

**PROPUESTA DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE VACUNAS
CONSIDERANDO LIMITACIONES DE INVENTARIO EN DEPÓSITOS Y
PUNTOS DE ENTREGA EN EL VALLE DEL CAUCA.**

**ESTEFANIA MESSA MEJIA
TATIANA SANCHEZ MURILLO**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE ZARZAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
2022**

**PROPUESTA DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE VACUNAS
CONSIDERANDO LIMITACIONES DE INVENTARIO EN DEPÓSITOS Y
PUNTOS DE ENTREGA EN EL VALLE DEL CAUCA.**

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero(a) Industrial

**ESTEFANIA MESSA MEJIA
TATIANA SANCHEZ MURILLO**

**DIRECTOR
CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS**

**CODIRECTOR
JULIÁN GONZÁLEZ VELASCO**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE ZARZAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

2022

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	5
CAPITULO 1. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES CRÍTICOS Y ELEMENTOS DE TOMA DE DECISIONES	8
CAPITULO 2. MODELO DE TOMA DE DECISIONES.....	16
CAPITULO 3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
3.1. RESULTADOS.....	29
3.2. ESCENARIOS.....	35
3.2.1. Escenarios nivel de inventario.....	35
3.2.2. Escenarios demanda	36
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
REFERENCIAS	40

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Comparación de la logística de distribución de vacunas Covid-19. ...	9
Ilustración 2. Cuartos fríos en el Valle del Cauca.....	10
Ilustración 3. Vehículo a emplear en la distribución de vacunas	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Regiones para el plan de vacunación.....	10
Tabla 2. Factores críticos.....	13
Tabla 3. Demanda mensual de acuerdo con la cantidad de habitantes	23
Tabla 4. Costo de transporte desde el depósito central hacia el regional.....	25
Tabla 5. Costo de recolección desde los depósitos municipales hacia los regionales.....	25
Tabla 6. Vacunas distribuidas departamento Valle del Cauca 2021-2022.....	25
Tabla 7. Equipos para mantenimiento de inventario	26
Tabla 8. Costo total mensual talento humano	27
Tabla 9. Costos de conectividad	27
Tabla 10. Costos de ordenes pendientes.....	28
Tabla 11. Asignación numérica depósito regional	29
Tabla 12. Asignación numérica depósito municipal.....	29
Tabla 13. Resultado X_{it}	30
Tabla 14. Resultados NR_{it}	31
Tabla 15. Resultados Y_{jit}	32
Tabla 16. Resultados NM_{jt}	33
Tabla 17. Escenarios nivel de inventario modelo 1	35
Tabla 18. Escenarios nivel de inventario modelo 2	36
Tabla 19. Escenarios demanda modelo 1	36
Tabla 20. Escenarios demanda modelo 2	37

INTRODUCCIÓN

Con el progreso mundial del sistema sanitario, las exigencias de seguridad de los productos médicos son cada vez más estrictas por lo que es necesario contar con sistemas logísticos y cadenas de suministro funcionales, solo así se garantiza el almacenamiento, manipulación, trazabilidad y gestión de stocks de vacunas efectivas. Por lo tanto, el correcto funcionamiento de la cadena de frío marca la diferencia entre vacunar a la población efectivamente o con productos biológicos, cuya efectividad es nula o muy baja (Portero et al., 2004).

Algunos factores que inciden en la operación logística de las vacunas son la infraestructura, dado que requieren el desarrollo de una estrategia de transporte que aseguren la entrega en las mejores condiciones de calidad, tiempo y lugar, según (Sierra Upegui & Ángel Álvarez, 2018) las vías terrestres en Colombia son muy frágiles debido a la topografía y la falta de desarrollo vial del país ya que pueden sufrir derrumbes y cierres inesperados, por lo que, se deben generar planes alternos de transporte terrestre para la distribución y cumplimiento. También es primordial la seguridad del transporte, de tal forma que contribuya a la ausencia de pérdidas e incidentes en las entregas; por otro lado, la seguridad del producto es relevante para que las vacunas lleguen a la población que las requiere en los plazos establecidos, cumpliendo con los estándares requeridos para su manipulación. Además, se debe contar con un sistema de control de inventario o existencia de estas, que permita realizar un seguimiento de la disponibilidad y demanda de vacunas en los centros de distribución y los puntos de entrega, ya que requieren de sistemas de información que les permitan conocer con exactitud el estado de los inventarios en cualquier momento (Peña & Silva, 2016).

El apoyo logístico es fundamental para los servicios de inmunización con el fin de asegurar la disponibilidad del equipo y suministro apropiado de vacunas de alta calidad, igualmente garantizar los materiales relacionados con este proceso a todos los niveles socioeconómicos, grupo etario, género y todos los países. En la actualidad los sistemas de salud de América latina no cuentan con la estructura logística para abastecerse a gran escala debido a la ausencia de capacidad en la cadena de frío para productos médicos. La dirección de bioética global de la Universidad de Miami menciona: “a los problemas logísticos normales de una vacuna que va a ser difícil de distribuir en países llamados desarrollados, en América Latina se suma la falta de transparencia, la carencia de gobernanza y la presencia de corrupción”. Es evidente que existirán problemas que afectarán a todo el mundo, aun así, América Latina parece más vulnerable que otras regiones (Bloomberg Businessweek, 2020).

La última amenaza para la salud mundial es el brote en curso de la enfermedad respiratoria que recientemente recibió el nombre de Enfermedad de Coronavirus 2019 (Covid-19). Se demostró rápidamente que era causado por un nuevo coronavirus que está relacionado estructuralmente con el virus que causa el síndrome respiratorio agudo severo (SARS) (Fauci et al., 2020). A principios de diciembre de 2019, se identificaron los primeros casos de una neumonía de origen

desconocido en Wuhan, la capital de la provincia de Hubei, en China. Oficialmente, la epidemia de Covid-19 en Colombia se inició el viernes 6 de marzo 2020 cuando se confirmó el primer caso en el país. Ya los primeros pacientes habían sido reportados, dos semanas atrás, en Brasil, y poco después en Ecuador y Panamá (Rosselli, 2020).

Según (OPS, 2021) al corte del 14 de septiembre de 2021 Colombia presenta una tasa de morbilidad de 9.793,1 por cada 100 mil habitantes, una tasa de proporción de positividad del 24,4%, una mortalidad general de 2.495,7 por cada millón de habitantes, una tasa de letalidad promedio del 2,5% y un número Reproductivo $R(t)$ de 0,87.

Debido a los efectos ocasionados por el COVID-19 en la salud pública, es necesario contar con una vacuna para prevenir la propagación de la enfermedad, y así, evitar que las personas se contagien de forma severa, disminuyendo la posibilidad de transmisión. Por esto, es importante que se lleve a cabo una correcta vacunación, para llegar a la inmunidad de rebaño, es decir, vacunar al 70% de la población nacional (Ministerio de Salud, 2021a).

Respecto a lo anterior, los medicamentos y vacunas son un grupo de alto impacto social dada la incidencia que tienen en la salud de las personas, en Colombia la pérdida y desperdicio de estos se debe principalmente a un manejo deficiente, según (Gómez, 2016) esto ocurre por los frascos sin abrir, por razones como: pasó de la fecha de expiración, abuso térmico, falla en la cadena de frío, congelamiento, rotura, mal uso o falta de conocimiento de la política frascos abiertos de dosis múltiples y poca eficiencia sobre uso de dosis en frasco de dosis múltiples, lo que genera graves problemas en el sector salud. Garantizar las condiciones de calidad de estos productos implica aplicar técnica y responsablemente la cadena de frío, por consiguiente, las vacunas son el componente más crítico, desde su producción hasta su uso, considerando que después de haber sido abiertas las dosis para ser aplicadas, el margen de vida útil de estos productos es mínimo (Urrego, 2018).

Existe una necesidad sin precedentes de fabricar y distribuir suficientes vacunas seguras y efectivas para inmunizar a un número considerable de personas con el fin de proteger a toda la comunidad mundial de la amenaza continua de morbilidad y mortalidad del síndrome respiratorio agudo severo (SARS CoV-2). La necesidad mundial de vacunas y la amplia diversidad geográfica de la pandemia requieren más de un enfoque de vacuna eficaz (Corey et al., 2020).

Son muchos los actores que participan en la cadena de suministro de las vacunas, por lo que el control que se debe llevar en cada uno de los eslabones debe ser estricto. En la actualidad ya existen mecanismos que ayudan a la protección de las vacunas; sin embargo, se debe seguir innovando para reducir los tiempos de entrega, fortalecer el Sistema de Gestión de Cadena de Frío, conseguir insumos refrigerados en caso de que no se pueda administrar la vacuna y desarrollar sistemas de monitoreo 24/7 con continuidad de datos ya sea mediante almacenamiento en la nube gubernamental, unidades de disco duro (HDD), unidades de estado sólido (SSD) o cinta magnética (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020).

Actualmente el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) no posee una plataforma informática para hacer un fármaco vigilancia intensiva y que llegue a todos los puntos de la geografía nacional, de tal manera que se pueda llevar un control de las personas que han sido vacunadas para garantizar su retorno. Además, el Ministerio de salud y protección social debe contar con un sistema de monitoreo del transporte, entrega y aplicación de las vacunas en cada municipio (López, 2021).

Para llevar a cabo una vacunación efectiva se debe contar con un plan logístico, pero el país presenta problemáticas con respecto a la cadena de suministro en general, desde el almacenamiento en los centros de distribución hasta los diferentes puntos de entrega, ya que se debe conocer si estos cuentan con las neveras de hielo seco requeridas para su preservación; adicionalmente la logística de transporte debe estar diseñada para asegurar la temperatura considerando que hay municipios con condiciones climáticas extremas sobrepasando la normal climatológica, donde existen carreteras en mal estado y con carencia de vías de acceso adecuadas, por lo que es difícil garantizar que las vacunas estén siempre en ultra congelamiento (López, 2021).

La distribución de vacunas generalmente se desarrolla a través de la red de carreteras, ya que es el primer mecanismo de movilidad para la distribución en todos los departamentos del territorio nacional. En particular, el Valle del Cauca está conformado por 42 municipios, tiene una extensión territorial de 22.195 Km^2 y cuenta con 8.241,63 kilómetros de infraestructura vial; de ellas, 735,18 kilómetros corresponden a vías pavimentadas, lo que refleja una deficiente infraestructura a este nivel, debido a que representa el 8,92% del total de la red vial (Gobernación Valle del Cauca, 2016). La poca cobertura se ve expresada en el atraso estructural de la red de carreteras de la región, además se debe afrontar los efectos de un intenso crecimiento del tráfico originado por una mayor actividad, el incremento del comercio y la creciente motorización (Díaz, 2019).

En el caso del departamento del Valle del Cauca, las principales barreras que impactan la logística se asocian particularmente a la infraestructura, gestión de aduanas y empresarial; pues los altos costos de transporte, la deficiencia en infraestructura, congestiones viales, la complejidad de los trámites aduaneros, la falta de entendimiento de la normatividad, la deficiencia en sistemas de información, talento humano, escasez de oferta de servicios, zonas logísticas y el alto precio de bodegas; generan retrasos en la entrega de bienes del consumidor final disminuyendo el crecimiento de la actividad económica y la ampliación de los mercados (Díaz, 2019).

El Valle del Cauca hace parte de uno de los vértices del denominado triángulo de oro de Colombia, el cual hace referencia al espacio geográfico formado por la unión en línea recta de Cali, Medellín y Bogotá. Dentro de este triángulo se concentra 55,8% del PIB nacional y 51,1% de la población económicamente activa del País (Cámara de Comercio de Cali, 2020). Adicionalmente, es uno de los departamentos de mayor participación logística en lo que se refiere a transporte, almacenamiento

y comunicaciones, siendo el transporte terrestre el de mayor participación en el PIB logístico del departamento (CRCVC, 2016).

Con base en lo anterior, es necesario el desarrollo de propuestas encaminadas a contribuir al proceso de toma de decisiones en la distribución de vacunas considerando aspectos relevantes asociados con las limitaciones de inventario en depósitos y puntos de entrega, el cual es el propósito general de este proyecto tomando como caso de estudio el departamento del Valle del Cauca.

Este documento se estructura de la siguiente forma: el capítulo 1 concierne a la identificación de factores críticos y elementos de toma de decisiones, el capítulo 2 se presenta el modelo de toma de decisiones formulado, el capítulo 3 abarca la validación del modelo, y finalmente se detallan las conclusiones del proyecto y las referencias bibliográficas empleadas.

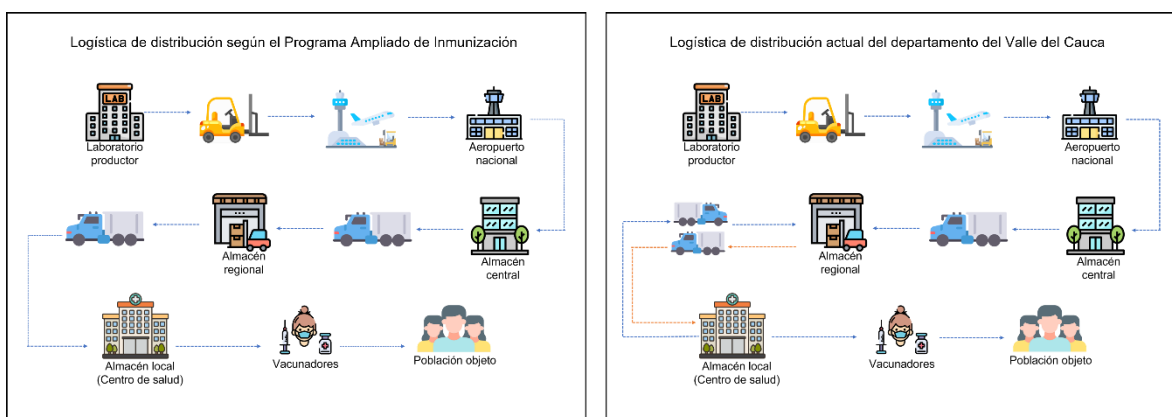
CAPITULO 1. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES CRÍTICOS Y ELEMENTOS DE TOMA DE DECISIONES

La distribución de vacunas constituye un reto muy importante desde el sector logístico hasta el sector salud, son muchos los factores que se deben tener en consideración para garantizar la efectividad de los biológicos. Esta cadena de distribución de vacunas tiene características únicas como la entrega y administración que deben seguir las pautas establecidas por la OMS, incluyendo aspectos como el programa de administración, las frecuencias de entrega, los procedimientos para estimar la demanda y el desperdicio, las existencias de reserva requeridas y los tipos de depósito que se deben usar. Una particularidad de esta cadena es que requiere el almacenamiento en frío y transporte estrictamente definido a temperaturas controladas, utilizando dispositivos para su monitoreo (Lim et al., 2019).

Según el (Ministerio de Salud, 2021d), las vacunas que ingresan al país requieren diferentes condiciones de almacenamiento. En su mayoría, deben conservarse en temperaturas entre +2°C a +8°C, mientras que otras requieren temperaturas de congelación o ultracongelación.

En el caso de las vacunas de Astrazeneca, Sinovac y Janssen su logística es idéntica a la que se usa para la distribución de vacunas en el territorio nacional según el Programa Ampliado de Inmunización (PAI), pues requiere de una cadena de frío entre dos y ocho grados. Por otra parte, la vacuna de Moderna se debe conservar a una temperatura comprendida entre -25 °C y -15 °C, se pueden mantener refrigerados a una temperatura de entre 2 °C y 8 °C durante 30 días previos para su aplicación y soporta hasta seis meses a -20°C, lo que representa la temperatura de un congelador estándar. Además, es capaz de conservar sus propiedades durante 12 horas a temperatura ambiente. Gracias a esta característica, en muchos casos no es necesario disponer de equipos para mantener la cadena de frío extremo (OMS, 2021).

Ilustración 1. Comparación de la logística de distribución de vacunas Covid-19.



Fuente: Elaboración propia.

La logística de distribución de las vacunas anteriormente mencionadas inicialmente llegaba del laboratorio productor al aeropuerto, de allí iba al almacén central del Ministerio, en donde se alojan los biológicos en el país; posteriormente, se distribuía a los almacenes regionales, luego a los centros de salud y a los vacunadores, para llegar finalmente a su población de destino.

En el transcurso del proceso de vacunación, la distribución en el Valle del Cauca se ha modificado debido a diversas necesidades como son las nuevas metas y estrategias propuestas por el (Ministerio de Salud, 2022). Por lo anterior, el departamento se ha visto en la necesidad de cambiar el sistema actual de distribución de manera que el transporte sea más eficiente y pueda llegar a la mayor población posible, donde en la actualidad se realiza de acuerdo con el modelo propuesto por el Ministerio de Salud, contando con la diferencia de que las vacunas no serán entregadas a los municipios desde el depósito regional, sino que cada depósito municipal se encarga de asignar un vehículo capacitado para recoger las vacunas y trasladarlas de nuevo al punto de origen (Ver Ilustración 1).

Al presente, las últimas adquisiciones de los equipos de refrigeración se están realizando a través de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), quienes realizan los procesos licitatorios con las diferentes empresas del sector que cumplan con las condiciones técnicas exigidas y desde los niveles territoriales en el marco de la autonomía administrativa (Asmar, 2021).

Colombia, actualmente cuenta con 3 cuartos fríos nacionales, 110 locales y 197 refrigeradores solares, además, 3.617 refrigeradores precalificados por la OMS, 3.070 dataloggers para monitoreo de temperatura en el transporte +2 a +8°C y 50 ultracongeladores para almacenamiento de vacunas a -70°C para el almacenamiento de vacunas de Covid-19 (Ministerio de Salud, 2021d).

Por su parte, en la actualidad la secretaria de Salud del Valle indicó que el departamento ha sido dividido en cinco regiones de cara a lo que será el desarrollo del plan de vacunación (Ver Tabla 1 e Ilustración 2).

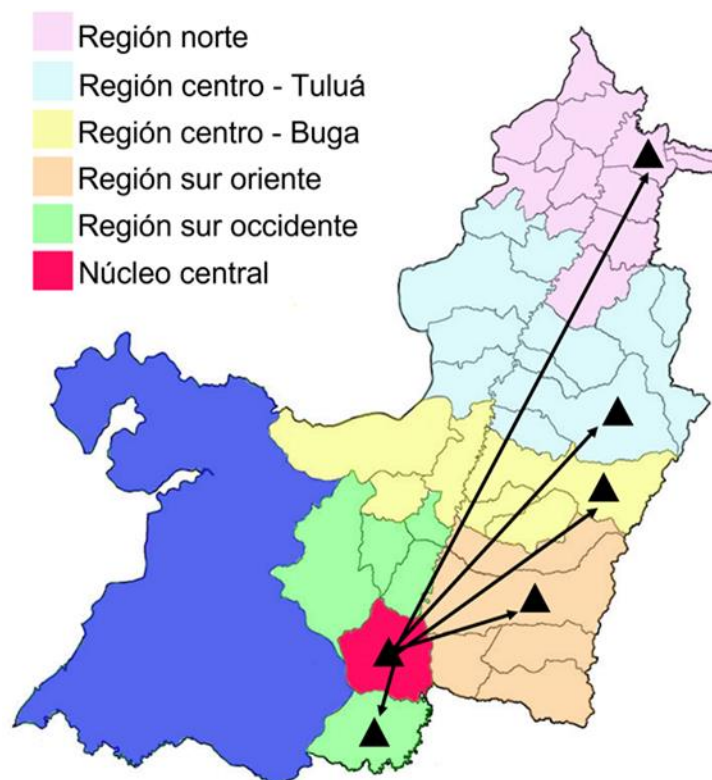
Tabla 1. Regiones para el plan de vacunación.

Región	Municipios
Norte	Alcalá, Ansermanuevo, Argelia, Cartago, El Águila, El Cairo, La Unión, La Victoria, Obando, Toro, Ulloa, Versalles y Zarzal.
Centro – Tuluá	Andalucía, Bolívar, Bugalagrande, Caicedonia, El Dovio, Riofrío, Roldanillo, San Pedro, Sevilla, Trujillo y Tuluá.
Centro - Buga	Buga, Calima, Ginebra, Guacarí, Restrepo y Yotoco.
Sur oriente	Candelaria, El Cerrito, Florida, Palmira y Pradera.
Sur occidente	Dagua, Jamundí, La Cumbre, Vijes y Yumbo.

Fuente: Elaboración propia.

En cada una de las regiones se cuenta con un cuarto frío que dependerá del núcleo central, el cual está ubicado en la ciudad Cali, donde se maneja la logística para llegar a los lugares municipales, es decir, después de la llegada de las vacunas al almacén regional son distribuidas a los 8 cuartos fríos del departamento, dos ubicados en Cali, uno en Palmira, dos en Jamundí, uno en Buga, uno en Tuluá y uno en Cartago (Secretaría de Salud del Valle del Cauca, 2020).

Ilustración 2. Cuartos fríos en el Valle del Cauca.



Fuente: Elaboración propia.

Para el cumplimiento de toda la logística de distribución anteriormente descrita se consideraron algunos aspectos según (Ministerio de Salud, 2021c) y las normas del manual técnico-administrativo del PAI para la toma de decisiones tales como:

- Conservar la vacuna a una temperatura según los rangos declarados por el fabricante.
- Cumplir con la política de frascos abiertos de acuerdo con las recomendaciones para cada biológico.
- Realizar la toma de temperaturas de almacenamiento dos veces al día los 365 días del año según los procedimientos del programa o implementar sistemas de monitoreo continuo para su verificación.
- Realizar monitoreo de temperaturas continuo durante el transporte de las vacunas.
- Para el caso de las vacunas ultracongeladas, una vez son puestas en temperaturas entre +2°C a +8°C, no pueden volver a temperaturas de ultracongelación.
- Reportar los casos de pérdida de cadena de frío que se presenten, según el procedimiento que se tenga estandarizado para reportar al INVIMA.

La toma de decisiones en salud pública es un proceso que implica que los gobiernos puedan responder continuamente a las circunstancias cambiantes, anticipando las amenazas emergentes e identificando formas para controlarlas (Allin et al., 2004), Por lo tanto, el (Ministerio de Salud, 2021b) de Colombia mediante el Decreto 630 de 2021 asignó la priorización para distribuir la vacuna considerando aspectos sociales y de salud pública, por ende, el plan de vacunación se dividió en cinco etapas:

- En la primera etapa se vacunará, de forma progresiva, al personal cuya actividad principal está involucrada con la atención de pacientes que tienen diagnóstico confirmado de COVID-19 y, en consecuencia, se encuentran en una exposición permanente, intensa y directa al virus; y a los habitantes del territorio nacional que tienen el mayor riesgo de presentar un cuadro grave y de morir por COVID-19 (Mayores de 80 años).
- En la segunda etapa, a los habitantes del territorio nacional con alto riesgo de presentar un cuadro grave y de morir por COVID-19 (60 a 79 años), al talento humano en segunda y tercera línea que desarrolla su actividad principal en los prestadores de servicios de salud de cualquier nivel de complejidad, en los establecimientos de sanidad de las Fuerzas Militares y de la Policía Nacional.
- En la tercera etapa, a los habitantes del territorio nacional que tienen un riesgo moderado de presentar un cuadro grave y de morir por COVID-19 (50 a 59 años) y la población de 12 a 59 años con comorbilidades; a los cuidadores de población de especial protección; profesores de básica y secundaria; a las Fuerzas Militares y la Policía Nacional.

Luego de vacunada esta población prioritaria comenzará la segunda fase de vacunación en el país, constituida por las etapas cuatro y cinco del plan de vacunación.

- En la cuarta etapa se vacunará a los habitantes del territorio nacional que viven en contextos en los que se dificulta garantizar el distanciamiento físico como personas privadas de la libertad, cuidadores institucionales, población

en profesiones y ocupaciones de riesgo. Además, los individuos entre 40 y 49 años.

- En la última etapa, con la que se completará la población necesaria para lograr una inmunidad de rebaño, se vacunará a la población de 12 años en adelante que no se encuentre en las etapas, 1, 2, 3 y 4, las mujeres gestantes incluyendo hasta 40 días postparto. Se mantendrá el orden de aplicación comenzando con los adultos entre 30 y 39 años, hasta llegar a los jóvenes y adolescentes que se encuentren dentro de la población objeto del Plan Nacional de Vacunación.

A pesar de que actualmente no se dispone de normas estandarizadas para estimar las necesidades de transporte. La (Organización Panamericana de la Salud, 2021) recomienda establecer un plan con las actividades programadas que hay que desarrollar antes, durante y después de la vacunación, considerando las experiencias en otras acciones previas de vacunación e inmunización que pueden ser útiles para la decidir sobre la distribución que se requerirán según las actividades y las características del País. Algunas pueden ser:

- Distribución de vacunas e insumos, considerando:
 - **Volumen de la vacuna:** volumen por dosis empacada por total de dosis.
 - **Número y capacidad de contenedores térmicos.**
 - **Volumen que hay que transportar:** volumen de la caja de envío (recipiente térmico).
 - **Peso que hay que transportar:** peso de la caja de envío (recipiente térmico) cargado.
 - **Transporte de jeringas:** volumen de jeringas empacadas por total de jeringas.
- Desplazamiento de equipos de vacunación a sitios distintos del establecimiento de salud.
- Elaboración del inventario de los recursos de transporte disponibles según el nivel de gestión.

Además, identificar las instituciones, los gobiernos locales y los aliados estratégicos que pudieran contribuir con medios de transporte adicionales para cubrir las brechas. Calcular las necesidades de combustible a partir del consumo promedio por vehículo y de la distancia recorrida por día. Considerar las variaciones en los precios a nivel subnacional, así como las condiciones de campo (por ejemplo, estado de las carreteras, barreras montañosas del terreno, temporada de lluvias, entre otras).

Posteriormente, como se observa en el **ANEXO 1** se realizó una revisión sistemática de la literatura considerando bases de datos como: Scopus (Elsevier), Web of Science – WOS (Clarivate), IEEE Xplore, Google academic y EbscoHost, con el fin de identificar los factores críticos que afectan la distribución de vacunas, donde se

obtuvo 29 documentos, de acuerdo a los criterios de inclusión y exclusión definidos en la revisión ([ANEXO 2](#)).

Tabla 2. Factores críticos

Autor	Logística de distribución y transporte	Características de la vacuna	Trazabilidad y sistema de control del producto	Seguridad	Cadena de frío	Almacenamiento	Control de inventarios
(Dellepiane et al., 2000)			X	X			
(Loo et al., 2003)	X						
(Mo et al., 2009)	X						
(Garcés & Gutiérrez, 2012)				X	X	X	
(Norman et al., 2013)					X		
(Haidari et al., 2013)					X	X	
(Novaes et al., 2015)	X				X		
(Purssell, 2015)					X		
(Izar et al., 2015)							X
(M. Li et al., 2017)	X						X
(Pérez Lechuga, 2018)	X						
(Tsang et al., 2018)	X		X		X		
(Huiling et al., 2018)	X				X		
(Chávez & Quilca, 2018)			X		X		
(Fatemi Ghomi & Asgarian, 2019)	X					X	
(Lim et al., 2019)	X				X	X	
(P. Li et al., 2019)	X						
(X. Li et al., 2019)					X		
(Khokhi et al., 2019)	X					X	X
(Xing et al., 2020)	X						
(Wang et al., 2020)	X						
(De Boeck et al., 2020)	X						
(Xv et al., 2020)					X		
(Gurnani et al., 2020)			X				
(Gaggero & Tonelli, 2020)	X					X	X
(El Midaoui et al., 2021)	X						
(Tavana et al., 2021)		X			X		
(Musamih et al., 2021)			X	X			
(Bhutta & Ahmad, 2021)			X	X			

Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 2* se evidencian los siete factores críticos identificados, siendo esta logística de distribución y transporte, características de la vacuna, trazabilidad y sistema de control del producto, seguridad, cadena de frío, almacenamiento y control de inventarios.

Sintetizando la investigación realizada, se determinó la importancia de los factores críticos anteriormente mencionados con relación a la distribución de vacunas específicamente a la enfermedad respiratoria del Covid-19.

El factor crítico más nombrado es la **logística de distribución y transporte** que son un elemento clave en una cadena logística, debido a que los productos se deben trasladar al lugar, en el momento, en las condiciones y por el precio adecuado. Este ocupa un tercio de la cantidad en los costos logísticos, por lo que es necesario en todas las operaciones de producción, desde la fabricación hasta el consumidor final incluyendo las devoluciones (Tseng et al., 2005).

Por otra parte, la **cadena de frío** representa el 41% de los factores más citados, definiéndose como un conjunto de elementos y procedimientos que se relacionan con el fin de garantizar los procesos de distribución, almacenamiento y manipulación de drogas, medicamentos y vacunas para lograr una óptima conservación dentro de los rangos de temperatura establecidos, siendo el objetivo mantener la potencia y/o, en el caso de las vacunas, el poder inmunológico (Volonté & Quiroga, 2013). Mantener la cadena de frío, consiste en las exigentes condiciones de temperatura en las que deben mantenerse las vacunas y algunos otros productos durante los procesos. Aunque el término podría sugerir que es suficiente con mantener las vacunas en frío, la situación real es algo más compleja, porque, aunque algunas vacunas se congelan durante los procesos de fabricación y distribución nacional o regional, en todos los niveles en los que es probable que la mayoría de los profesionales se vean involucrados, el rango de temperaturas necesario para mantener la potencia se limita a temperaturas entre +2°C y +8°C, con un objetivo de +5°C (Purssell, 2015).

Por otra parte, hay que considerar el transporte por carretera en las que se ven sometidas las vacunas para su entrega a nivel nacional y los trayectos de entrega que pueden ser de corta o media distancia con un tiempo de desplazamiento que puede ser demasiado largo, en estos, el producto refrigerado o congelado puede estar sometido a muchas aperturas de puertas, en las que entra el calor directamente del aire exterior y del personal que entra para seleccionar y retirar el producto (James et al., 2006; Pereira et al., 2010).

De todas las fases de la cadena de frío, el **almacenamiento** de las vacunas es quizá la más compleja de todas en cuanto a las actividades a realizar, en muchas ocasiones esta constituye la fase en la que deben permanecer más tiempo antes de ser administradas, motivo por el que hay que prestar especial atención para que en todo momento estos productos biológicos se mantengan bajo temperaturas controladas que permitan garantizar la estabilidad durante su vida útil (Garcés & Gutiérrez, 2012).

La distribución de la vacuna COVID-19 es un proceso muy sensible que requiere una solución altamente eficiente que sea capaz de rastrear y monitorear las vacunas mientras se entregan. En diferentes investigaciones se trata el aspecto de **trazabilidad** de la entrega de vacunas. Sin embargo, las del SARS-COV2 son mucho más sensibles que las utilizadas normalmente y requieren un seguimiento continuo en tiempo real (Musamih et al., 2021). Por lo que un **monitoreo de producto** es fundamental para mantener la trazabilidad de los biológicos, permitiendo la transmisión y velocidad de datos, optimizando el control interno de existencias y disminuyendo la probabilidad de error en la información.

Además, la **seguridad** en la cadena logística es un tema de suma relevancia para las economías globalizadas y por lo mismo, las empresas de transporte y en particular las de carga por carretera deben incorporar medidas que les permitan proveer un servicio seguro y competitivo (Villalobos, 2010), en el caso específico de las vacunas, es indispensable que se considere como factor de riesgo el robo de productos, los daños causados por un mal manejo o un accidente durante su

almacenamiento o transporte, ya que, representan no solo pérdidas económicas, sino también retrasos en las entregas, lo que conlleva una disminución de la población vacunada en el país.

En vista de esto, un elemento clave para garantizar la eficiencia y el cumplimiento de la gestión logística es la seguridad, entendiéndose como como las medidas adoptadas para detectar, mitigar riesgos y amenazas, también para mejorar la protección y manipulación de las mercancías (Solistica, 2021).

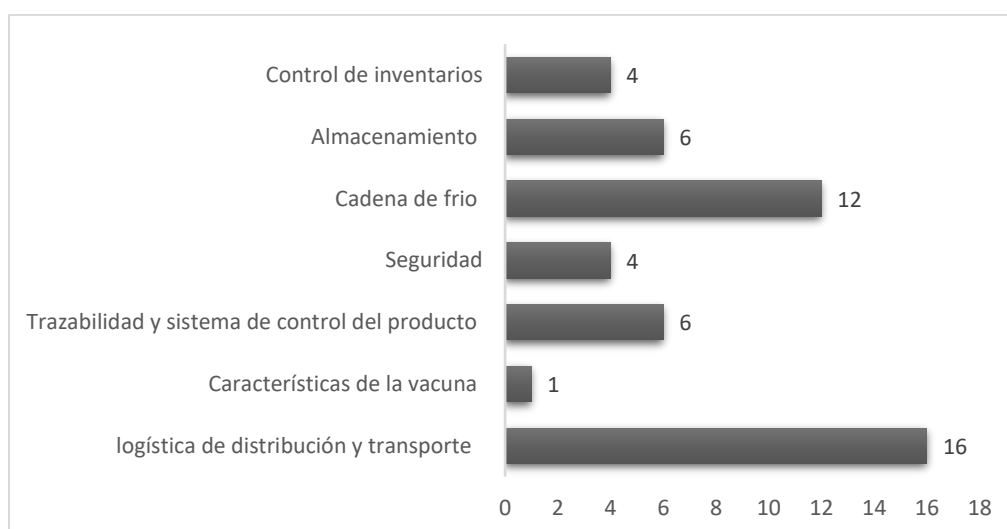
Por consiguiente, es necesario considerar llevar un **control de inventarios**, que consiste en el ejercicio del control de las existencias; tanto reales como en proceso de producción y su comparación con las necesidades presentes y futuras, para poder establecer, teniendo en cuenta el ritmo de consumo, los niveles de existencias y las adquisiciones precisas para atender la demanda (Laveriano, 2010). Dadas las características de los tipos de vacunas existentes para combatir el COVID-19, es de suma importancia gestionar correctamente el inventario de estas, para contar con la disponibilidad de dosis en el plazo establecido o en su defecto tener un nivel de inventario de seguridad optimo en caso de algún inconveniente con el abastecimiento de los biológicos.

Por último, el transporte de productos termosensibles tiene unas características definidas que hace necesario una estricta atención en el momento de realizar operaciones que contemplen factores como inventarios, tipo de producto, materiales necesarios, transporte a emplear, lugar de almacenamiento y gestión del producto. Por ello es indispensable que la distribución de las vacunas se lleve a cabo de manera eficiente, para asegurar que lleguen en óptimas condiciones a los puntos de entrega, teniendo en cuenta las **características de la vacuna**, como su conservación que debe ser entre 2 - 8 °C (Ortega et al., 2002), siendo el caso de las vacunas de Sinovac, Astrazeneca, Janssen y Moderna (por 30 días después de salir del ultracongelador). Por el contrario, la vacuna producida por Pfizer Inc y BioNTech debe transportarse y almacenarse en condiciones de ultracongelación a temperaturas inferiores a -70°C y su administración debe realizarse en un tiempo inferior a 6 días en temperaturas de refrigeración (Tan, 2021). A su vez, las vacunas modernas desarrolladas contra COVID-19 están diseñadas bajo métodos como (Castiblanco, 2021):

1. **Vectores virales** (vacunas AstraZeneca o Johnson&Johnson): que utilizan una versión inofensiva de un virus diferente llamado vector para enseñarle al cuerpo o sistema inmune a identificar el virus y defenderse contra el mismo.
2. **Material genético - ARN mensajero** (vacunas Pfizer o Moderna): transportan las instrucciones genéticas del virus para que las células produzcan el antígeno o anticuerpo y entrenar al sistema inmune para combatir el virus.
3. **Virus inactivo** (Sinovac): en un virus de inoculación, donde el sistema inmunológico lo reconoce y produce anticuerpos, contiene un coadyuvante utilizado habitualmente en muchas otras vacunas (como las que se administran contra la hepatitis B y la antitetánica) (Hospital San Juan De Dios, 2021).

Como resultado de la investigación, la Figura 1 muestra un diagrama de barras donde se representa la cantidad de veces que se citó cada factor crítico en los 29 artículos, siendo la logística de distribución y transporte la de mayor consideración con un 55% sobre los demás factores.

Figura 1. Diagrama de barras de los resultados de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

Dadas las características de la problemática objeto de estudio, se tendrán en cuenta 3 factores críticos de los siete identificados en la revisión sistemática de la literatura, siendo estos: **almacenamiento, control de inventarios y logística de distribución y transporte**, se excluyen los factores de seguridad, trazabilidad y sistema de control del producto, cadena de frio y características de la vacuna.

CAPITULO 2. MODELO DE TOMA DE DECISIONES

En el capítulo que se presenta a continuación, se formulan dos modelos matemáticos de optimización que representarán la distribución de vacunas Covid-19 en el departamento del Valle del Cauca, dadas las características específicas del problema, se considerará implementar modelos que consideren decisiones de transporte e inventario.

Los modelos matemáticos formulados consisten en un conjunto de puntos de demanda y un conjunto de depósitos desde el cual se les atenderá, buscando determinar el conjunto de rutas de distribución, la cantidad de producto a enviar a nodo de demanda y los niveles de inventario que se deben mantener para cada instante de tiempo dentro de un horizonte de planificación (Saltos & Aceves, 2012).

Después de realizar el análisis de la literatura y considerando que el objetivo del trabajo consiste en la minimización de los costos totales de la logística de distribución de vacunas en el Valle del Cauca, se decidió implementar la modelación matemática, debido a que brinda soluciones de alta calidad, teniendo en cuenta diferentes variables, parámetros y restricciones. En este caso, para el presente problema se decidió plantear dos modelos, el primero donde se implementa una demanda agregada de vacunas y en el segundo, se consideran la demandan por los cinco tipos de vacunas y las órdenes pendientes.

Para ambos modelos mencionados anteriormente, se van a considerar los siguientes **supuestos**:

- Durante el proceso de distribución de vacunas no se afecta la cadena de frío.
- La localización de los cuartos fríos por cada zona representa los depósitos regionales.
- Se distribuyen solo cinco tipos de vacunas desde el depósito regional hacia el municipal.
- Se asume que cada depósito municipal cuenta con una flota de transporte suficiente para apoyar todo el proceso de distribución de vacunas.
- La flota de vehículos para la distribución es homogénea y propia.
- En el modelo 2 solo se consideran órdenes pendientes en los depósitos municipales.
- Cada instante de tiempo t es equivalente a 28 días.
- Al iniciar el modelo se asume que se cuenta con un inventario inicial y se considerarán 12 periodos de tiempo.
- Cada depósito municipal está asignado a un único depósito regional con base en los lineamientos de la Secretaría de Salud del Valle del Cauca.

MODELO 1. DEMANDA AGREGADA

Definición de conjuntos

Principales

DEP : Conjuntos de depósitos regionales indexado por i .

PSM : Conjunto de puntos de salud municipal indexado por j .

TIM : Conjunto de periodos de tiempo indexado por t .

Subconjuntos

$PSD\{DEP\}$

$\subseteq$ *PSM*: Conjunto puntos salud municipal j asignados a cada depósito regional.

$DPM\{PSM\}$

$\subseteq DEP$: Conjunto depósitos regionales i que pertenecen a cada punto salud municipal j .

Parámetros:

d_{jt} = Demanda de vacunas para cada depósito municipal j en el instante de tiempo t .

IR_i = Inventario inicial de vacunas en cada depósito regional i .

IM_j = Inventario inicial de vacunas en cada depósito municipal j .

C_i = Costo de transporte desde el depósito central hacia el depósito regional i .

Co_{ji} = Costo de recolección desde el depósito municipal j hacia el depósito regional i .

DC_t = Disponibilidad de vacuna en el depósito central en el instante de tiempo t .

Cm_i = Costo de mantenimiento del inventario de vacunas en el depósito regional i .

Cmm_j = Costo de mantenimiento del inventario de vacunas en el depósito municipal j .

Variables de decisión

X_{it} = Cantidad de vacunas desde depósito central hacia el depósito regional i en el tiempo t .

Y_{jit} = Cantidad de vacunas que el depósito municipal j debe recoger en el depósito regional i en el tiempo t .

NR_{it} = Nivel de inventario de vacuna en el depósito regional i en el instante de tiempo t .

NM_{jt} = Nivel de inventario de vacuna en el depósito municipal j en el instante de tiempo t .

Función objetivo

$$\begin{aligned} Z_{min} = & \sum_{i \in DEP} \sum_{t \in T} C_i * X_{it} + \sum_{j \in DEP} \sum_{i \in PSD[j]} \sum_{t \in T} 2 * Co_{ji} * Y_{jit} \\ & + \sum_{i \in DEP} \sum_{t \in T} Cm_i * NR_{it} + \sum_{j \in PSM} \sum_{t \in T} Cmm_j * NM_{jt} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$IR_i + X_{it} - \sum_{j \in DPSD[i]} Y_{jit} = NR_{it} ; \forall i \in DEP, t \in T | t = 1 \quad (2)$$

$$NR_{it-1} + X_{it} - \sum_{j \in PSD[i]} Y_{jit} = NR_{it} ; \forall i \in DEP, t \in T | t > 1 \quad (3)$$

$$IM_j + \sum_{i \in DPM[j]} Y_{jit} - d_{it} = NM_{jt} ; \forall j \in PSM, t \in T | t = 1 \quad (4)$$

$$NM_{jt-1} + \sum_{i \in DPM[j]} Y_{jit} - d_{it} = NM_{jt} ; \forall j \in PSM, t \in T | t > 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in DEP} X_{it} \leq DC_t ; \forall i \in DEP, t \in T \quad (6)$$

$$Y_{jit} \leq NR_{it} ; \forall j \in PSM, i \in PSD[j], t \in T | t = 1 \quad (7)$$

$$Y_{jit} \leq NR_{it-1} ; \forall j \in PSM, i \in PSD[j], t \in T | t > 1 \quad (8)$$

$$X_{it}, Y_{jit}, NR_{it}, NM_{jt} \geq 0 ; \forall i \in DEP, j \in PSM, t \in T \quad (9)$$

$X_{it}, Y_{jit}, NR_{it}, NM_{jt} \in \text{Enteros}$

La función objetivo está representada en la ecuación (1), donde el primer factor de la función contempla los costos de transporte de la cantidad de vacunas a enviar desde el depósito central hacia el depósito regional, el segundo factor estima los costos de recolección de la cantidad de vacunas a recoger por el depósito municipal al depósito regional, adicionalmente se multiplica por dos, debido a que se realiza un viaje de ida y vuelta. El tercer factor considera los costos de mantener el nivel de inventario de vacunas en el depósito regional y, finalmente el cuarto factor incluye los costos de mantener el nivel de inventario de vacunas en el depósito municipal, teniendo como resultado la minimización de los costos totales de logística en la distribución de vacunas (costos / mes).

La ecuación (2) representa el balance de inventario de vacunas en cada depósito regional para un periodo de tiempo igual a 1. La ecuación (3) tiene en cuenta los periodos de tiempo superiores a 1 para el balance de inventario de las vacunas en el depósito regional. Por otro lado, la ecuación (4) garantiza el balance de inventario de vacunas en cada depósito municipal para el primer periodo de tiempo. La ecuación (5) toma en consideración los periodos de tiempo superiores a 1 para el balance de inventario de las vacunas en el depósito municipal. La ecuación (6) asegura que la cantidad de vacunas a enviar del depósito central al regional sea menor o igual que la disponibilidad de vacunas en el depósito central para cada periodo de tiempo. La ecuación (7) proporciona la cantidad de vacunas a recoger por los depósitos municipales hacia los regionales considerando que debe ser menor o igual al nivel de inventario en los depósitos regionales para cada periodo de tiempo. La ecuación (8) asigna la cantidad de vacunas a recoger por los depósitos municipales a los depósitos regionales teniendo en cuenta que el nivel de

inventario debe ser mayor o igual a la cantidad a recoger y, para finalizar, la ecuación (9) garantiza la no negatividad de las variables de decisión y su naturaleza entera.

MODELO 2. DEMANDA DESAGREGADA POR TIPO DE VACUNA Y CONSIDERACIÓN ÓRDENES PENDIENTES

Definición de conjuntos

Principales

DEP : Conjuntos de depósitos regionales indexado por i .

PSM : Conjunto de puntos de salud municipal indexado por j .

TIM : Conjunto de periodos de tiempo indexado por t .

PROD : Conjunto de tipos de vacuna indexado por p .

Subconjuntos

$PSD\{DEP\}$

$\subseteq PSM$: Conjunto puntos salud municipal j asignados a cada depósito regional.

$DPM\{PSM\}$

$\subseteq DEP$: Conjunto depósitos regionales i que pertenecen a cada punto salud municipal j .

Parámetros:

d_{pjt} = Demanda de vacunas p para cada depósito municipal j en el instante de tiempo t .

IR_{pi} = Inventario inicial de vacunas p en cada depósito regional i .

IM_{pj} = Inventario inicial de vacunas p en cada depósito municipal j .

C_i = Costo de transporte desde el depósito central hacia el depósito regional i .

Co_{ji} = Costo de recolección desde el depósito municipal j hacia el depósito regional i .

DC_{pt} = Disponibilidad de vacuna p en el depósito central en el instante de tiempo t .

Cm_{pi} = Costo de mantenimiento del inventario de vacunas p en el depósito regional i .

Cmm_{pj} = Costo de mantenimiento del inventario de vacunas p en el depósito municipal j .

$Cpen_{pj}$ = Costo de órdenes pendientes de vacunas p en el depósito municipal j .

Variables de decisión

X_{pit} = Cantidad de vacunas p desde depósito central hacia el depósito regional i en el tiempo t .

Y_{pjti} = Cantidad de vacunas p que el depósito municipal j debe recoger en el depósito regional i en el tiempo t .

NR_{pit} = Nivel de inventario de vacuna p en el depósito regional i en el instante de tiempo t .

NM_{pjt} = Nivel de inventario de vacuna p en el depósito municipal j en el instante de tiempo t .

W_{pjt} = Cantidad órdenes pendientes de vacuna p en el depósito municipal j en el instante de tiempo t .

Función objetivo

$$\begin{aligned}
 Z_{min} = & \sum_{p \in PROD} \sum_{i \in DEP} \sum_{t \in T} C_i * X_{pit} + \sum_{p \in PROD} \sum_{j \in DEP} \sum_{i \in PSD[j]} \sum_{t \in T} 2 * Co_{ji} * Y_{pjti} \\
 & + \sum_{p \in PROD} \sum_{i \in DEP} \sum_{t \in T} Cm_{pi} * NR_{pit} \\
 & + \sum_{p \in PROD} \sum_{j \in PSM} \sum_{t \in T} Cmm_{pj} * NM_{pjt} \\
 & + \sum_{p \in PROD} \sum_{j \in PSM} \sum_{t \in T} Cpen_{pj} * W_{pjt}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Sujeto a:

$$IR_{pi} + X_{pit} - \sum_{\substack{j \in DPSD[i] \\ \in T | t = 1}} Y_{pjti} = NR_{pit} ; \forall p \in PROD, i \in DEP, t \tag{11}$$

$$NR_{pit-1} + X_{pit} - \sum_{\substack{j \in PSD[i] \\ \in T | t > 1}} Y_{pjti} = NR_{pit} ; \forall p \in PROD, i \in DEP, t \tag{12}$$

$$IM_{pj} + W_{pjt} + \sum_{\substack{i \in DPM[j] \\ \in PSM, t \in T | t = 1}} Y_{pjti} - d_{pit} = NM_{pjt} ; \forall p \in PROD, j \tag{13}$$

$$NM_{pjt-1} + W_{pjt} + \sum_{i \in DPM[j]} Y_{pjit} - d_{pit} = NM_{pjt} + W_{pjt-1}; \forall p \in PROD, j \in PSM, t \in T | t > 1 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in DEP} X_{pit} \leq DC_{pt}; \forall p \in PROD, i \in DEP, t \in T \quad (15)$$

$$Y_{pjit} \leq NR_{pit}; \forall p \in PROD, j \in PSM, i \in PSD[j], t \in T | t = 1 \quad (16)$$

$$Y_{pjit} \leq NR_{pit-1}; \forall p \in PROD, j \in PSM, i \in PSD[j], t \in T | t > 1 \quad (17)$$

$$W_{pjt} = 0; \forall p \in PROD, j \in PSM, t \in T | t = T \quad (18)$$

$$X_{pit}, Y_{pjit}, NR_{pit}, NM_{pjt}, W_{pjt} \geq 0; \forall p \in PROD, i \in DEP, j \in PSM, t \in T \quad (19)$$

$$X_{pit}, Y_{pjit}, NR_{pit}, NM_{pjt}, W_{pjt} \in \text{Enteros}$$

La función objetivo está representada en la ecuación (10), donde el primer factor de la función contempla los costos de transporte de la cantidad y el tipo de vacunas a enviar desde el depósito central hacia el depósito regional, el segundo factor estima los costos de recolección de la cantidad de vacunas a recoger por el depósito municipal al depósito regional, adicionalmente se multiplica por dos, debido a que se realiza un viaje de ida y vuelta. El tercer factor considera los costos de mantener el nivel de inventario de vacunas en el depósito regional. El cuarto factor incluye los costos de mantener el nivel de inventario de vacunas en el depósito municipal, y finalmente el quinto factor constituye la cantidad de órdenes pendientes en los depósitos municipales y el costo de estas, teniendo como resultado la minimización de los costos totales de logística en la distribución de vacunas (costos / mes).

La ecuación (11) representa el balance de inventario de vacunas en cada depósito regional para un periodo de tiempo igual a 1, considerando los tipos de vacuna. La ecuación (12) tiene en cuenta los periodos de tiempo superiores a 1 para el balance de inventario de las vacunas en el depósito regional. Por otro lado, la ecuación (13) garantiza el balance de inventario por tipo de vacuna en cada depósito municipal para el primer periodo de tiempo. La ecuación (14) toma en consideración los periodos de tiempo superiores a 1 para el balance de inventario de las vacunas en el depósito municipal. La ecuación (15) asegura que la cantidad de vacunas a enviar del depósito central al regional sea menor o igual que la disponibilidad de vacunas en el depósito central para cada periodo de tiempo y tipo de vacuna. La ecuación (16) proporciona la cantidad de vacunas a recoger por los depósitos municipales hacia los regionales considerando que debe ser menor o igual al nivel de inventario en los depósitos regionales para cada periodo de tiempo y tipo de vacuna. La ecuación (17) asigna la cantidad de vacunas a recoger por los depósitos

municipales a los depósitos regionales teniendo en cuenta que el nivel de inventario debe ser mayor o igual a la cantidad a recoger. La ecuación (18) garantiza que al final del periodo de planeación las órdenes pendientes sean igual a cero, es decir, no haya cantidad de vacunas pendientes por entregar a cada depósito municipal, y, para finalizar, la ecuación (19) garantiza la no negatividad de las variables de decisión y su naturaleza entera.

CAPITULO 3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección, se realizará la validación de los modelos propuestos en el capítulo 2, basándose en la distribución actual de vacunas en el departamento del Valle del Cauca, la cual consta de cinco zonas como se evidenció en la Tabla 1 y en cada una de ellas existe un depósito regional, que abastecen en total a 35 depósitos municipales.

Para los modelos solo se van a considerar 41 municipios del departamento, se excluye la ciudad de Buenaventura, debido a que es un distrito especial y se abastece directamente desde el Ministerio de Salud. De acuerdo con los parámetros planteados para el desarrollo del modelo, se estimó la información a ingresar:

Demanda (d_{jt})

Con base en la información de las vacunas asignadas al departamento del Valle del Cauca extraídas de (Datos abiertos, 2021) se puede observar la cantidad distribuida desde febrero de 2021 hasta febrero de 2022 por cada tipo de vacuna (Ver Tabla 6).

Para el cálculo real de la demanda de vacunas por cada depósito municipal, se consultó la cantidad de habitantes del Valle del Cauca en general y de cada municipio, posteriormente se calcula el 70% de las personas que recibirán dosis, luego ese resultado es multiplicado por dos, estimando que se aplicarán 2 dosis por individuo, teniendo como resultado la demanda total. Después se procedió a estimar la proporción que representa cada municipio en el departamento considerando la cantidad de habitantes. Finalmente, la proporción obtenida se multiplica por las vacunas asignadas en el mes para determinar la demanda mensual (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Demanda mensual de acuerdo con la cantidad de habitantes

MES	ASTRAZENECA	JANSSEN	MODERNA	PFIZER	SINOVAC	TOTAL
Febrero						
Marzo	24559	0	0	48094	228871	301524
Abril	86226	0	0	179116	151726	417067
Mayo	0	0	0	230785	355858	586643
Junio	106797	26035	0	416150	148645	697625

Julio	76536	95475	255267	70788	126946	625013
Agosto	136086	0	64958	189841	22661	413546
Septiembre	174377	49502	29261	52555	78397	384092
Octubre	202941	88096	379885	125488	155309	951719
Noviembre	0	0	121537	0	90204	211742
Diciembre	220010	103405	167428	58990	166108	715941
Enero	55003	167208	36962	10726	116606	386503
Febrero	0	4400	49282	378610	14301	446594

Fuente: Elaboración propia.

Inventario inicial (IR_i , IM_j)

En el caso del inventario inicial para cada uno de los depósitos de los modelos se asume que la cantidad demandada de vacunas por cada municipio en el mes de febrero será el inventario inicial.

Costo de transporte (C_t) y de recolección (Co_{jt})

Para el cálculo del costo de transporte y recolección se tuvo en cuenta el costo de los peajes, los kilómetros a recorrer, el precio del galón de Diesel por el recorrido y la depreciación del vehículo mensual. Como se puede observar en la *Tabla 4* y *Tabla 5*.

El vehículo que se va a implementar para el transporte de vacunas entre los depósitos es una ambulancia Nissan Frontier 4x4, la cual tiene una capacidad de 20 galones y recorre aproximadamente 35 kilómetros por galón.

Ilustración 3. Vehículo a emplear en la distribución de vacunas



Fuente: (Nissan Colombia, n.d.)

Como se observa en la *Tabla 4* se calcula el precio del galón por kilómetros a recorrer, este precio fue de \$8.884,00 pesos colombianos, dato tomado del 24 de enero de 2022. Adicionalmente, para calcular el consumo de combustible se estimó

la distancia en kilómetros que existe entre cada depósito por medio de la herramienta Google Maps ®. Conociendo la distancia, el costo del galón de Diesel y el rendimiento del vehículo con respecto a la relación Galón/km se calcula el costo total por recorrido.

Tabla 4. Costo de transporte desde el depósito central hacia el regional.

Depósito regional	Peajes	Km	Galón x km	Vehículo mes	Total mes
Cartago	\$ 45.800,00	182	\$ 53.304,00	\$ 1.138.888,89	\$ 1.237.992,89
Tuluá	\$ 36.400,00	94,5	\$ 26.652,00	\$ 1.138.888,89	\$ 1.201.940,89
Buga	\$ 27.100,00	68	\$ 17.768,00	\$ 1.138.888,89	\$ 1.183.756,89
Palmira	\$ 18.200,00	29,3	\$ 8.884,00	\$ 1.138.888,89	\$ 1.165.972,89
Jamundí	\$ -	24,4	\$ 8.884,00	\$ 1.138.888,89	\$ 1.147.772,89
TOTAL					\$ 5.937.436,44

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Costo de recolección desde los depósitos municipales hacia los regionales.

Zona	Costo mensual de recolección
Norte	\$ 13.835.462,67
Centro - Tuluá	\$ 11.604.200,89
Centro - Buga	\$ 5.747.748,44
Suroriente	\$ 4.591.091,56
Suroccidente	\$ 4.617.743,56
Total	\$ 40.396.247,11

Fuente: Elaboración propia.

Disponibilidad (DC_t)

Para el cálculo de la disponibilidad en el depósito central, se tomó el valor de la cantidad de vacunas asignadas mensualmente al departamento del Valle del Cauca (Ver *Tabla 6*).

Tabla 6. Vacunas distribuidas departamento Valle del Cauca 2021-2022.

MES	TIPO DE VACUNA					TOTAL MES
	ASTRAZENECA	JANSEN	MODERNA	PFIZER	SINOVAC	
feb, 2021				9882	16858	26740
mar, 2021	26790			52464	249666	328920
abr, 2021	94060			195390	165511	454961
may, 2021				251754	388190	639944
jun, 2021	116500	28400		453960	162150	761010

jul, 2021	83490	104150	278460	77220	138480	681800
ago, 2021	148450		70860	207090	24720	451120
sept, 2021	190220	54000	31920	57330	85520	418990
oct, 2021	221380	96100	414400	136890	169420	1038190
nov, 2021			132580		98400	230980
dic, 2021	240000	112800	182640	64350	181200	780990
ene, 2022	60000	182400	40320	11700	127200	421620
feb, 2022		4800	53760	413010	15600	487170
TOTAL VACUNA	1180890	577850	1151180	1518030	1807315	6235265

Fuente: (Datos abiertos, 2021)

Costo de mantenimiento del inventario en los depósitos regionales (Cm_i) y municipales (Cmm_j)

Para el mantenimiento del inventario de las vacunas, se deben de tener en cuenta los equipos necesarios para su correcta preservación dentro de los depósitos tanto central, regional y municipal, dada la información de (Secretaría Departamental de Salud del Valle del Cauca, 2021) se pudo obtener el inventario con el que cuenta cada municipio del Valle del Cauca excluyendo al distrito especial de Buenaventura. (Ver **ANEXO 3**).

Tabla 7. Equipos para mantenimiento de inventario

Equipo necesario	Costo unitario	Precio Kw/mes	Depreciación mensual
Congelador horizontal ICH 11	\$ 2.700.000,00	\$ 99.619,99	\$ 15.000,00
Ultracongelador Dw86l338j Haier	\$ 58.980.000,00	\$ 1.087.862,40	\$ 307.187,50
Termo GYOSTYLE E004-032	\$ 1.015.410,00	\$ -	\$ 7.051,46
Termo ultracongelación TOPIHEALTH VC46	\$ 1.200.000,00	\$ -	\$ 8.333,33
Caja Térmica AICB-243S	\$ 3.332.000,00	\$ -	\$ 23.138,89
Refrigerador BIOBASE BPR-5V1000	\$ 7.177.248,00	\$ 282.038,40	\$ 39.873,60
Pilas de refrigeración	\$ 8.000,00	\$ -	\$ 83,33
Enfriador de unidad de almacen HeatCraft	\$ 145.562.146,00	\$ 926.697,60	\$ 606.508,94
Computador Portátil HACER	\$ 4.199.000,00	\$ 22.663,80	\$ 43.739,58

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la información de los equipos necesarios, se calculó el consumo de energía mensual partiendo de el voltaje y los amperios requeridos por cada componente, adicionalmente se realizó la depreciación mensual de acuerdo con los años de vida útil (Ver Tabla 7).

Asimismo, las vacunas deben contar con una adecuada manipulación y vigilancia, para asegurar que los biológicos se encuentren en correctas condiciones en el momento de su distribución o aplicación al público en general, para esto, se consideró el personal especializado de acuerdo con las necesidades de los depósitos, como se evidencia en la Tabla 8.

Tabla 8. Costo total mensual talento humano

DEPÓSITO MUNICIPAL	Talento humano	\$ 3.592.407,00
	Auxiliar enfermería	\$ 1.130.586,00
	Jefe de enfermería	\$ 2.461.821,00
DÉPOSITO REGIONAL	Talento humano	\$ 4.803.648,00
	Auxiliar enfermería	\$ 1.130.586,00
	Jefe de enfermería	\$ 2.461.821,00
	Técnico en sistemas	\$ 1.211.241,00
DEPÓSITO CENTRAL	Talento humano	\$ 12.745.083,00
	Auxiliar enfermería	\$ 2.261.172,00
	Jefe de enfermería	\$ 2.461.821,00
	Ingeniero en sistemas	\$ 3.141.920,00
	Especialista en salud pública	\$ 4.880.170,00

Fuente: Elaboración propia.

Además, se incluye el costo mensual de la conectividad de internet, ya que se necesita para llevar la trazabilidad del producto durante toda la cadena de distribución.

Tabla 9. Costos de conectividad

Conectividad	Costo mensual
Internet fibra óptica 400 megas	\$ 120.990,00
Internet fibra óptica 500 megas	\$ 149.990,00
Internet fibra óptica 900 megas	\$ 258.990,00

Fuente: Elaboración propia.

Costo de órdenes pendientes ($C_{pen_{pj}}$)

Para el cálculo de las ordenes pendientes se consideraron los costos unitarios de recolección de cada depósito municipal al depósito regional asignado y el de las horas extras que debe realizar el personal del depósito para las jornadas de vacunación realizadas por fuera del horario establecido en el momento que se reciban las vacunas pendientes. Los costos por cada tipo de vacuna en cada depósito municipal se pueden evidenciar en la Tabla 10.

Tabla 10. Costos de ordenes pendientes

MUNICIPIO	ASTRAZENECA	JANSSEN	MODERNA	PFIZER	SINOVAC
25	\$ 37.843,27	\$ 37.843,27	\$ 37.843,27	\$ 37.843,27	\$ 37.843,27
26	\$ 37.882,03	\$ 37.882,03	\$ 37.882,03	\$ 37.882,03	\$ 37.882,03
27	\$ 38.832,09	\$ 38.832,09	\$ 38.832,09	\$ 38.832,09	\$ 38.832,09
28	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00
29	\$ 38.650,18	\$ 38.650,18	\$ 38.650,18	\$ 38.650,18	\$ 38.650,18
30	\$ 38.331,89	\$ 38.331,89	\$ 38.331,89	\$ 38.331,89	\$ 38.331,89
31	\$ 37.642,49	\$ 37.642,49	\$ 37.642,49	\$ 37.642,49	\$ 37.642,49
32	\$ 38.101,68	\$ 38.101,68	\$ 38.101,68	\$ 38.101,68	\$ 38.101,68
33	\$ 38.242,99	\$ 38.242,99	\$ 38.242,99	\$ 38.242,99	\$ 38.242,99
34	\$ 37.975,26	\$ 37.975,26	\$ 37.975,26	\$ 37.975,26	\$ 37.975,26
35	\$ 39.073,50	\$ 39.073,50	\$ 39.073,50	\$ 39.073,50	\$ 39.073,50
36	\$ 38.680,68	\$ 38.680,68	\$ 38.680,68	\$ 38.680,68	\$ 38.680,68
37	\$ 37.632,13	\$ 37.632,13	\$ 37.632,13	\$ 37.632,13	\$ 37.632,13
38	\$ 37.918,27	\$ 37.918,27	\$ 37.918,27	\$ 37.918,27	\$ 37.918,27
39	\$ 38.072,19	\$ 38.072,19	\$ 38.072,19	\$ 38.072,19	\$ 38.072,19
40	\$ 37.846,96	\$ 37.846,96	\$ 37.846,96	\$ 37.846,96	\$ 37.846,96
41	\$ 37.734,03	\$ 37.734,03	\$ 37.734,03	\$ 37.734,03	\$ 37.734,03
42	\$ 38.507,26	\$ 38.507,26	\$ 38.507,26	\$ 38.507,26	\$ 38.507,26
43	\$ 38.033,72	\$ 38.033,72	\$ 38.033,72	\$ 38.033,72	\$ 38.033,72
44	\$ 37.700,75	\$ 37.700,75	\$ 37.700,75	\$ 37.700,75	\$ 37.700,75
45	\$ 37.918,38	\$ 37.918,38	\$ 37.918,38	\$ 37.918,38	\$ 37.918,38
46	\$ 37.630,63	\$ 37.630,63	\$ 37.630,63	\$ 37.630,63	\$ 37.630,63
47	\$ 37.921,84	\$ 37.921,84	\$ 37.921,84	\$ 37.921,84	\$ 37.921,84
48	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00
49	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00
50	\$ 37.987,00	\$ 37.987,00	\$ 37.987,00	\$ 37.987,00	\$ 37.987,00
51	\$ 37.849,22	\$ 37.849,22	\$ 37.849,22	\$ 37.849,22	\$ 37.849,22
52	\$ 37.682,14	\$ 37.682,14	\$ 37.682,14	\$ 37.682,14	\$ 37.682,14
53	\$ 37.976,66	\$ 37.976,66	\$ 37.976,66	\$ 37.976,66	\$ 37.976,66
54	\$ 37.975,43	\$ 37.975,43	\$ 37.975,43	\$ 37.975,43	\$ 37.975,43
55	\$ 37.523,61	\$ 37.523,61	\$ 37.523,61	\$ 37.523,61	\$ 37.523,61
56	\$ 37.577,07	\$ 37.577,07	\$ 37.577,07	\$ 37.577,07	\$ 37.577,07
57	\$ 37.576,07	\$ 37.576,07	\$ 37.576,07	\$ 37.576,07	\$ 37.576,07
58	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00
59	\$ 37.619,72	\$ 37.619,72	\$ 37.619,72	\$ 37.619,72	\$ 37.619,72
60	\$ 37.670,58	\$ 37.670,58	\$ 37.670,58	\$ 37.670,58	\$ 37.670,58
61	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00	\$ 50.038,00
62	\$ 38.210,34	\$ 38.210,34	\$ 38.210,34	\$ 38.210,34	\$ 38.210,34
63	\$ 38.246,34	\$ 38.246,34	\$ 38.246,34	\$ 38.246,34	\$ 38.246,34
66	\$ 37.491,02	\$ 37.491,02	\$ 37.491,02	\$ 37.491,02	\$ 37.491,02

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por los modelos de programación matemática formulados.

3.1. RESULTADOS

Los modelos matemáticos se desarrollaron con el lenguaje de programación matemática AMPL a través del entorno de desarrollo académico AMPL IDE empleando el solver GUROBI 9.1.1. Dicha evaluación se realizó en un equipo con procesador Intel(R) Core(TM) i3-7020U CPU @ 2.30GHz, con 4 GB de Memoria RAM, disco duro de 1TB y sistema operativo Windows 10 Home Single de 64 Bits, para obtener los resultados se implementó en la plataforma NEOS Server for Optimization, dado que el EDI académico de AMPL se limita a 500 variables y restricciones..

Para la programación del modelo, se asignó un valor numérico a cada municipio del Valle del Cauca, con el fin de facilitar su identificación durante la modelación y los análisis de resultados como se muestra en las Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11. Asignación numérica depósito regional

Depósito regional	Nº
Zona Norte	20
Zona Centro - Tuluá	21
Zona Centro - Buga	22
Zona Suroccidente	23
Zona Suroriente	24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Asignación numérica depósito municipal

Depósito municipal	Nº	Depósito municipal	Nº	Depósito municipal	Nº	Depósito municipal	Nº
Alcalá	25	Versalles	36	Trujillo	47	Palmira	58
Ansermanuevo	26	Zarzal	37	Tuluá	48	Pradera	59
Argelia	27	Andalucía	38	Buga	49	Dagua	60
Cartago	28	Bolívar	39	Calima	50	Jamundí	61
El Águila	29	Bugalagrande	40	Ginebra	51	La Cumbre	62
El Cairo	30	Caicedonia	41	Guacarí	52	Vijes	63
La Unión	31	El Dovio	42	Restrepo	53	Yumbo	66
La Victoria	32	Riofrío	43	Yotoco	54		
Obando	33	Roldanillo	44	Candelaria	55		
Toro	34	San Pedro	45	El Cerrito	56		
Ulloa	35	Sevilla	46	Florida	57		

Fuente: Elaboración propia.

MODELO 1

Para dar solución a la minimización de los costos totales de distribución de vacunas, se emplearán los costos unitarios de las variables descritas anteriormente, después de 5 iteraciones simplex, la función objetivo para la validación tiene como resultado un costo de **\$ 2.353.536.895,50** durante el horizonte de planeación enmarcado en 12 periodos o meses.

En la Tabla 13 se encuentran los resultados de la cantidad de vacunas que se van a enviar desde el depósito central hacia los depósitos regionales (X_{it}) para doce instantes de tiempo siendo estos los meses comprendidos entre marzo de 2021 y febrero de 2022.

Tabla 13. Resultado X_{it}

X_{it} = Cantidad de vacunas desde depósito central hacia el depósito regional i en el tiempo t.					
	20	21	22	23	24
1	47602	75100	25062	66323	32734
2	26686	28523	26927	69997	37631
3	51833	69013	34322	88742	48895
4	54909	71018	35116	89946	51668
5	44378	55715	27381	69433	41657
6	32996	42830	21194	54354	31060
7	50219	71926	36262	95801	47680
8	53828	62258	30050	73891	50201
9	33976	49984	25318	67381	32338
10	47966	59110	28936	72892	44956
11	33721	44765	22250	57474	31801
12	21991	23846	11332	27105	20412

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 14 se puede evidenciar el nivel de inventario de las vacunas en el depósito regional (NR_{it}) para doce periodos de tiempo, se visualiza que para cada instante de tiempo en cada depósito regional existirá un nivel de inventario de vacunas que va ligado a la cantidad que se recibe del depósito central y del nivel de inventario inicial, este se implementará para completar la cantidad necesaria para suplir la demanda de los depósitos municipales de la zona para los próximos instantes de tiempo, también se observa que para $t=12$ no se cuenta con un nivel de inventario final debido a que la cantidad de vacunas disponibles se enviaron en su totalidad a los depósitos municipales, por lo tanto para ese periodo no habrán costos asociados al mantenimiento de inventario.

Tabla 14. Resultados NR_{it}

NR_{it} = Nivel de inventario de vacuna en el depósito regional i en el instante de tiempo t.					
	20	21	22	23	24
1	17989	31471	9669	31766	13073
2	6151	6253	16344	44682	18569
3	22948	37691	19436	53135	22082
4	20559	33768	17413	47604	19783
5	13603	22343	11521	31498	13090
6	12634	20751	10701	29254	12158
7	31306	51419	26515	72488	30124
8	6965	11440	5899	16127	6702
9	23550	38680	19946	54530	22661
10	12714	20882	10768	29438	12234
11	14690	24128	12442	34015	14136
12	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15 se encuentran los resultados de la cantidad de vacunas que los depósitos municipales deben recoger en cada depósito regional (Y_{jit}), para los doce periodos de tiempo, considerando la asignación establecida a priori por la secretaría de salud departamental del Valle del Cauca de los depósitos municipales con relación a los regionales. Este resultado depende del nivel de inventario en el depósito regional para el periodo anterior y la demanda actual, ya que estos son factores que definen la cantidad disponible de vacunas para suplir la demanda de los depósitos municipales.

Finalmente, en la Tabla 16 se encuentra el nivel de inventario de las vacunas en el depósito municipal (NM_{jt}), para cada uno de los instantes de tiempo, para $t=1$ solo el 10% de los depósitos municipales cuenta con nivel de inventario y el 90% restante utilizó toda la cantidad disponible de biológicos, por lo que para $t=2$ únicamente el 5% de los depósitos cuenta con nivel de inventario al final del periodo.

A partir del periodo 3, considerando que en el 100% de los municipios no existe nivel de inventario, se puede asumir que para los próximos periodos de tiempo se deben transportar una mayor cantidad de vacunas, debido al aumento del 40,7% de la demanda, por lo tanto, se incurrirá en mayores costos de transporte.

Tabla 15. Resultados Y_{jit}

Y_{jit} = Cantidad de vacunas que el depósito municipal j debe recoger en el depósito regional i en el tiempo t.												
Depósito municipal	Depósito regional											
	20											
	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10	t=11	t=12
25	1441	2170	3053	3630	3252	2152	1999	4953	1102	3726	2011	2324
26	1320	1988	2796	3325	2979	1971	1831	4536	1009	3412	1842	2129
27	435	655	921	1095	981	649	603	1494	332	1124	607	701
28	17988	17989	6151	22948	20559	13603	12634	31306	6965	23550	12714	14690
29	499	751	1057	1257	1126	745	692	1715	382	1290	696	805
30	673	1014	1426	1696	1520	1005	934	2314	515	1741	940	1086
31	2769	4169	5864	6973	6247	4134	3839	9513	2116	7156	3863	4464
32	894	1346	1894	2252	2018	1335	1240	3073	684	2311	1248	1442
33	740	1115	1568	1865	1671	1106	1027	2544	566	1914	1033	1194
34	1107	1666	2344	2787	2497	1652	1535	3803	846	2860	1544	1784
35	368	555	780	928	831	550	511	1266	282	952	514	594
36	487	733	1031	1227	1099	727	675	1673	372	1259	680	785
37	2905	4373	6151	7315	6554	4336	4027	9979	2220	7507	4053	4683
21												
38	1224	1843	2592	3083	2762	1827	1697	4206	936	3164	1708	1973
39	942	1418	1995	2372	2126	1406	1306	3237	720	2435	1314	1519
40	1429	2152	3026	3599	3224	2133	1981	4910	1092	3693	1994	2304
41	2014	3031	4264	5071	4543	3006	2792	6918	1539	5204	2809	3246
42	574	865	1216	1447	1296	857	796	1973	439	1485	801	926
43	993	1496	2104	2502	2242	1483	1378	3413	759	2568	1386	1602
44	2213	3332	4686	5573	4993	3304	3068	7603	1691	5719	3088	3568
45	1224	1843	2592	3082	2761	1827	1697	4205	935	3163	1708	1973
46	2953	4446	6253	7436	6662	4408	4094	10145	2257	7632	4120	4760
47	1225	1844	2594	3085	2763	1828	1698	4208	936	3165	1709	1975
48	31471	31471	6253	37691	33768	22343	20751	51419	11440	38680	20882	24128
22												
49	9669	9669	16344	19436	17413	11521	10701	26515	5899	19946	10768	12442
50	1084	1632	2295	2730	2445	1618	1503	3724	828	2801	1512	1747
51	1421	2140	3010	3580	3207	2122	1971	4884	1087	3674	1983	2292
52	2331	3509	4936	5869	5259	3479	3232	8007	1781	6024	3252	3757
53	1095	1649	2320	2759	2472	1635	1519	3764	837	2831	1529	1766
54	1098	1653	2325	2765	2477	1639	1522	3772	839	2838	1532	1770
23												
55	5928	8926	12555	14930	13376	8850	8220	20367	4531	15322	8271	9557
56	3899	5870	8257	9818	8797	5820	5406	13395	2980	10076	5440	6285
57	3924	5908	8310	9882	8853	5858	5441	13481	2999	10141	5475	6326
58	21099	31766	44682	53135	47604	31498	29254	72488	16127	54530	29438	34015
59	3062	4611	6485	7712	6909	4572	4246	10521	2341	7915	4273	4937
24												
60	2458	3700	5204	6189	5545	3669	3407	8443	1878	6351	3429	3962
61	8896	3073	18569	22082	19783	13090	12158	30124	6702	22661	12234	14136
62	777	1170	1646	1957	1754	1160	1078	2670	594	2009	1084	1253
63	743	1119	1574	1872	1677	1110	1031	2554	568	1921	1037	1198
66	8683	13073	18389	21867	19591	12963	12040	29832	6637	22441	12115	13999

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultados NM_{jt}

NM_{jt} = Nivel de inventario de vacuna en el depósito municipal j en el instante de tiempo t.												
Depósito municipal	Instante de tiempo											
	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10	t=11	t=12
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	8876	13146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	16504	25442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	1951	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	128	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

MODELO 2

Con el fin de solucionar el problema de la minimización de costos totales de distribución de vacunas, utilizando los costos unitarios de las variables descritas para el modelo en mención, tras 5 iteraciones simplex, se obtuvo como resultado para la función objetivo un costo de **\$ 5.056.989.425.141,6** durante el horizonte de planeación enmarcado en 12 periodos o meses.

Los resultados del modelo 2 se presentan en la *Tabla 17*, donde se puede evidenciar el comportamiento que tienen las variables en el rango de tiempo comprendido del modelo, también en como los parámetros y restricciones influyen en la cantidad de vacunas a enviar por el depósito central y recoger por los municipales, también la importancia que esto tiene con respecto al nivel de inventario y sus costos asociados.

Tabla 17. Resultados modelo 2

Variable	Definición	Resultado
X_{it}	Cantidad de vacunas que se van a enviar desde el depósito central hacia los depósitos regionales	Ver resultado
Y_{jit}	Cantidad de vacunas que los depósitos municipales deben recoger en cada depósito regional	Ver resultado
NR_{it}	Nivel de inventario de las vacunas en el depósito regional	Ver resultado
NM_{jt}	Nivel de inventario de las vacunas en el depósito municipal	Ver resultado
W_{pjt}	Cantidad de ordenes pendientes de vacunas para cada depósito municipal	Ver resultado

Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de vacunas a enviar del depósito central a los depósitos regionales depende de la disponibilidad de cada tipo de vacuna en el depósito central, como también la demanda de los regionales y municipales. Por otra parte, el nivel de inventario de las vacunas en el depósito regional se comportará dependiendo de la cantidad de vacunas que el depósito central envíe para cada periodo de tiempo. La cantidad de vacunas a recoger de cada depósito municipal al depósito regional va sujeta a la cantidad de vacunas que el depósito central envíe y la demanda en el depósito municipal. El nivel de inventario en los depósitos municipales se define de acuerdo con la cantidad de vacunas que quedan después de recoger en el depósito regional y suplir la demanda del depósito municipal. Finalmente, la cantidad de ordenes pendientes se define como la cantidad de vacunas que no fueron entregadas en la fecha establecida al depósito municipal, por lo que estas se verán reflejadas en un periodo de tiempo posterior.

De acuerdo con lo anterior, se observa que los componentes del modelo que más inciden los resultados obtenidos son el nivel de inventario y la demanda para cada uno de los depósitos. Por lo que se decide evaluar diferentes escenarios con dichos componentes como se observará posteriormente.

3.2. ESCENARIOS

Para observar el comportamiento de la función objetivo y la viabilidad del modelo se decidió realizar modificaciones de los modelos originales, dichas instancias se corrieron con los 41 municipios, donde 35 corresponden a depósitos municipales, 5 a depósitos regionales y 1 es el depósito central, cada municipio cuenta con un vehículo para el transporte de las vacunas, donde ya se han asignado los equipos, recursos y personal para el mantenimiento del inventario, además se consideran periodos de tiempo de 28 días cada uno.

En los escenarios que se modelaron, se varió el nivel de inventario y la demanda, a partir de incrementos y reducciones en un 25% de la cantidad.

3.2.1. Escenarios nivel de inventario

MODELO 1

Como se evidencia en la Tabla 18, el valor de la función objetivo varía dependiendo del nivel de inventario de vacunas que poseen los depósitos, se observa que el costo mínimo se obtiene cuando se incrementa en un 25% el nivel de inventario, esto dado que al paso de los instantes de tiempo se ve disminuida la cantidad de vacunas a enviar del depósito central y de igual forma la cantidad a recoger por los depósitos municipales, lo que hace esta disminución se vea reflejada en los costos de transporte y recolección, como también en los costos totales logísticos que presentaron una reducción de \$1.807.928,3 comparando el escenario original con el de menor costo.

Al incrementarse el nivel de inventario, la cantidad a enviar mensualmente va a disminuir, debido a que se cuenta con suficiente inventario para suplir la demanda, lo que conllevaría a no incurrir en unos costos elevados de transporte, al analizar el otro escenario, donde el nivel de inventario es reducido en un 25%, los depósitos no van a poseer suficientes vacunas y tendrán que incurrir en mayores costos de transporte y adicionalmente el costo de mantener inventario.

Tabla 18. Escenarios nivel de inventario modelo 1

ESCENARIOS NIVEL DE INVENTARIO	
Original	\$ 2,353,536,895.5

Incrementando el 25%	\$ 2,351,728,967.2
Disminuyendo 25%	\$ 2,355,335,941.3

Fuente: Elaboración propia.

MODELO 2

La Tabla 19 muestra el comportamiento de la función objetivo dependiendo de las variaciones realizadas para el nivel de inventario de 5 tipos de vacunas en 12 periodos de tiempo, se puede observar que el valor óptimo se obtiene cuando se incrementa en un 25% el nivel de inventario, ya que como se mencionó anteriormente al transportar y recoger una menor cantidad de vacunas los costos totales logísticos se ven disminuidos, en este caso representan una reducción de \$3.667.675.315,89.

Tabla 19. Escenarios nivel de inventario modelo 2

ESCENARIOS NIVEL DE INVENTARIO	
Original	\$ 5.056.989.425.141,6
Incrementando el 25%	\$ 5.053.321.749.825,7
Disminuyendo 25%	\$ 5.060.695.813.612,8

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Escenarios demanda

MODELO 1

Para este escenario se evaluó el modelo realizando diferentes cambios a la demanda y como ésta afecta directamente el resultado de la función objetivo, como se puede observar en la Tabla 20, al disminuir en un 25% la demanda, se obtiene el mínimo costo total logístico, esto debido a que los costos de transportar y recoger vacunas se reducirán, por otro lado, la demanda y el nivel de inventario tienen una relación directamente proporcional, asimismo, los costos y el nivel de inventario se redujeron en un 25% teniendo una disminución de \$590.258.158,4 entre el escenario original y el escenario óptimo.

Tabla 20. Escenarios demanda modelo 1

ESCENARIOS DEMANDA	
Original	\$ 2,353,536,895.5
Incrementando el 25%	\$ 2,945,747,799.6
Disminuyendo 25%	\$ 1,763,278,737.1

Fuente: Elaboración propia.

MODELO 2

En la Tabla 21 se evidencian los resultados de la función objetivo al realizar cambios en la demanda de los 5 tipos de vacunas, donde el mínimo costo se obtiene cuando

se disminuye la demanda en un 25% representando una reducción de \$1.311.526.573.949,9 en los costos totales logísticos al final de los 12 periodos de tiempo.

Al incrementarse la demanda, la cantidad de vacunas a enviar va a ser mayor, lo que incurrirá en unos costos de transporte más elevados, y además, al contar con ordenes pendientes se tendrá demanda insatisfecha y será necesario incurrir en transporte para recoger las vacunas pendientes, caso contrario de lo que pasaría cuando la demanda disminuye.

Tabla 21. Escenarios demanda modelo 2

ESCENARIOS DEMANDA	
Original	\$ 5.056.989.425.141,6
Incrementando el 25%	\$ 6.404.636.531.137,5
Disminuyendo 25%	\$ 3.745.462.851.191,7

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar el comportamiento de los dos modelos en los diferentes escenarios que se evaluaron se puede observar que los costos totales logísticos del modelo 2 son mucho más elevados, esto considerando que los costos de mantener inventario en este modelo se comportan dependiendo del tipo de vacuna, además se consideran las órdenes pendientes para los depósitos municipales que igualmente generan un costo adicional, mientras que en el modelo 1 para los 12 instantes de tiempo que se evaluaron se toma una demanda agregada sin discriminar el tipo de vacuna a distribuir.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente proyecto se evidenció un problema logísticamente complejo dentro de la logística hospitalaria, que es la distribución de vacunas en el departamento del Valle del Cauca, la cual se desarrolla mediante la red de carreteras que es el primer mecanismo de movilidad para la distribución en todos los departamentos del territorio nacional. El departamento cuenta con 42 municipios, de los cuales dos son distritos especiales, Buenaventura es excluido del modelo y Cali es asignado como depósito central, además, se cuenta con 5 depósitos regionales y 35 municipales, donde se simuló la distribución de vacunas.

La importancia de este proyecto radica en llevar a cabo una vacunación efectiva, ya que al considerar los efectos ocasionados por el COVID-19 tanto en la salud pública como en el país, se vio la necesidad de contar con una vacuna para prevenir la propagación de la enfermedad, y así, evitar que las personas se contagien de forma severa, disminuyendo la posibilidad de transmisión, por lo que, es preciso implementar un plan logístico que garantice un adecuado transporte y

almacenamiento de vacunas para alcanzar la inmunidad y evaluar los costos asociados.

Para el desarrollo del primer objetivo se realizó una revisión bibliográfica con el fin de analizar los factores críticos propuestos por diferentes autores que afectan el proceso de distribución de vacunas. Como resultado de la revisión se definieron los factores más relevantes para el desarrollo de los modelos, estos hallazgos fueron primordiales para la ejecución de los objetivos posteriores, debido a que permitió identificar aspectos importantes en la elaboración de los modelos y cuales eran semejantes a la distribución actual en el departamento del Valle del Cauca.

Posteriormente del desarrollo del primer objetivo se formularon dos modelos de toma de decisiones que consideran los factores críticos asociados a la distribución de vacunas. Como punto de partida se definieron los supuestos que se implementaron en los modelos con el fin de dar continuidad en la ejecución del problema, se determinaron las variables de decisión, parámetros y restricciones, asimismo la interacción entre estas y su efecto en la función objetivo.

En el último objetivo se realizó la validación de los modelos mediante la plataforma NEOS Server, donde se evaluaron los resultados obtenidos y el comportamiento de las variables con respecto al caso aplicado en el departamento del Valle del Cauca, adicionalmente para analizar los modelos se implementaron escenarios donde se varió el inventario y la demanda. Como resultado del escenario original para el modelo 1 se obtuvo un costo total logístico para los 12 periodos de tiempo de **\$2.353.536.895,5**, para el modelo 2 el costo total logístico fue de **\$5.056.989.425.141,6** estos costos se emplearon como punto de comparación de las demás variaciones que se realizaron.

Para la evaluación de los modelos se decidió utilizar la plataforma NEOS Solvers ya que la aplicación de AMPL restringía la cantidad de variables y restricciones a utilizar, y, dada la complejidad del problema son modelos extensos.

En primera instancia se evalúa un modelo con demanda agregada, es decir, sin discriminar el tipo de vacuna para evaluar el comportamiento de la función objetivo y demás variables. Posteriormente se evalúa un modelo más completo donde se emplea una demanda desagregada por tipo de vacuna, en este caso, los costos de mantenimiento de inventario se comportan de acuerdo con el tipo de vacuna y el almacenamiento que necesita y, además se decide agregar un costo por órdenes pendientes en los depósitos municipales, ya que, como se observa en la actualidad, muchas veces los pedidos de vacunas no alcanzan a enviarse en el tiempo estipulado para las jornadas de vacunación o se envía una cantidad menor a la solicitada, por lo que, es necesario considerar el costo asociado a las ordenes faltantes.

Para finalizar, se recomienda para futuros trabajos considerar el escenario donde la demanda supere la disponibilidad y se deba asignar un porcentaje de distribución equitativo para la población con el fin de abastecer a un mayor número de personas,

también se recomienda considerar órdenes pendientes para los depósitos regionales, además estudiar la viabilidad de realizar un esquema de distribución con nodos de origen y destino coincidentes bajo los lineamientos del Multi Depot Inventory Routing Problem multi-echelon para enviar los biológicos desde el depósito central hacia los regionales y después hacia los municipales considerando los diferentes tipos de vacunas distribuidas en el territorio colombiano, sus características térmicas y estrategias de transporte multimodal. De igual forma, considerar elementos de naturaleza estocástica como la demanda de los depósitos municipales y niveles de inventario.

REFERENCIAS

- Allin, S., Mossialos, E., McKee, M., & Holland, W. (2004). *Making decisions on public health: a review of eight countries, European Observatory on Health Systems and Policies*. World Health Organization.
- Asmar, S. (2021). *Así funciona la logística para el transporte de las vacunas covid-19 en todo el país*. La Republica.
- Batero-Manso, D. F., & Orjuela-Castro, J. A. (2018). Inventory Routing Problem in Perishable Supply Chains: A Literature Review. *Ingeniería*, 23(2), 117–143. <https://doi.org/10.14483/23448393.12691>
- Bloomberg Businessweek. (2020, December 11). *Devastada por el COVID , Latinoamérica no está lista para la vacuna*. <https://www.elfinanciero.com.mx/bloomberg-businessweek/devastada-por-el-covid-latinoamerica-no-esta-lista-para-la-vacuna>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2020). *Así fue el webinar “La Importancia de la cadena de frío para el manejo de vacunas en preparación para contingencia COVID-19.”* <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-Farmaceutico-Bogota-region/Noticias/20202/Abril-2020/Asi-fue-el-webinar-La-Importancia-de-la-cadena-de-frio-para-el-manejo-de-vacunas-en-preparacion-para-contingencia-COVID-19>
- Cámara de Comercio de Cali. (2020). *El Desafío de la Reactivación Económica: Un Valle que se Atreve Informe #10* (p. 15).
- Castiblanco, C. (2021). *¿Cuál es la efectividad de las vacunas actuales contra COVID-19?* Alcaldía de Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/salud/cual-es-la-efectividad-de-las-vacunas-contra-covid-19>
- Corey, B. L., Mascola, J. R., Fauci, A. S., & Collins, F. S. (2020). A strategic approach to COVID-19 vaccine R&D. *Science*, 368(6494), 2–5.
- CRCVC. (2016). *Reporte de Competitividad Logística*.
- Datos abiertos. (2021). *Asignación de dosis de vacuna contra COVID-19*. <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/Asignacion-de-dosis-de-vacuna-contra-COVID-19/sdvb-4x4j>
- Díaz, V. (2019). *Factores que afectan la logística de transporte en el Valle del Cauca*. 1–12.
- Fauci, A. S., Lane, H. C., & Redfield, R. R. (2020). Covid-19 — Navigating the Uncharted. *New England Journal of Medicine*, 382(13), 1268–1269. <https://doi.org/10.1056/nejme2002387>
- Garcés, A., & Gutiérrez, S. (2012). Seguridad y eficacia de las vacunas antivirales

de uso humano. *Informe Medico*, 14(1), 9–18.

Gobernación Valle del Cauca. (2016). *Plan departamental de seguridad vial del Valle del Cauca 2016-2021*.

Gómez, V. (2016). TALLER SUB-REGIONAL OPERACIONES DE LA CADENA DE FRÍO, SUMINISTRO Y GESTIÓN DE VACUNAS. *Como Determinar El Factor de Pérdida de Una Vacuna Para Calcular El Volumen Total*.

Hospital San Juan De Dios. (2021). *SINOVAC, eficacia y funcionamiento de la vacuna*. <https://hsdp.gov.co/portal/ley-de-transparencia/2-informacion-de-interes/noticias/sinovac-eficacia-y-funcionamiento-de-la-vacuna/>

James, S., James, C., & Evans, J. (2006). Modelling of food transportation systems – a review. *Int. J. Refrigeration*, 29, 947–957.

Laveriano, W. (2010). Importancia del control de inventarios en la empresa. In *Actualidad empresarial* (p. 198).

Lim, J., Norman, B. A., & Rajgopal, J. (2019). Redesign of vaccine distribution networks. *International Transactions in Operational Research*, 1–26. <https://doi.org/10.1111/itor.12758>

López, J. J. (2021). *Más allá de tener las vacunas, preocupa la logística*. UN Periódico Digital. <https://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/mas-alla-de-tener-las-vacunas-preocupa-la-logistica/>

Ministerio de Salud. (2021a). *Boletín de prensa: La importancia de la vacunación contra el COVID-19*. <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/La-importancia-de-la-vacunación-contra-el-COVID-19.aspx?ID=9423#:~:text=En segundo lugar%2C Álvarez argumentó,de contagio para los demás>

Ministerio de Salud. (2021b). *Decreto 630 de 2021*.

Ministerio de Salud. (2021c). *LINEAMIENTOS TÉCNICOS Y OPERATIVOS PARA LA VACUNACIÓN CONTRA EL COVID-19* Dirección. <https://aplicaciones.msp.gov.ec/salud/archivosdigitales/documentosDirecciones/dnn/archivos/LINEAMIENTOS TÉCNICOS OPERATIVOS PARA LA VACUNACIÓN CONTRA LA INFLUENZA ESTACIONAL Y NEUMOCOCO DE.pdf>

Ministerio de Salud. (2021d, February). *Plan Nacional de Vacunación contra el COVID-19*.

Ministerio de Salud. (2022). *Minsalud fijó nuevas metas del Plan Nacional de Vacunación contra el covid-19*. Boletín de Prensa No 27 de 2022. <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-fijo-nuevas-metas-del-Plan-Nacional-de-Vacunacion-contra-el-covid-19.aspx>

Musamih, A., Jayaraman, R., Salah, K., Hasan, H. R., Yaqoob, I., & Al-Hammadi, Y. (2021). Blockchain-Based Solution for Distribution and Delivery of COVID-19 Vaccines. *IEEE Access*, 9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079197>

- Nissan Colombia. (n.d.). *Desarrollos especiales*.
<https://www.nissan.com.co/servicios/vehiculos-comerciales/experiencia.html>
- OMS. (2021, April 30). *La OMS se incluye la vacuna de moderna contra la COVID-19 en su lista de uso en emergencias*.
- OPS. (2021). *Situación COVID-19 Colombia*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2021, January). *Introducción de la vacuna contra la COVID-19: Orientaciones para determinar los grupos prioritarios y elaborar la microplanificación*.
https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/53250/OPSFPLIMCOVID-19210008_por.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Ortega, P., Astasio, P., Albaladejo, R., Gómez, M. L., de Juanes, J. R., & Domínguez, V. (2002). Cadena del frío para la conservación de las vacunas en los centros de atención primaria de un área de Madrid: mantenimiento y nivel de conocimientos. *Revista Española de Salud Pública*, 76(4), 333–346.
- Peña, O., & Silva, R. (2016). Factores incidentes sobre la gestión de sistemas de inventario en organizaciones venezolanas. *Telos*, 18(2), 187–207.
- Pereira, V., Doria, E., Carvalho JR, B., Neves JR, L., & Silveira JR, V. (2010). Evaluation of temperatures in a refrigerated container for chilled and frozen food transport. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 158–165.
- Portero, A., Pastor, E., Navarro, L., & Lluch, J. A. (2004). *Logística de la Cadena de frío*.
- Purssell, E. (2015). Reviewing the importance of the cold chain in the distribution of vaccines. *British Journal of Community Nursing*, 20(10), 481–486.
<https://doi.org/10.12968/bjcn.2015.20.10.481>
- Rosselli, D. (2020). Covid-19 en Colombia: los primeros 90 días. *Acta Neurológica Colombiana*, 36(2 Supl. 1), 1–6. <https://doi.org/10.22379/24224022287>
- Saltos, R., & Aceves, R. (2012). Optimización del Reabastecimiento de una Red de Cajeros Automáticos con Estimación Difusa de la Demanda. *Revista Tecnológica de La ESPOL*, 25(2), 1–21.
- Secretaría de Salud del Valle del Cauca. (2020). *PLAN DE CONTINGENCIA CADENA DE FRIO ANTE FALLA O INTERRUPCION DE FLUIDO ELECTRICO*.
- Secretaría Departamental de Salud del Valle del Cauca. (2021). *Plan estratégico departamental de vacunación contra Covid-19*. 1–115.
- Sierra Upegui, S., & Ángel Álvarez, B. E. (2018). Factores que influyen en los sistemas logísticos de las empresas. *Revista Ingeniería Industrial UPB*, 6(6), 89–98.
- Solistica. (2021). *Medidas de seguridad que garantizan la integridad de tu mercancía durante su carga y traslado*. <https://blog.solistica.com/medidas-de->

seguridad-que-garantizan-la-integridad-de-tu-mercancia

- Tan, Y. (2021). *Covid: What do we know about China's coronavirus vaccines?* BBC News. <https://www.bbc.com/news/world-asia-china-55212787#:~:text=Moderna's vaccine needs to be,vaccine at such low temperatures.>
- Tseng, Y., Yue, W. ., & Taylor, M. A. . (2005). The Role of Transportation in Logistic. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1657–1672.
- Urrego, C. (2018). Diagnóstico de la cadena de frío en Colombia. *Questionar Investigación Específica*, 6, 37–53.
- Villalobos, J. (2010). Seguridad en la operación del transporte de carga carretero. *Cepal*, 285, 1–8.
- Volonté, G., & Quiroga, P. (2013). Análisis farmacéutico. In *Universidad Nacional de la Plata* (1st ed.). <https://doi.org/10.35537/10915/32503>