con drones de menor rango ofrecen un número mayor de operaciones diarias, lo cual puede ofrecer una operación más flexible en cuanto a los tiempos de planeación y recolección de muestras, teniendo una menor incidencia algún retraso o reprogramación de rutas.

Por otra parte, los escenarios evaluados con drones de menor rango suponen la facilidad de la construcción de instalaciones intermedias, en contraste los escenarios evaluados con drones de mayor rango suponen la dificultad de la construcción de las mismas. En cuanto a la distancia total recorrida, la mayor proporción de distancia se recorrió en la recolección de muestras a instalaciones intermedias; a su vez los modelos con drones de menor rango recorrieron menos distancia que modelos evaluados con drones de mayor rango. Asimismo, el aumento del número de drones represento una disminución en la distancia total recorrida debido a la agrupación de muestras.

Dentro de los escenarios evaluados el escenario 12 presento un mejor comportamiento, al recolectar 17.124 muestras en 5 años; este planteó 3 instalaciones finales, 4 instalaciones intermedias y un tamaño de flota de 6 drones. El costo calculado de implementación de este modelo fue de \$810.000.000 con un valor unitario por muestra de \$46.718.

El segundo modelo se evaluó en el departamento de Valle del Cauca en donde se implementó una operación de recolección de muestras de sangre validando la cobertura utilizando drones y comparando su eficiencia con modos motorizados tradicionales. Respecto a las distancias totales recorridas, a partir de los viajes individuales se observó un aumento entre el 34% y 44% para los viajes realizados con motocicletas.

Se obtuvo una reducción de la distancia entre un 67% y 71% teniendo como vehículo de transporte motocicletas y una reducción de la distancia entre el 78% y 79% para los escenarios evaluados con drones. En los escenarios evaluados con el objetivo de recolectar 43.364 muestras (1 muestra por paciente anual) y 173.456 muestras (4 muestras por paciente anual) se halló que los escenarios con un menor costo fueron los ejecutados con drones, con un valor de \$188.000.000 para la recolección de 43.364 muestras anuales y de \$694.000.000 para la recolección de 173.456 muestras anuales y un valor unitario del transporte de ejemplares de \$4.001 y \$1.764 respectivamente.

Diversos entornos de operación en donde se han implementado estos modelos de transporte están asociados a áreas rurales en donde al tener una menor densidad de transporte aéreo convencional y una baja densidad de operaciones, requiere de una menor investigación y arquitectura del espacio aéreo; en donde los riesgos terrestres y aéreos asociados a la operación son menores dado que no se involucran tantos actores, comparado con entornos urbanos o de mayor desarrollo.

Las arquitecturas de la gestión de tráfico aéreo de drones resaltaron la importancia y priorización que tienen los viajes relacionados con la salud, siendo este uno de los primeros temas abordados y en desarrollo a nivel regulatorio, lo cual plantea una posibilidad y viabilidad para este tipo de servicios, destacando la importancia de los temas relacionados con el bienestar por su impacto social. Por otra parte, los drones adaptados para las operaciones logísticas requieren tener sistemas redundantes de energía, propulsión, hardware y comunicaciones para garantizar la seguridad durante el vuelo, minimizando los riesgos y aumentando la fiabilidad del transporte.

Los modelos analizados se validaron para operaciones exclusivas relacionadas con transporte de muestras de sangre, sin embargo se observó una mejora potencial, la cual consta de hacer uso de los servicios de ida al punto de demanda ofertando otros servicios de transporte, que pueden estar relacionados o no con temas de salud, con el fin de brindar accesibilidad a otro tipo de servicios o mercancías y disminuyendo la subutilización de los equipos, permitiendo reducir la tarifa asociada a un solo servicio.



## Capítulo VIII

### **Anexos**

Anexo 1: Resultados y análisis de los modelos evaluados.

## Capítulo IX

### Bibliografía

- World Health Organization. (2004). *Medicines strategy: countries at the core, 2004-2007*.
- Alibaba. (26 de 11 de 2022). Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/FOXTECH-Whale-360-4hours-5KG-cargo\\_1600443448154.html?spm=a2700.wholesale.0.0.32c26394jXfp8g](https://www.alibaba.com/product-detail/FOXTECH-Whale-360-4hours-5KG-cargo_1600443448154.html?spm=a2700.wholesale.0.0.32c26394jXfp8g)
- Amukele, T. K., Hernandez, J., Snozek, C. L., Wyatt, R., Douglas, M., Amini, R., & Street, J. (2017). Drone Transport of Chemistry and Hematology Samples Over Long Distances. *American Journal of Clinical Pathology*, 00,1-9.
- Amukele, T. K., Sokoll, L. J., Pepper, D., Howard, D. P., & Street, J. (2015). Can Unmanned Aerial Systems (Drones) Be Used for the Routine Transport of Chemistry, Hematology, and Coagulation Laboratory Specimens? *PLoS ONE*.
- Amukele, T. K., Street, J., Carroll, K., Miller, H., & Zhang, S. X. (2016). Drone Transport of Microbes in Blood and Sputum Laboratory Specimens. *Journal of Clinical Microbiology*, 54,2622-2625.
- Aschner, P. (2010). Epidemiología de la diabetes en Colombia. *Avances en Diabetología*, 95-100.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*. Mexico : Pearson.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). Gestión de riesgos en cadenas de valor. Regulando la utilización de drones en Centroamérica y República Dominicana.
- Brunt, D. (1933). The adiabatic lapse-rate for dry and saturated air. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 59: 351-360.
- Cardona, M. J., Castrillon, O. D., & Tinoco, H. A. (2017). Determinación del método óptimo de operaciones de ensamble bimanual con el algoritmo de Dijkstra.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018). *Transporte de carretera en América Latina: Evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015*. Santiago.
- Consellería de Sanidade, Xunta de Galicia, España; Organización Panamericana de la salud (OPS-OMS); Universidad CES, Colombia. (Julio de 2016). Epidat: programa para análisis epidemiológico de datos. Versión 4.2.
- Coto, E. (2003). *Algoritmos Básicos de Grafos*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2019). *Estadísticas Vitales. Cifras Definitivas año 2018*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2020). *Manual de Uso del Marco Geoestadístico Nacional en el Proceso Estadístico V.2.0*. Bogotá.
- ESRI. (02 de 12 de 2022). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/location-allocation.htm>

- ESRI. (02 de 12 de 2022). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/service-area.htm>
- ESRI. (02 de 12 de 2022). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>
- ESRI. (02 de 12 de 2022). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Algoritmos utilizados por ArcGIS Network Analyst extension: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm#GUID-A4561BEC-54E8-438D-9904-58CCA90A5A3A>
- ESRI. (02 de 12 de 2022). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/route.htm>
- Garland Chow, & Heaver Henriks. (1994). *Logistics Performance: Definition and Measurement*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management.
- Gerald J, K. (2017). Diabetes Spatial Care Paths, Leading Edge HbA1c Testing, Facilitation Thresholds, Proactive-Preemptive Strategic Intelligence, and Unmanned Aerial Vehicles in Limited-Resource Countries. *Point of Care*.
- Guyot, A. (2019). *Tables, meteorological and physical, prepared for the Smithsonian institution*. Creative Media Partners.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2016). *Catálogo de Objetos Geográficos Cartografía Básica Digital*. Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2019). Base de datos vectorial básica. Colombia. Escala 1:100.000. Bogotá.
- Instituto Nacional de Salud. (2010). *Protocolo para la Vigilancia en Salud Pública de Malaria*. Bogotá.
- Instituto Nacional de Salud. (2017). *Guía para la Vigilancia por Laboratorio de Parásitos del Genero Plasmodium spp*. Bogotá.
- Instituto Nacional de Salud. (2018). *Informe del Evento. Malaria*. Colombia.
- Instituto Nacional de Salud. (2019). *Manual de Procedimientos para la Toma, Conservación y Envío de Muestras al Laboratorio Nacional de Referencia*. Bogotá.
- Instituto Nacional de Vías. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Colombia.
- Karak, A., & Abdelghany, K. (2019). The hibrid vehicle-drone routing problem for pick-up and delivery services. *Transportation Research Part C Elsevier*.
- Kim, S. J., Lim, G. J., Cho, J., & Côté, M. J. (2017). Drone-Aided Healthcare Services for Patients with Chronic Diseases in Rural Areas. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*.
- La Nacion. (04 de 12 de 2022). *La Nacion*. Obtenido de <https://www.nacion.com/tecnologia/innovaciones/ticos-de-poblados-lejanos-recibiran-medicamentos-entregados-por-drones/7D6I32GY65D67PSVN7SJRYMHL/ story/>

- Marinelli, M., Caggiani, L., Ottomanelli, M., & Dell'Orco, M. (2017). En route truck-drone parcel delivery form optimal vehicle routing strategies. *IET Journals*.
- Matternet Product*. (26 de 11 de 2022). Obtenido de <https://mttr.net/product>
- Mc Carthy, T., Pforte, L., & Burke, R. (2020). Fundamental Elements of an Urban UTM. *Aerospace*.
- Ministerio de Salud. (1999). *Guia de Atención de la Diabetes Tipo II*. Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). Estudio Sobre la geografía Sanitaria de Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). Encuesta Nacional de Demografía y Salud. I.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2016). *Redes Integrales de prestadores de servicios de salud. Lineamientos para el Proceso de Conformación, Organización, Gestión, Seguimiento y Evaluación*. Bogotá.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2019). *Diagnóstico Laboratorios de Salud Pública Vigencia de 2018*. Bogotá.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (30 de 06 de 2020). *Sistema Integrado de Información de la Protección Social*. Obtenido de <https://sig.sispro.gov.co/sigmisp/index.html>
- MissionGo*. (26 de 11 de 2022). Obtenido de <https://www.missiongo.io/mgv100/>
- Ochieng, W. O., Ye, T., Scheel, C., Lor, A., Saindon, J., Lin, S., . . . Kareem, K. (2020). Uncrewed aircraft systems versus motorcycles to deliver laboratory samples in west Africa: a comparative economic study. *Lancet Glob Health*, e143-e151.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2006). *Convenio sobre Aviación Civil Internacional, Novena Edición*. Chicago.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2016). *Gestión del Tránsito Aéreo, decimosexta edición*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2002). *Modulo de Principios de Epidemiología para el Control de Enfermedades MOPECE. Unidad 6: Control de enfermedades en la población*. Washigton.
- Padilla, J., Rico, A., & Usta, C. (2001). Malaria en Córdoba: situación epidemiológica y medidas de prevención. *Informe Quincenal Epimediológico Nacional*, 49-55.
- Phantom 4 Pro*. (26 de 11 de 2022). Obtenido de <https://www.dji.com/mx/phantom-4-pro-v2/specs>
- Poder Público - Rama Legislativa. (2002). Ley 769 de 2002. *Diario Oficial No. 44.932*.
- Schwab, K., Sala-i-Martín, X., & Samans, R. (2017). The Global Competitiveness Report 2017-2018.
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2018). Resolución 4201 del 27 de diciembre de 2018.
- Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil. (2020). AIP Colombia, ENR 1.1 Reglas Generales.
- University System of Maryland. (2019). Course Drones and autonomous Systems: Fundamentals.
- UPS Airlines. (26 de 11 de 2022). UPS Launches First Revenue Drone Delivery Service in U.S.

Whitley, H. P., Yong, E. V., & Rasinen, C. (2015). *Selecting an A1C Point-of-Care Instrument*. Alabama: American Diabetes Association.

*Zipline capabilities statement*. (26 de 11 de 2022). Obtenido de [https://assets.website-files.com/6286bd0c5e0b7ea66493bc5b/629068d7a41ac40aed41bc39\\_Zipline-Capabilities-Statement.pdf](https://assets.website-files.com/6286bd0c5e0b7ea66493bc5b/629068d7a41ac40aed41bc39_Zipline-Capabilities-Statement.pdf)