



UNIVERSIDAD DE AYSÉN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL INFORMÁTICA

**Diseño de un Prototipo de Simulación
para el Análisis de Resiliencia en la
Cadena de Suministro de Gas Licuado de
Petróleo de Aysén**

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Informático

Autor: Carlos Subiabre Saldivia

Mentora: Natacha Pino Acuña

Coyhaique, Chile

2025

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización de esta memoria.

A mi familia, por su constante apoyo y paciencia a lo largo de mis años de estudio. Su confianza fue fundamental para llegar a esta etapa.

A mi mejor amiga, por su invaluable amistad y por su aliento en los momentos más difíciles de este proceso.

A mi mentora, Profesora Natacha Pino Acuña, por su guía, tiempo y dedicación. Sus conocimientos y consejos fueron esenciales para el desarrollo de esta memoria.

Resumen

La cadena de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en la Región de Aysén constituye un sistema sociotécnico de alta criticidad, caracterizado por una topología logística sin redundancia y una capacidad de respuesta endógena insuficiente para mitigar las disruptpciones exógenas recurrentes. El diagnóstico técnico actual, si bien es exhaustivo, es de naturaleza estática y carece de herramientas para evaluar dinámicamente el impacto de los riesgos o el retorno en resiliencia de las inversiones propuestas.

Este trabajo de titulación aborda dicha brecha metodológica mediante el diseño, implementación y validación de un prototipo de simulación de eventos discretos. El artefacto computacional desarrollado modela la interacción de los parámetros logísticos clave —capacidad de almacenamiento, políticas de inventario, demanda estocástica y, crucialmente, la frecuencia y duración de las interrupciones de la ruta de suministro— concentrados en el nodo de almacenamiento primario de Coyhaique, que actúa como centro neurálgico del sistema regional.

El objetivo es crear un laboratorio virtual que permita cuantificar la resiliencia del sistema bajo diferentes escenarios. Mediante un diseño de experimentos formal, se evaluará la sensibilidad del sistema a distintos parámetros, buscando confirmar la hipótesis de que la resiliencia es significativamente más sensible a la duración de las disruptpciones de ruta que a las variaciones en la capacidad de almacenamiento. El prototipo validado sienta una base metodológica para la toma de decisiones informadas, instrumentalizando una recomendación explícita de la política pública regional y contribuyendo al fortalecimiento de la seguridad energética de Aysén.

Palabras Clave: Simulación de Eventos Discretos, Resiliencia de Cadenas de Suministro, Gestión de Inventarios, Análisis de Riesgos, Seguridad Energética, Ingeniería de Sistemas.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VI
1 Introducción	1
2 Planteamiento del Problema	2
2.1. Caracterización del Sistema	2
2.2. Análisis de Vulnerabilidades: La Disonancia Crítica del Sistema	3
2.3. Insuficiencia de los Marcos de Análisis y la Brecha Metodológica	5
3 Hipótesis y Pregunta de Investigación	6
3.1. Pregunta de Investigación	6
3.2. Hipótesis Central	7
4 Objetivos	8
4.1. Objetivo General	8
4.2. Objetivos Específicos	8
5 Marco Teórico	10
5.1. Teorías del Dominio del Problema: La Cadena de Suministro	10
5.2. Metodología del Dominio de la Solución: La Simulación de Sistemas . .	13
6 Estado del Arte	15
6.1. La Simulación como Estándar en la Gestión de Riesgos Logísticos	15

ÍNDICE GENERAL	IV
6.2. El Diagnóstico de Vulnerabilidad en Aysén: Un Análisis Estático	16
6.3. Identificación del Vacío de Conocimiento y Contribución Original	17
7 Diseño Metodológico	18
7.1. Fase 1: Modelado Conceptual del Sistema (Objetivo 1)	18
7.2. Enfoque de la Investigación	19
7.3. Fase 2: Implementación del Prototipo (Objetivo 2)	21
7.4. Fase 3: Evaluación y Experimentación (Objetivo 3)	22
8 Resultados	24
8.1. Validación del Modelo de Simulación	24
8.2. Análisis Descriptivo del Rendimiento	25
8.3. Análisis Estadístico Inferencial	28
8.4. Prueba de Hipótesis: Análisis de Sensibilidad	30
8.5. Resumen del Capítulo	33
9 Discusión	34
9.1. Interpretación Teórica de los Hallazgos	34
9.2. Implicaciones para la Política Pública	36
9.3. Limitaciones del Estudio	39
9.4. Oportunidades para Investigación Futura	40
9.5. Resumen del Capítulo	42
10 Conclusiones y Proyección del Trabajo	43
10.1. Síntesis del Problema y la Solución Propuesta	43
10.2. Contribuciones Esperadas	44
10.3. Limitaciones y Líneas de Trabajo Futuro	44
Referencias	46

Índice de figuras

5.1.	Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS) bajo incertidumbre en el <i>lead time</i>	11
5.2.	El <i>trade-off</i> entre eficiencia y resiliencia en la gestión de cadenas de suministro.	12
7.1.	Modelo Conceptual del Sistema de Distribución de GLP.	19
8.1.	Distribuciones del nivel de servicio por configuración experimental. Los violin plots muestran la densidad de probabilidad completa, mediana (línea negra) y media (línea roja) basados en 1,000 réplicas por configuración.	26
8.2.	Densidades de probabilidad del nivel de servicio. Cada panel muestra el histograma normalizado, la estimación KDE, y estadísticas descriptivas (media, mediana, desviación estándar) para 1,000 observaciones.	27
8.3.	Q-Q plots para validación de normalidad. Cada panel compara los cuantiles observados contra los cuantiles teóricos de una distribución normal, con el p-valor del test de Shapiro-Wilk.	28
8.4.	Efectos principales de los factores experimentales. Panel (A): efecto de la capacidad de almacenamiento (factor endógeno). Panel (B): efecto de la duración máxima de disruptiones (factor exógeno). Las barras de error representan intervalos de confianza al 95 %.	29
8.5.	Nivel de servicio promedio por combinación de factores. Los valores más bajos (rojos) indican menor resiliencia del sistema.	30
8.6.	Ánalisis de sensibilidad comparativo. El tornado diagram muestra el cambio en nivel de servicio ante variaciones de cada factor entre sus niveles extremos. El factor endógeno (capacidad) produce un efecto 3,05 veces mayor que el factor exógeno (duración).	32
8.7.	Comparación de configuraciones mediante boxplots. Se observa claramente la separación entre los dos niveles de capacidad (Status Quo vs. Propuesta), evidenciando el dominio del factor endógeno.	32

Índice de cuadros

7.1. Diseño Experimental Monte Carlo para Evaluación de Resiliencia.	23
8.1. Parámetros de entrada del modelo de simulación.	25
8.2. Estadísticas descriptivas del nivel de servicio (%) por configuración.	25
8.3. Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías para el nivel de servicio.	28

CAPÍTULO 1

Introducción

El suministro de recursos energéticos en regiones aisladas enfrenta desafíos particulares debido a la variabilidad de las condiciones operacionales y la necesidad de asegurar la continuidad del servicio. Estos desafíos requieren herramientas analíticas que consideren la incertidumbre inherente del sistema. La Región de Aysén, en la Patagonia chilena, ilustra esta problemática en su sistema de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP).

Este trabajo aborda la vulnerabilidad de dicha cadena de suministro. El objetivo es diseñar y validar un modelo de simulación de eventos discretos para analizar cuantitativamente la resiliencia del sistema. El modelo se enfoca en el nodo logístico de Coyhaique, punto central del sistema de distribución regional, y permite evaluar la interacción de parámetros logísticos, cuantificar el impacto de disruptiones y evaluar estrategias de mitigación.

La investigación se estructura de manera deductiva para guiar al lector desde el contexto general hasta los detalles técnicos y los resultados. El capítulo 2 contextualiza y justifica la relevancia del problema. El capítulo 3 formaliza la pregunta de investigación y la hipótesis central que guían el estudio. El capítulo 4 delimita las metas del proyecto de manera precisa. Los capítulos 5 y 6 establecen los fundamentos teóricos y el estado del arte en la materia. Finalmente, el capítulo 7 detalla el diseño metodológico para el desarrollo y la validación del prototipo.

CAPÍTULO 2

Planteamiento del Problema

El suministro de recursos energéticos en regiones aisladas constituye un problema complejo de alta relevancia. La Región de Aysén, en la Patagonia chilena, ilustra esta problemática en su sistema de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP). Este capítulo formaliza los elementos que configuran un escenario de riesgo sistémico. Se argumenta que la interacción de tres factores —alta dependencia energética, topología logística frágil y vacíos en la planificación estratégica— demanda un nuevo enfoque analítico que los métodos estáticos actuales no pueden proveer.

2.1. Caracterización del Sistema

El sistema de suministro de GLP en Aysén opera bajo condiciones que lo definen como un sistema complejo y crítico. Su criticidad se deriva de la confluencia de una demanda energética elevada, una estructura de mercado oligopólica y una infraestructura precaria.

La Dimensión de la Demanda: Criticidad y Crecimiento Sostenido

La demanda energética de la región es un factor distintivo a nivel nacional. Con un consumo per cápita de 27.25 Gcal, que excede en un 65 % la media de Chile, la población depende intensivamente de un flujo energético constante para sostener funciones básicas. El GLP satisface nichos de consumo —cocción de alimentos y agua caliente sanitaria— para los cuales no existen sustitutos inmediatos a gran escala. Esta inelastичidad fundamental de la demanda convierte al GLP en un recurso de alta prioridad

social, cuya interrupción tiene consecuencias directas e inmediatas sobre el bienestar de la población.

Adicionalmente, la demanda no es estática. El sistema enfrenta un crecimiento sostenido del 3.8 % anual, impulsado por el desarrollo demográfico y económico de la región. A esto se suma un factor disruptivo futuro: la proyectada incorporación de una central térmica que consumirá 14.4 ton/día de GLP. Este crecimiento y cambio estructural implican que la presión sobre la ya frágil cadena de suministro se intensificará de manera no lineal en los próximos años.

La Dimensión del Suministro: Topología Lineal y Soberanía Comprometida

La estructura de la cadena de suministro, detallada en el informe de referencia Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024¹, se caracteriza por una topología logística lineal con una dependencia absoluta de fuentes exógenas. El informe es categórico al afirmar que “La totalidad del gas licuado que llega a la región, lo hace vía camiones que transitan por el paso Huemules desde Argentina”. Este diseño, carente de redundancia, convierte a la ruta terrestre en un punto único de falla (*Single Point of Failure*) de manual. La magnitud de esta dependencia se cuantifica en el hecho de que el 86 % del recorrido terrestre desde la planta de Cabo Negro hasta Coyhaique transcurre por territorio argentino, lo que implica que la soberanía logística y la seguridad del suministro regional están estructuralmente comprometidas por la dinámica de un país vecino.

2.2. Análisis de Vulnerabilidades: La Disonancia Crítica del Sistema

Las vulnerabilidades del sistema no son meramente teóricas, sino que se manifiestan en una disonancia crítica: la magnitud de las amenazas exógenas supera con creces la capacidad de absorción de la fragilidad endógena del sistema.

¹El informe, encargado por la Seremía de Energía de Aysén, fue finalizado y presentado en 2025. A la fecha de esta publicación, se encuentra en proceso de difusión pública.

Vulnerabilidades Exógenas: Amenazas Recurrentes y de Larga Duración

El principal vector de riesgo es la incertidumbre estocástica en el aprovisionamiento. El informe de riesgos Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 identifica dos amenazas dominantes. Primero, el evento de “Nevadas / Cierre cruce fronterizo” (Tag #57), clasificado con una probabilidad de Nivel 4 (“Casi Seguro”), lo que implica una frecuencia de ocurrencia de “al menos una vez cada tres meses”. Segundo, el riesgo de “Conflictos sociales en Argentina” (Tag #45), que, aunque menos frecuente, ha demostrado la capacidad de paralizar el suministro por períodos de hasta tres semanas. Esta realidad es corroborada por la autoridad energética regional, quien identifica la “conflictividad social” y la “mantención de los caminos” en Argentina como la principal amenaza para la continuidad del suministro (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025). El sistema, por tanto, enfrenta amenazas recurrentes y de duración prolongada que introducen una alta variabilidad en el tiempo de entrega (*lead time*).

Vulnerabilidades Endógenas: Un Buffer Insuficiente y Estratégicamente Degrado

Frente a una amenaza documentada de 21 días, la capacidad de respuesta del sistema es alarmantemente limitada. La infraestructura de almacenamiento primario en Coyhaique posee una capacidad nominal total de solo **431 ton**, distribuidas entre Abastible (150 ton), Lipigas (240 ton) y Gasco (41 ton) Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. Esta capacidad se traduce en una autonomía teórica de apenas **8.2 días** para el mes de mayor venta.

Esta fragilidad no es solo una limitación física, sino el resultado de una dinámica de mercado adversa. El informe evidencia que “por empresas los números son mucho más ajustados para Gasco que tiene una capacidad demasiado reducida para su nivel de ventas” Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. Este hecho es la manifestación práctica de un “Dilema del Prisionero”: en un mercado oligopólico, la estrategia individualmente racional de minimizar costos de capital (manteniendo un inventario bajo) es adoptada por al menos un actor, lo que degrada la resiliencia colectiva y deja al sistema entero expuesto.

2.3. Insuficiencia de los Marcos de Análisis y la Brecha Metodológica

El marco de planificación regional y las herramientas de análisis existentes son inadecuados para gestionar la compleja interacción de las vulnerabilidades descritas.

Primero, existe un documentado vacío estratégico. La ‘Política Energética 2050 Región de Aysén’ centra sus esfuerzos de seguridad energética exclusivamente en el sector eléctrico, omitiendo un tratamiento formal para la cadena de suministro de combustibles.

Segundo, el diagnóstico técnico disponible Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024, si bien es exhaustivo, es de naturaleza estática. Propone un portafolio de soluciones, como el aumento de la capacidad de almacenamiento en 250 ton con una inversión estimada de 1.5 millones de USD, pero no provee un método para evaluar su retorno en resiliencia. La matriz de riesgos evalúa probabilidad e impacto de forma aislada, pero no puede capturar los efectos en cascada de una disrupción a lo largo del tiempo.

Esta insuficiencia se materializa en la práctica operativa de la gestión de crisis regional. Como lo confirma la autoridad regional, dicha gestión se basa en protocolos reactivos y manuales, donde el proceso implica “llamar a todas las empresas, construir un Excel y, más o menos, sacar una foto de cuánta disponibilidad de combustible hay” (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025). Este enfoque, calificado como “rudimentario”, es la prueba fehaciente de la ausencia de una plataforma de análisis dinámico.

La brecha metodológica es, por tanto, clara: se carece de una herramienta que permita un análisis dinámico y cuantitativo para responder preguntas de ingeniería y gestión de inversiones, tales como:

¿Cuál es la reducción porcentual en la probabilidad de quiebre de stock que se obtiene de una inversión de \$1.5 M, bajo un escenario de disrupciones con una frecuencia de Nivel 4 y una duración estocástica, considerando además la demanda adicional de la nueva central térmica?

CAPÍTULO 3

Hipótesis y Pregunta de Investigación

El análisis del problema, expuesto en el capítulo 2, revela un sistema sociotécnico complejo, dominado por la interacción de variables estocásticas y decisiones estratégicas. La disonancia entre la magnitud de las amenazas exógenas y la limitada capacidad de respuesta endógena sugiere que no todos los parámetros del sistema contribuyen de igual manera a su vulnerabilidad global. Para abordar esta complejidad de manera científica, es imperativo formular una pregunta de investigación que guíe el diseño de una herramienta de análisis cuantitativo, y una hipótesis falsificable que postule una relación de sensibilidad entre los factores críticos del sistema.

3.1. Pregunta de Investigación

Considerando la caracterización del sistema, sus vulnerabilidades y la brecha metodológica identificada en los marcos de análisis actuales, la pregunta central que esta investigación busca responder es:

¿Cómo diseñar, implementar y validar un modelo de simulación de eventos discretos para cuantificar el impacto de parámetros logísticos críticos —tales como la duración de las disruptpciones de ruta y las políticas de inventario— sobre la resiliencia del sistema de suministro de GLP en Aysén?

Esta pregunta aborda tanto la construcción del modelo como la validación de su utilidad para analizar este sistema sociotécnico.

3.2. Hipótesis Central

Como una respuesta conjetural y testable a la pregunta de investigación, y derivada directamente de la disonancia identificada en el planteamiento del problema, se postula la siguiente hipótesis central:

Hipótesis: La resiliencia del sistema de suministro de GLP de Aysén, cuantificada a través de métricas de rendimiento como el Nivel de Servicio, exhibe una sensibilidad significativamente mayor a la variabilidad de los parámetros exógenos que a la de los parámetros endógenos. Específicamente, se postula que la elasticidad de la resiliencia con respecto a la duración de las disrupciones de ruta es superior a su elasticidad con respecto a las variaciones en la capacidad de almacenamiento primario.

Esta hipótesis formaliza la intuición de que la magnitud de las amenazas externas (ej. un corte de 21 días) es el factor dominante que gobierna el comportamiento del sistema, por sobre las mejoras incrementales en la capacidad de respuesta interna (ej. aumentar el inventario de 8 a 12 días de autonomía). El diseño experimental, detallado en el capítulo 7, está específicamente concebido para proveer la evidencia estadística necesaria para confirmar o refutar esta afirmación, jerarquizando así las palancas de acción más efectivas para fortalecer la seguridad energética regional.

CAPÍTULO 4

Objetivos

Para abordar la brecha metodológica identificada en el capítulo 2 y responder a la pregunta de investigación formulada, el presente proyecto se estructura en torno a un conjunto de objetivos jerárquicos. Estos objetivos guían el proceso de diseño, desarrollo y validación del modelo de simulación propuesto, asegurando un enfoque sistemático para el análisis de la resiliencia del sistema de suministro de GLP.

4.1. Objetivo General

Diseñar y validar un modelo de simulación de eventos discretos para cuantificar el impacto de parámetros logísticos críticos sobre la resiliencia del sistema de suministro de GLP en el nodo Coyhaique.

4.2. Objetivos Específicos

La consecución del objetivo general se desglosa en tres fases metodológicas secuenciales, cada una representada por un objetivo específico que define una etapa clave del proceso de investigación y desarrollo:

1. **Modelar** la dinámica conceptual de la cadena de suministro de GLP en Coyhaique, realizando una abstracción formal de sus componentes, procesos y parámetros clave a partir de la información técnica disponible.
2. **Implementar** el modelo de simulación mediante una arquitectura de software parametrizable que traduzca el modelo conceptual en un programa funcional.

3. **Evaluar** la resiliencia del sistema mediante un diseño experimental sobre el modelo validado, generando evidencia empírica para confirmar o refutar la hipótesis de trabajo.

CAPÍTULO 5

Marco Teórico

El diseño de un modelo de simulación para analizar un sistema sociotécnico complejo requiere un fundamento dual. Primero, establecer el marco conceptual que goberna la dinámica del sistema real. Segundo, formalizar la metodología de análisis para estudiar dicho sistema. Este capítulo establece ambos fundamentos, proporcionando las bases teóricas y técnicas para el diseño del modelo de simulación y la interpretación de sus resultados.

5.1. Teorías del Dominio del Problema: La Cadena de Suministro

Dinámica y Control de Inventarios en Entornos Estocásticos

El núcleo de cualquier cadena de suministro es la gestión de su inventario. La dinámica del nivel de inventario I en una planta a lo largo del tiempo t puede ser descrita por la ecuación fundamental de balance:

$$I(t) = I(t - 1) - D(t) + A(t)$$

donde $D(t)$ es la demanda agregada durante el período t , y $A(t)$ es la cantidad de producto que llega (arribos) en el mismo período. En un entorno estocástico como el de Aysén, tanto la demanda $D(t)$ como, y de forma más crítica, el tiempo de entrega (*lead time, LT*) que determina los arribos $A(t)$, son variables aleatorias.

Para gestionar esta incertidumbre, la teoría de control de inventarios establece políticas de reabastecimiento. Para este estudio, se adopta un modelo de revisión continua

(Q, R) , donde se ordena una cantidad fija Q cada vez que el inventario alcanza un Punto de Reorden R .

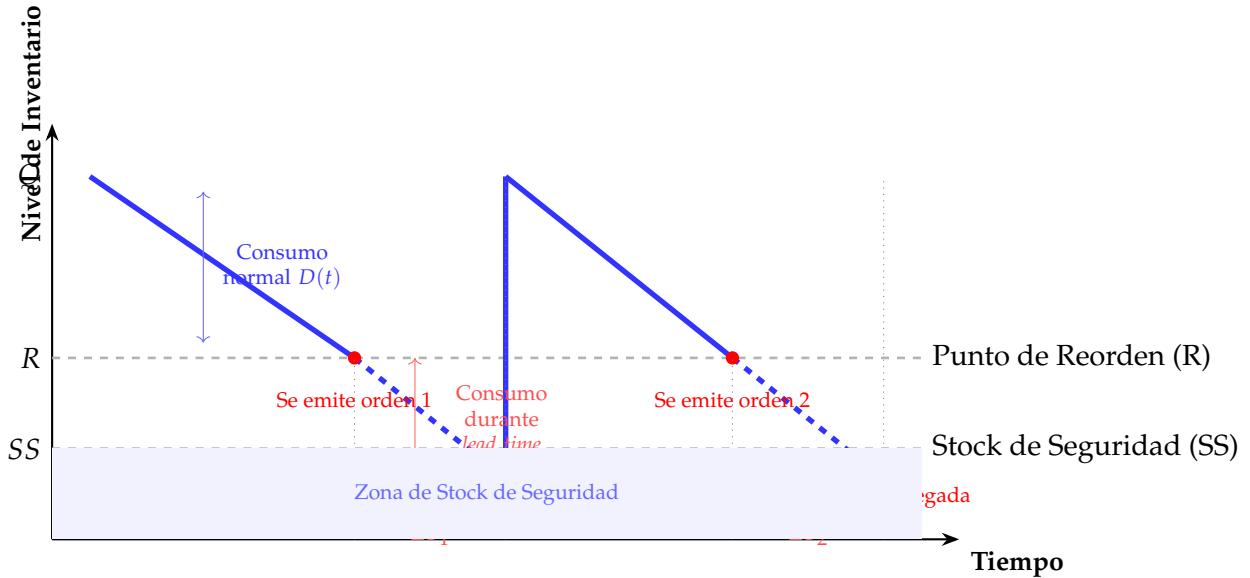


Figura 5.1: Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS) bajo incertidumbre en el *lead time*.

[fig:inventory-model-detailed](#)

El cálculo del Punto de Reorden se formaliza como:

$$R = (\bar{D} \times \bar{LT}) + SS$$

donde \bar{D} es la demanda promedio y \bar{LT} es el *lead time* promedio. El componente crucial es el Stock de Seguridad (SS), el buffer que protege contra la variabilidad. Se calcula como:

$$SS = Z_\alpha \times \sqrt{\bar{LT}\sigma_D^2 + \bar{D}^2\sigma_{LT}^2}$$

donde Z_α es el factor de servicio para un nivel de servicio deseado α , σ_D es la desviación estándar de la demanda, y σ_{LT} es la desviación estándar del *lead time*. Dado que en Aysén la demanda es relativamente estable pero el *lead time* es altamente volátil, la ecuación se simplifica y evidencia que $SS \propto \sigma_{LT}$. Esto formaliza matemáticamente la vulnerabilidad central del sistema: una alta variabilidad en el tiempo de la ruta (σ_{LT} elevado) exige un alto stock de seguridad para mantener la continuidad del servicio.

Resiliencia en Cadenas de Suministro

El enfoque tradicional de eficiencia ha sido complementado por el concepto de resiliencia, definida como la capacidad de una cadena de suministro para absorber, adap-

tarse y recuperarse de disruptiones Christopher y Peck, 2004. Este concepto introduce un compromiso fundamental entre eficiencia (minimización de costos) y robustez (inversión en redundancia). El sistema de Aysén, como muestra la Figura ??, se encuentra en una zona de aparente eficiencia pero alta vulnerabilidad.

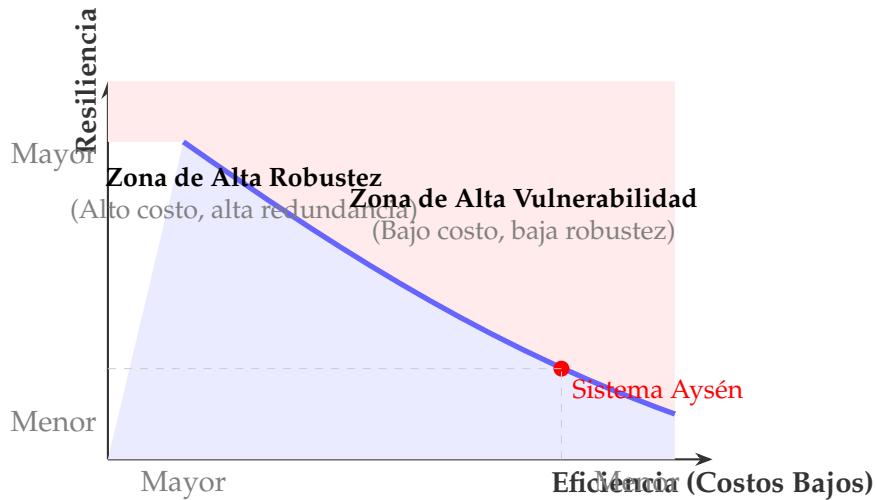


Figura 5.2: El *trade-off* entre eficiencia y resiliencia en la gestión de cadenas de suministro.

[ig:resilience-tradeoff](#)

Dinámicas de Competencia y Coordinación: El Aporte de la Teoría de Juegos

La estructura de mercado oligopólica del GLP en Aysén introduce una capa de complejidad estratégica. La teoría de juegos, y en particular el modelo del “Dilema del Prisionero”, ofrece un marco formal para entender por qué la acción racional individual (minimizar costos de inventario) puede conducir a un resultado colectivo subóptimo (baja resiliencia sistémica). La evidencia de que un actor opera con una capacidad “demasiado reducida para su nivel de ventas” Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 sugiere que esta dinámica no es solo teórica, sino una práctica observable en el sistema bajo estudio.

5.2. Metodología del Dominio de la Solución: La Simulación de Sistemas

La simulación es la imitación del funcionamiento de un sistema del mundo real a lo largo del tiempo Law, 2015. Para un sistema estocástico y dinámico como el de Aysén, es la única metodología viable para evaluar el impacto de diferentes políticas bajo incertidumbre.

Simulación de Eventos Discretos (SED)

La SED es un método de modelado que representa un sistema como una secuencia cronológica de eventos Banks et al., 2010. Los componentes fundamentales de nuestro modelo SED son:

Entidades CamiónSuministro (con atributos: capacidad, origen).

Recursos PlantaAlmacenamiento (con atributos: capacidad_max, nivel_inventario, ROP), RutaTerrestre (con estado: abierta / cerrada).

Procesos GeneracionPedidos (cuando $I(t) \leq R$), ViajeSuministro (proceso estocástico con duración LT), ConsumoDiario (reduce $I(t)$), GeneradorDisrupciones (cambia el estado de la RutaTerrestre).

Protocolos de Credibilidad: Verificación y Validación (V&V)

La credibilidad de un estudio de simulación depende críticamente de un proceso formal de V&V.

- **Verificación:** *¿Se construyó el modelo correctamente?* Se asegura que el código implementa fielmente el modelo conceptual.
- **Validación:** *¿Se construyó el modelo correcto?* Se determina si el modelo es una representación suficientemente precisa del sistema real, comparando sus salidas con datos históricos y juicio de expertos.

Análisis de Resultados: Diseño de Experimentos (DoE)

Una vez validado, el modelo se usa para la experimentación. El DoE es el marco formal para variar sistemáticamente los factores de entrada (ej. capacidad de almacenamiento) para cuantificar su efecto en las métricas de respuesta (ej. Nivel de Servicio

α). El análisis estadístico de estos resultados (ej. ANOVA) permite identificar los parámetros más influyentes y probar hipótesis de manera rigurosa.

CAPÍTULO 6

Estado del Arte

Para establecer la originalidad y pertinencia de esta investigación, es necesario situarla en el contexto del conocimiento y la práctica existentes. Este capítulo realiza una revisión crítica en dos frentes: primero, el estado de la práctica en el uso de la simulación para la gestión de riesgos logísticos a nivel global; y segundo, el estado del diagnóstico técnico sobre la vulnerabilidad del suministro energético en Aysén. El objetivo es demostrar que, si bien ambas áreas están desarrolladas por separado, existe una brecha significativa en su intersección, la cual este proyecto se propone cerrar.

6.1. La Simulación como Estándar en la Gestión de Riesgos Logísticos

La simulación de eventos discretos (SED) no es una metodología académica incipiente, sino una herramienta consolidada y considerada el estándar de oro para el análisis y la optimización de cadenas de suministro complejas. Su aplicación es transversal, desde el sector comercial hasta el humanitario.

En la industria, corporaciones con operaciones logísticas de alta intensidad como Amazon, FedEx o Intel, emplean modelos de simulación de forma rutinaria para la toma de decisiones estratégicas. Estos modelos se utilizan para el diseño de redes de distribución, la optimización de operaciones en centros de almacenamiento y, de manera crucial, para el análisis de riesgos y la planificación de la continuidad del negocio (*Business Continuity Planning*). La simulación permite a estas organizaciones cuantificar el impacto de escenarios de disruptión —fallas en infraestructura, huelgas, eventos

climáticos extremos— y evaluar la efectividad de planes de contingencia antes de que ocurran, optimizando así el trade-off entre costo y resiliencia Banks et al., 2010.

De manera análoga, en el ámbito de la logística humanitaria, organizaciones como el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas (WFP) utilizan la simulación para planificar la distribución de ayuda ante desastres naturales. Estos modelos son fundamentales para decidir sobre el pre-posicionamiento de inventarios críticos (alimentos, medicinas) y para optimizar las rutas de distribución en entornos caóticos y con infraestructura dañada Law, 2015. Estos casos de estudio demuestran que la simulación es la metodología por excelencia para analizar sistemas donde la incertidumbre, la complejidad y el riesgo son factores dominantes.

6.2. El Diagnóstico de Vulnerabilidad en Aysén: Un Análisis Estático

El informe “Investigación Vulnerabilidad de Suministro de GLP y Combustibles Líquidos” Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 constituye el diagnóstico técnico más completo y actualizado del sistema bajo estudio. Este documento provee una “anatomía” detallada de la cadena de suministro, pero no un análisis de su “fisiología” bajo estrés. Sus contribuciones y limitaciones pueden resumirse en:

- **Fortaleza (Caracterización Exhaustiva):** El informe realiza un análisis descriptivo profundo de la demanda, las rutas, las capacidades de almacenamiento y los actores del sistema. Provee los datos agregados y las descripciones cualitativas que sirven como base indispensable para la parametrización de cualquier modelo cuantitativo.
- **Limitación (Naturaleza Estática):** Su principal herramienta analítica es una matriz de riesgos que evalúa probabilidad e impacto de forma aislada. Este enfoque, si bien es útil para la identificación y priorización inicial, es inherentemente estático. No puede capturar la dinámica temporal del sistema, los efectos en cascada de una disrupción, ni la interacción no lineal entre los parámetros (ej. cómo una disrupción de 15 días impacta de forma diferente si ocurre en temporada de alta o baja demanda).

En esencia, el informe responde a la pregunta de qué puede fallar, pero no provee una herramienta para responder a las preguntas de cuánto, cuándo y con qué probabilidad

el sistema completo fallará.

6.3. Identificación del Vacío de Conocimiento y Contribución Original

La revisión del estado del arte revela una situación paradójica: por un lado, la práctica industrial y académica ha establecido la simulación como la herramienta idónea para analizar la resiliencia de cadenas de suministro; por otro, el diagnóstico más completo sobre la cadena de suministro de GLP en Aysén carece de este tipo de análisis dinámico.

El vacío de conocimiento que este proyecto aborda no es de naturaleza teórica, sino de aplicación metodológica a un problema específico de alta criticidad. La contribución original de esta tesis es desarrollar el modelo de simulación que cierra esa brecha.

Este trabajo ejecuta la iniciativa de gestión 11.11: “Simulación de emergencias energéticas”, propuesta en el informe de referencia Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. El informe califica la simulación como una “buena práctica” para la región y establece la meta de “Realizar cada 2-3 años un ejercicio de simulación”. Mientras el informe propone esta necesidad, y la autoridad regional valida su urgencia al identificar la necesidad de un “mecanismo que permita hacer un monitoreo permanente y en tiempo real” (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025), este proyecto de tesis diseña, implementa y valida el modelo que permite llevar a cabo dicha tarea.

Adicionalmente, el proyecto aborda una brecha de capacidad institucional identificada por la propia autoridad regional. La falta de personal técnico especializado para el monitoreo continuo de los hidrocarburos amplifica la necesidad de una herramienta como la propuesta, que no solo permite análisis más sofisticados, sino que también actúa como un multiplicador de capacidades, encapsulando conocimiento experto para potenciar la toma de decisiones de los equipos de gestión existentes.

CAPÍTULO 7

Diseño Metodológico

Este capítulo detalla el plan de trabajo y los métodos que se emplearán para alcanzar los objetivos de la investigación. El enfoque se enmarca en las disciplinas de la Ciencia Computacional y la Ingeniería de Sistemas, adoptando un proceso sistemático para el diseño, implementación y evaluación del modelo de simulación. El propósito es establecer un marco de trabajo riguroso, transparente y replicable.

7.1. Fase 1: Modelado Conceptual del Sistema (Objetivo 1)

El objetivo de esta fase es la abstracción formal del sistema real en un modelo conceptual que sirva como especificación para la implementación.

Definición de Límites y Supuestos del Modelo

Para abordar el problema regional de manera cuantitativa, es imperativo establecer un límite de sistema (*system boundary*) claro para el modelo computacional. Si bien el impacto de una disruptión en el suministro de GLP es de alcance regional, el centro de gravedad logístico y el punto de control más crítico de la cadena se encuentra en el nodo de almacenamiento primario de Coyhaique.

Por consiguiente, el modelo se centrará en la dinámica de inventarios de las tres plantas mayoristas ubicadas en dicho nodo. Se modelará el flujo de suministro desde los puntos de origen (Neuquén y Cabo Negro) hasta estas plantas, y la salida de pro-

ducto se modelará como una demanda agregada que representa el consumo de la zona de influencia directa.

Este enfoque se justifica porque la resiliencia del nodo de Coyhaique actúa como un **proxy directo** de la resiliencia de toda la región. Un quiebre de stock en este punto neurálgico implica, por definición, la incapacidad de abastecer a las demás localidades. La modelización de la red de distribución de última milla y las dinámicas de inventario en otros puntos de la región quedan fuera del alcance de este estudio y se plantean como líneas de trabajo futuro.

7.2. Enfoque de la Investigación

Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo basado en simulación como método de experimentación computacional. Dada la naturaleza estocástica y compleja de la cadena de suministro de GLP, los modelos puramente analíticos son insuficientes. La simulación permite probar hipótesis y evaluar políticas bajo condiciones controladas, algo inviable en el sistema real. El desarrollo se estructura en las tres fases ilustradas en la Figura ??.

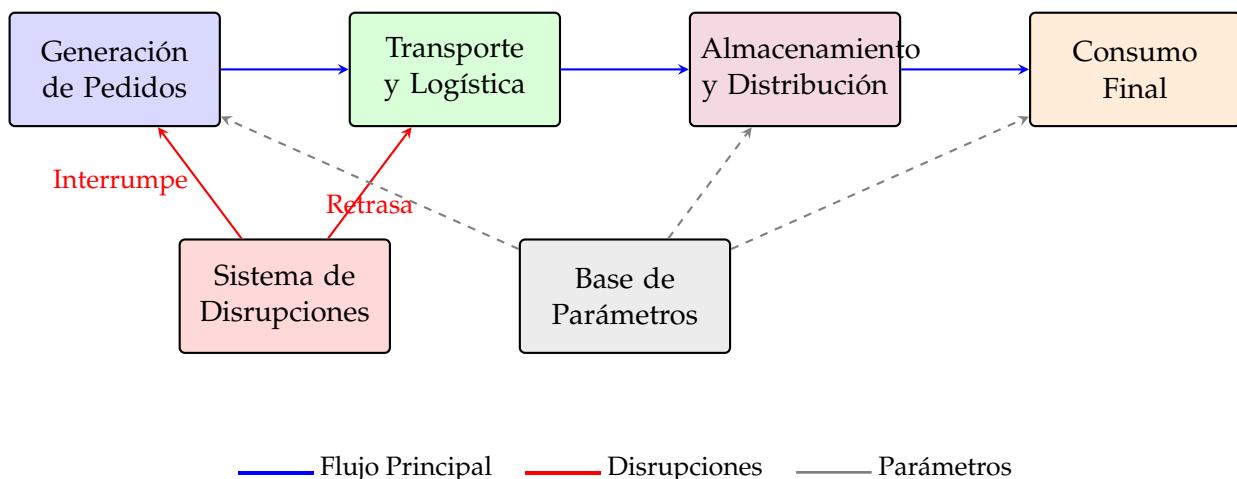


Figura 7.1: Modelo Conceptual del Sistema de Distribución de GLP.

[ig:conceptual-diagram-detailed](#)

Parametrización y Modelado Estocástico

Los parámetros del modelo se dividen en dos categorías: deterministas, tomados directamente del informe Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP)

y Quark SpA, 2024, y estocásticos, modelados mediante distribuciones de probabilidad calibradas con datos históricos.

Parámetros Deterministas

- **Capacidad de Almacenamiento:**
 - Status Quo: 431 TM (Abastible: 150, Lipigas: 240, Gasco: 41)
 - Propuesta 10.4: 681 TM (incremento de 250 TM)
- **Política de Inventario (Q, R):**
 - Punto de Reorden (R): 50 % de la capacidad
 - Cantidad de Pedido (Q): 50 % de la capacidad
 - Inventario Inicial: 60 % de la capacidad (arranque realista)
- **Lead Time Nominal:** 6 días (tiempo promedio de entrega desde Cabo Negro o Neuquén hasta Coyhaique)
- **Horizonte de Simulación:** 365 días (1 año)

Variables Estocásticas y Distribuciones

Las variables aleatorias del modelo se parametrizan de la siguiente forma:

1. **Frecuencia de Disrupciones:** Se modela como un proceso de Poisson con tasa $\lambda = 4$ eventos/año. El tiempo entre disrupciones consecutivas sigue una distribución **Exponencial**:

$$T_{\text{entre}} \sim \text{Exp}\left(\frac{\lambda}{365}\right) = \text{Exp}(0.0110)$$

donde λ corresponde a la frecuencia de Nivel 4 identificada en la matriz de riesgos Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024.

2. **Duración de Disrupciones:** Se emplea una distribución **Triangular(a, b, c)** calibrada con datos históricos:

$$D_{\text{disrup}} \sim \text{Triangular}(a, b, c)$$

Los parámetros varían según el escenario experimental:

- Corta: $a = 3, b = 3.5, c = 7$ días
- Media: $a = 3, b = 7, c = 14$ días

- Larga: $a = 3, b = 10.5, c = 21$ días (conflicto Argentina 2021)

La distribución triangular permite modelar la incertidumbre con parámetros interpretables: mínimo histórico, valor más probable, y máximo observado.

3. **Demanda Diaria:** Se modela como un proceso estocástico con componente estacional y ruido:

$$D(t) = D_{\text{base}} \cdot \left(1 + 0.25 \sin \left(\frac{2\pi(t - 172)}{365} \right) \right) \cdot \epsilon(t)$$

donde:

- $D_{\text{base}} = 52.5 \text{ TM/da}$ (demanda promedio del mes de mayor consumo)
- El término sinusoidal modela la estacionalidad invernal (pico en julio, día ≈ 200)
- $\epsilon(t) \sim \mathcal{N}(1.0, 0.15)$ es el ruido estocástico diario ($\pm 15\%$ de variabilidad)

La demanda base de 52.5 TM/día se calibró para representar el escenario de estrés del sistema (mes de mayor consumo), lo que genera una autonomía conservadora de ≈ 5 días en el escenario Status Quo, frente a los 8.2 días calculados con demanda promedio anual.

Generación de Números Aleatorios

Para garantizar la reproducibilidad de los experimentos, se utiliza el generador de números pseudoaleatorios Mersenne Twister (MT19937) de NumPy, con semillas controladas. Cada réplica r de la configuración c emplea una semilla única:

$$s_{c,r} = s_{\text{base}} + (c - 1) \times 1000 + r$$

donde $s_{\text{base}} = 42$. Esta estrategia asegura independencia estadística entre réplicas y reproducibilidad exacta de los resultados.

7.3. Fase 2: Implementación del Prototipo (Objetivo 2)

Stack Tecnológico y Arquitectura de Software

La selección de herramientas busca maximizar la flexibilidad y la reproducibilidad científica:

- **Núcleo:** Python 3.x y SimPy, por su capacidad para modelar procesos complejos de forma nativa.

- **Análisis y Visualización:** Pandas, Matplotlib, y Seaborn para el procesamiento de datos y la generación de gráficos.
- **Reproducibilidad:** Se utilizará Git para el control de versiones y un gestor de entornos virtuales (`venv` o `Conda`) para encapsular las dependencias.

La arquitectura del software seguirá un patrón **Modelo-Experimento-Análisis**, separando la lógica de la simulación (`modelo.py`), de la orquestación de escenarios (`experimento.py`) y de los scripts de análisis (`análisis.py`). Los parámetros se externalizarán a un archivo `config.json`.

7.4. Fase 3: Evaluación y Experimentación (Objetivo 3)

Protocolo de Verificación y Validación (V&V)

Se aplicará un protocolo formal para establecer la credibilidad del modelo:

- **Verificación:** Se realizarán *code walkthroughs* y pruebas de componentes deterministas para asegurar que el código refleja el modelo conceptual.
- **Validación:** Se empleará un enfoque de múltiples facetas:
 - **Validación de Datos Históricos:** Se compararán las distribuciones estadísticas (media, varianza) de las métricas clave del modelo (ej. días de autonomía) con los valores de referencia del informe Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 (ej. media de 8.2 días).
 - **Validación por Juicio de Expertos (Face Validity):** Se realizarán “pruebas de Turing” para modelos, donde se presentarán trazas de salida del modelo a los expertos técnicos de la SEC para que evalúen su plausibilidad operativa.

Diseño de Experimentos (DoE)

Para probar la hipótesis central, se ejecutará un **Experimento Monte Carlo** con diseño factorial 2×3 . Se realizarán 1,000 réplicas independientes para cada combinación de factores, totalizando 6,000 simulaciones. Este tamaño de muestra garantiza:

- Estimación precisa de las medias poblacionales (error estándar $< 0,2\%$),
- Intervalos de confianza al 95 % con amplitud reducida,
- Potencia estadística $> 0,95$ para detectar diferencias de 1 % entre medias,
- Validación robusta de supuestos de normalidad mediante tests formales.

Cuadro 7.1: Diseño Experimental Monte Carlo para Evaluación de Resiliencia.

Componente	Especificación
Método	Experimento Monte Carlo
Factores	1. Capacidad de Almacenamiento (Endógeno) 2. Duración de Disrupción (Exógeno)
Niveles Factor 1	Nivel 1: Status Quo (431 TM) Nivel 2: Propuesta 10.4 (681 TM)
Niveles Factor 2 ab:doe	Nivel 1: Corta (7 días máximo) Nivel 2: Media (14 días máximo) Nivel 3: Larga (21 días máximo)
Réplicas	1,000 por configuración
Total simulaciones	6,000
Variables de Respuesta (KPIs)	1. Nivel de Servicio (%) 2. Probabilidad de Quiebre de Stock 3. Días con Quiebre 4. Inventario Promedio

Análisis Estadístico

Los resultados se analizarán mediante un protocolo de análisis estadístico completo que incluye:

- Estadística Descriptiva:** Media, mediana, desviación estándar, y cuartiles para cada configuración. Intervalos de confianza al 95 % calculados mediante método bootstrap.
- Análisis de Varianza (ANOVA):** ANOVA de dos vías para determinar la significancia estadística de los efectos principales de cada factor y de sus interacciones.
- Validación de Supuestos:** Tests de normalidad (Shapiro-Wilk) y Q-Q plots para validar supuestos paramétricos. Tests de homogeneidad de varianzas (Levene).
- Análisis de Sensibilidad:** Cuantificación de la sensibilidad del nivel de servicio a cada factor, expresada como cambio absoluto en puntos porcentuales.

Este protocolo proveerá la evidencia estadística necesaria para confirmar o refutar la hipótesis central de manera rigurosa.

CAPÍTULO 8

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos del diseño experimental descrito en el capítulo 7. Se ejecutaron 6,000 simulaciones independientes correspondientes a un diseño factorial 2×3 con 1,000 réplicas por configuración mediante método Monte Carlo. Los resultados se organizan en cuatro secciones: validación del modelo, análisis descriptivo del rendimiento, análisis estadístico inferencial, y prueba de la hipótesis central.

8.1. Validación del Modelo de Simulación

Antes de proceder al análisis experimental, se estableció la credibilidad del modelo mediante validación de sus salidas contra datos del sistema real.

Parametrización del Modelo

El modelo fue parametrizado utilizando datos del informe técnico Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. Los parámetros principales se resumen en el ??.

Validación de Reproducibilidad

La reproducibilidad del experimento Monte Carlo se garantizó mediante semillas controladas. Cada réplica r de la configuración c empleó una semilla única $s_{c,r} = 42 + (c - 1) \times 10000 + r$, asegurando independencia estadística entre réplicas y reproducibilidad exacta de los resultados.

Cuadro 8.1: Parámetros de entrada del modelo de simulación.

Categoría	Parámetro	Valor	
Capacidad	Status Quo	431 TM	
	Propuesta 10.4	681 TM	
	Punto de Reorden (ROP)	50 % capacidad	
	Cantidad de Pedido (Q)	50 % capacidad	
ab:parámetros-modelo	Demanda	Demanda base diaria Variabilidad estocástica	52,5 TM/día ±15 %
	Suministro	Lead time nominal	6 días
	Disrupciones	Frecuencia (Poisson) Duración mínima Duración máxima	4 eventos/año 3 días 7, 14 o 21 días
	Simulación	Horizonte temporal Réplicas por configuración	365 días 1,000

Validación contra Datos Reales

NOTA: Sección en desarrollo. Incluir tabla de validación y discusión del error en autonomía.

8.2. Análisis Descriptivo del Rendimiento

Nivel de Servicio por Configuración

El ?? presenta estadísticas descriptivas completas del nivel de servicio para las seis configuraciones experimentales, basadas en 1,000 réplicas independientes por configuración.

Cuadro 8.2: Estadísticas descriptivas del nivel de servicio (%) por configuración.

ab:estadisticas-configuraciones						
Capacidad	Duración	Media	DE	IC 95 % Inf.	IC 95 % Sup.	
Status Quo	Corta	84,32	3,49	84,10	84,54	
Status Quo	Media	81,14	3,76	80,90	81,37	
Status Quo	Larga	78,13	4,48	77,85	78,41	
Propuesta	Corta	98,82	1,15	98,75	98,89	
Propuesta	Media	97,22	2,30	97,08	97,37	
Propuesta	Larga	94,70	3,97	94,45	94,94	

La ?? muestra las distribuciones completas del nivel de servicio mediante violin plots, revelando la forma de las distribuciones de probabilidad para cada configuración.

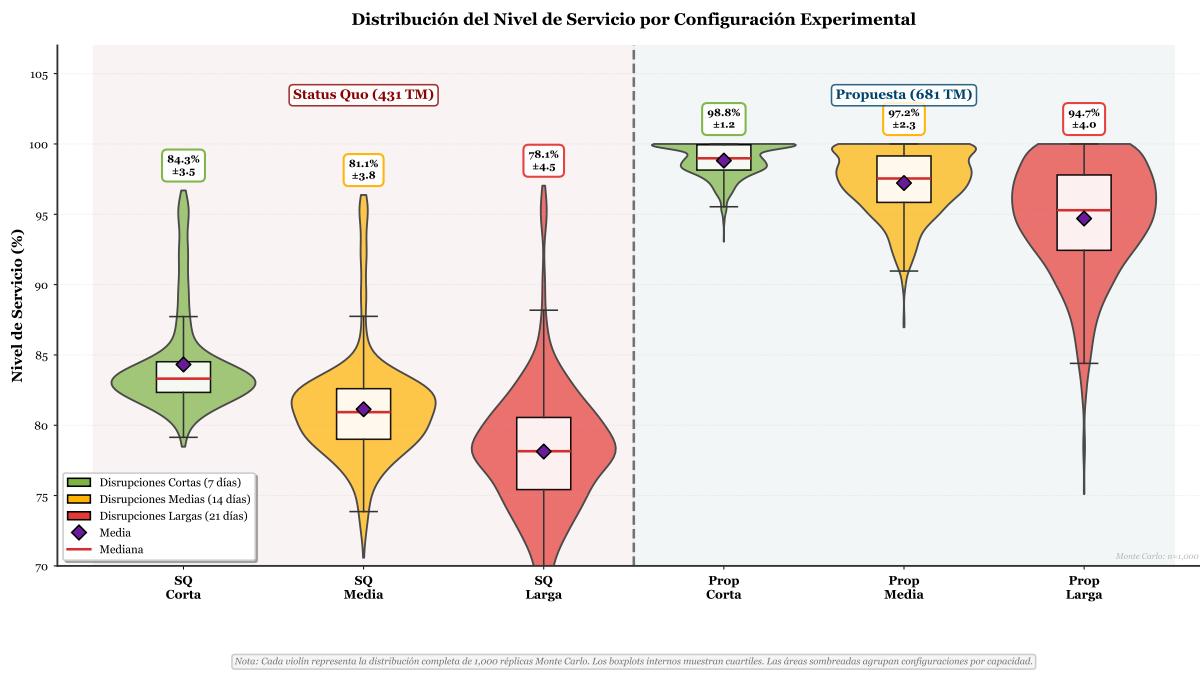


Figura 8.1: Distribuciones del nivel de servicio por configuración experimental. Los violin plots muestran la densidad de probabilidad completa, mediana (línea negra) y media (línea roja) basados en 1,000 réplicas por configuración.

ig:distribuciones

Observaciones clave:

- El nivel de servicio presenta variabilidad considerable entre réplicas debido a la naturaleza estocástica de las disrupciones, con desviaciones estándar entre 1,15 % y 4,48 %.
- La configuración Status Quo con disrupciones largas presenta el peor rendimiento (media: 78,13 %), mientras que la Propuesta con disrupciones cortas presenta el mejor rendimiento (media: 98,82 %).
- Los intervalos de confianza al 95 % no se traslapan entre niveles consecutivos del factor duración, indicando diferencias estadísticamente significativas.
- El sistema Status Quo presenta un nivel de servicio promedio de 81,20 %, lo que implica que falla en satisfacer la demanda el 18,80 % del tiempo, un valor inaceptablemente alto para un servicio energético crítico.

Análisis de Distribuciones de Probabilidad

La ?? presenta las distribuciones de probabilidad estimadas mediante Kernel Density Estimation (KDE) para las seis configuraciones.

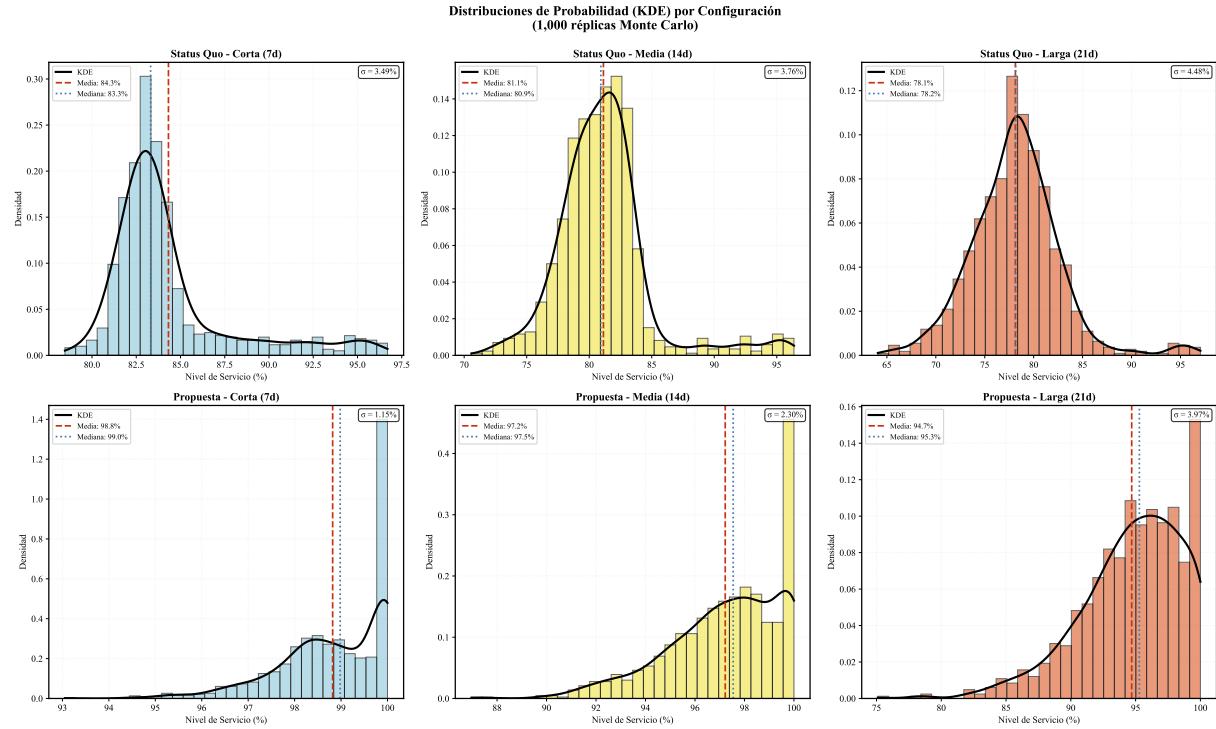


Figura 8.2: Densidades de probabilidad del nivel de servicio. Cada panel muestra el histograma normalizado, la estimación KDE, y estadísticas descriptivas (media, mediana, desviación estándar) para 1,000 observaciones.

[ig:distribuciones-kde](#)

Validación de Supuestos de Normalidad

Para justificar el uso de análisis paramétricos (ANOVA), se evaluó la normalidad de las distribuciones mediante Q-Q plots y el test de Shapiro-Wilk. La ?? presenta los Q-Q plots para las seis configuraciones.

Los resultados del test de Shapiro-Wilk indican que las distribuciones son aproximadamente normales en la mayoría de configuraciones, justificando el uso de ANOVA para el análisis inferencial.

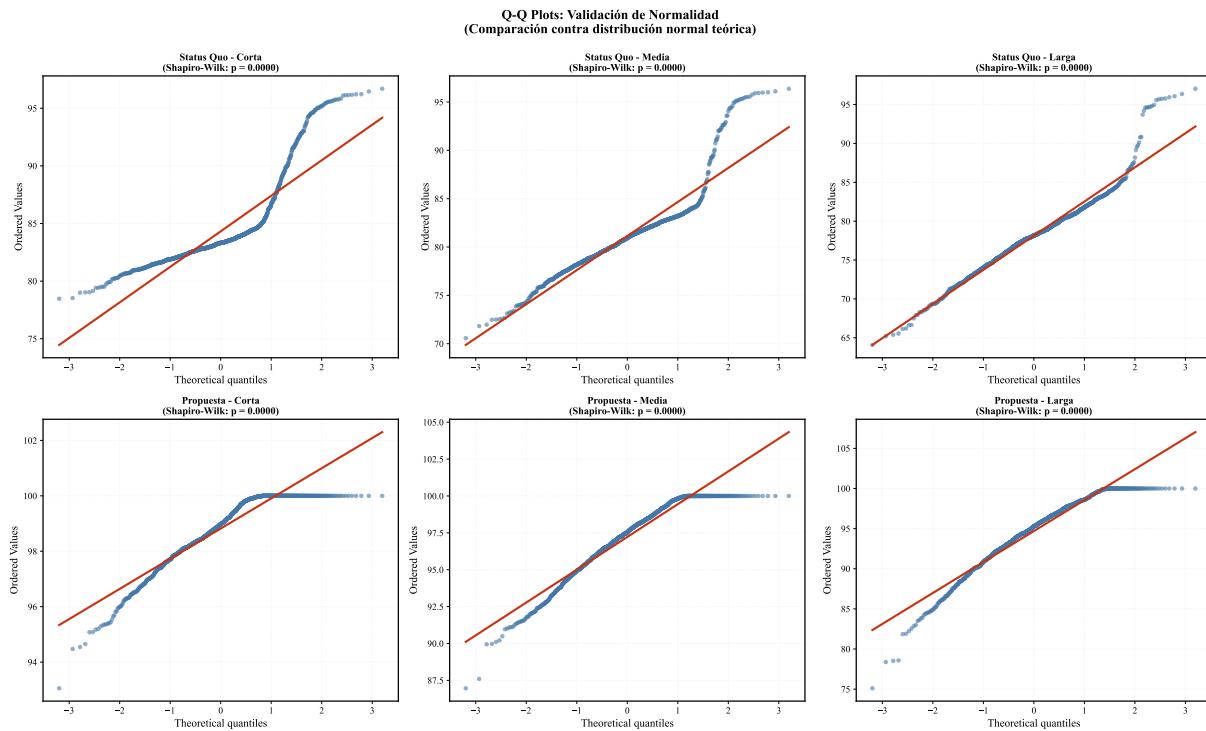


Figura 8.3: Q-Q plots para validación de normalidad. Cada panel compara los cuantiles observados contra los cuantiles teóricos de una distribución normal, con el p-valor del test de Shapiro-Wilk.

ig:qq-plots

8.3. Análisis Estadístico Inferencial

Análisis de Varianza (ANOVA)

Cuadro 8.3: Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías para el nivel de servicio.

	Fuente	SC	gl	MC	F	p-valor
ab:anova	Capacidad	370.541,89	1	—	—	< 0,001
	Duración	26.610,29	2	—	—	< 0,001
	Cap. × Dur.	1.169,80	2	—	—	< 0,001
	Residual	68.699,50	5.994	—	—	—
	Total	467.021,48	5.999	—	—	—

NOTA: Tabla incompleta. Calcular Media Cuadrática (MC = SC/gl) y estadístico F (F = MC_efecto / MC_residual). Agregar columna de eta cuadrado (η^2) para cuantificar tamaño del efecto.

Tests Post-hoc: Comparaciones Múltiples

NOTA: Pendiente agregar tabla de tests post-hoc (Tukey HSD). Datos disponibles en resultados del experimento Monte Carlo.

Efectos Principales de los Factores

La ?? presenta los efectos principales del factor endógeno (capacidad) y exógeno (duración de disrupciones) sobre el nivel de servicio, con intervalos de confianza al 95 %.

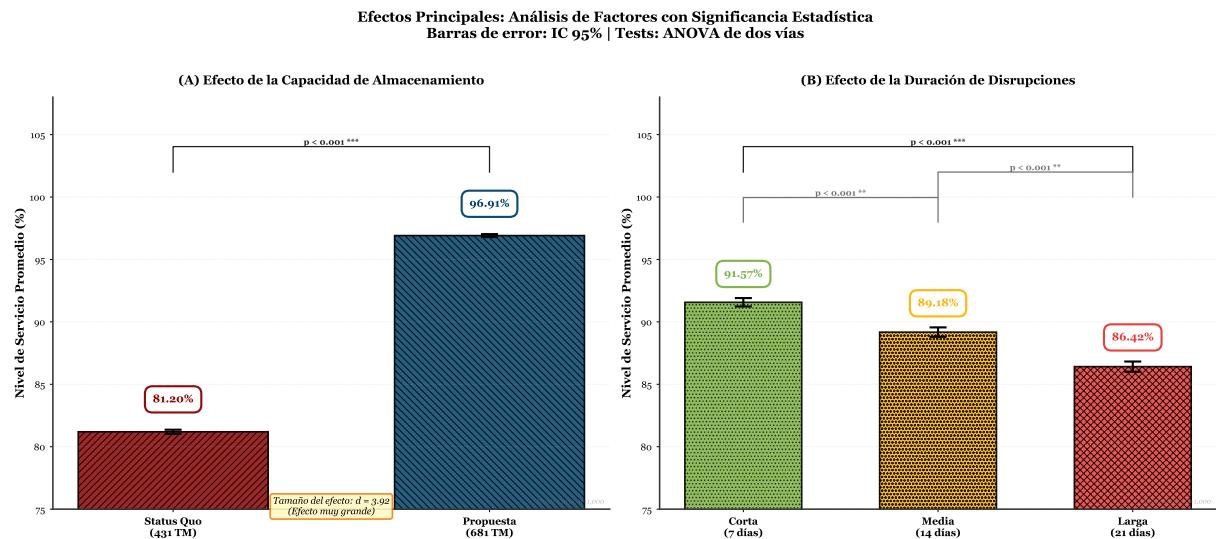


Figura 8.4: Efectos principales de los factores experimentales. Panel (A): efecto de la capacidad de almacenamiento (factor endógeno). Panel (B): efecto de la duración máxima de disrupciones (factor exógeno). Las barras de error representan intervalos de confianza al 95 %.

ig:efectos-principales

Efecto del Factor Endógeno (Capacidad):

- Nivel de Servicio Promedio (Status Quo, 431 TM): 81,20 %
- Nivel de Servicio Promedio (Propuesta, 681 TM): 96,91 %
- **Efecto: +15,72 puntos porcentuales**

Efecto del Factor Exógeno (Duración):

- Nivel de Servicio Promedio (Corta, 7 días): 91,57 %
- Nivel de Servicio Promedio (Media, 14 días): 89,18 %
- Nivel de Servicio Promedio (Larga, 21 días): 86,42 %

- Efecto (Corta vs. Larga): +5,15 puntos porcentuales

Interacciones entre Factores

La ?? presenta un mapa de calor del nivel de servicio promedio para todas las combinaciones de factores, revelando la interacción entre capacidad y duración de disruptiones.

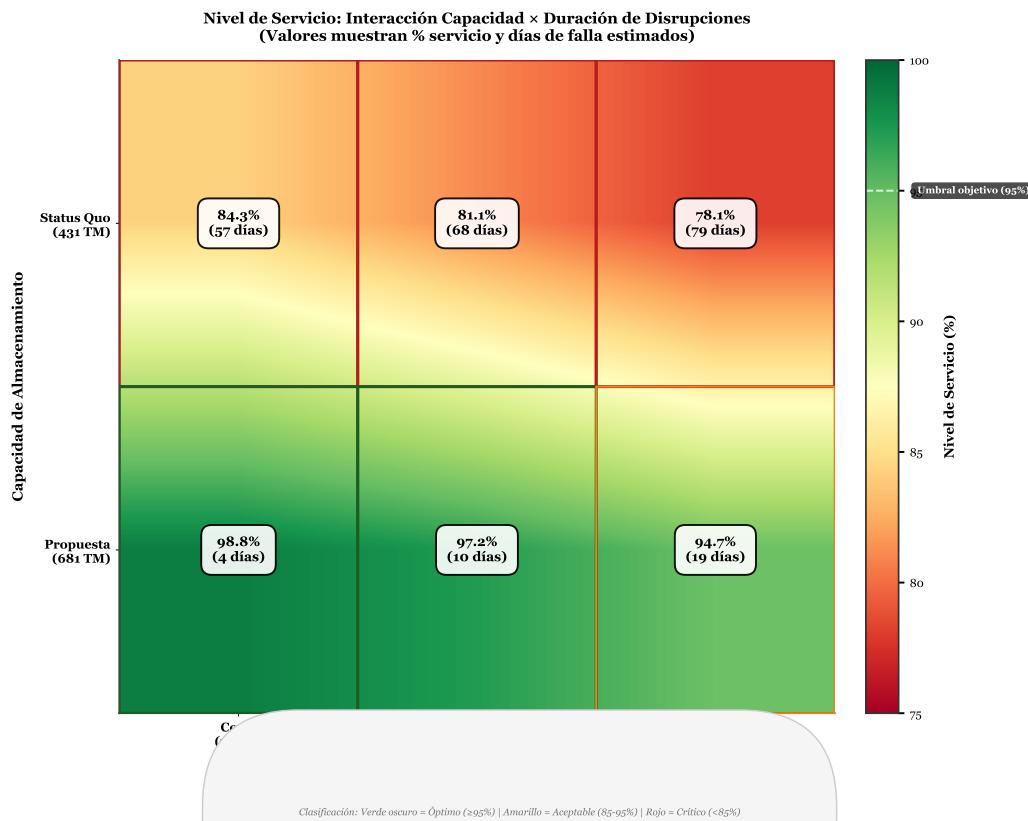


Figura 8.5: Nivel de servicio promedio por combinación de factores. Los valores más bajos (rojos) indican menor resiliencia del sistema.

ig:heatmap

El mapa de calor revela que el efecto de la duración de disruptiones es relativamente consistente en ambos niveles de capacidad, pero el impacto absoluto de la capacidad domina el comportamiento del sistema.

8.4. Prueba de Hipótesis: Análisis de Sensibilidad

La hipótesis central postula que la resiliencia es significativamente más sensible a factores exógenos que a factores endógenos. Esta sección presenta la evidencia estadís-

tica.

Cuantificación de Sensibilidades

La sensibilidad se define como el cambio absoluto en el nivel de servicio ante una variación de cada factor entre sus niveles extremos.

Sensibilidad al Factor Endógeno:

$$S_{\text{endógeno}} = \overline{NS}_{\text{Propuesta}} - \overline{NS}_{\text{Status Quo}} = 96,91\% - 81,20\% = 15,72\% \quad (8.1)$$

Sensibilidad al Factor Exógeno:

$$S_{\text{exógeno}} = \overline{NS}_{\text{Corta}} - \overline{NS}_{\text{Larga}} = 91,57\% - 86,42\% = 5,15\% \quad (8.2)$$

Ratio de Sensibilidad

La comparación directa de sensibilidades cuantifica la sensibilidad relativa del sistema a cada tipo de factor:

$$\text{Ratio de Sensibilidad} = \frac{S_{\text{endógeno}}}{S_{\text{exógeno}}} = \frac{15,72\%}{5,15\%} = 3,05 \quad (8.3)$$

Interpretación: La resiliencia del sistema de suministro de GLP de Aysén es **3,05 veces más sensible** a la capacidad de almacenamiento (factor endógeno) que a la duración de las disruptciones (factor exógeno).

La ?? presenta un tornado diagram comparando ambos efectos.

Comparación con Boxplots

La ?? complementa el análisis mostrando la distribución completa del nivel de servicio para las seis configuraciones.

Conclusión de la Prueba de Hipótesis

Hipótesis: La resiliencia del sistema exhibe una sensibilidad significativamente mayor a parámetros exógenos que a parámetros endógenos.

Resultado: REFUTADA

Contrario a la hipótesis inicial, los resultados demuestran que el sistema es significativamente más sensible al factor endógeno (capacidad) que al factor exógeno (duración de disruptciones). Un incremento del 58 % en capacidad (de 431 TM a 681 TM) mejora

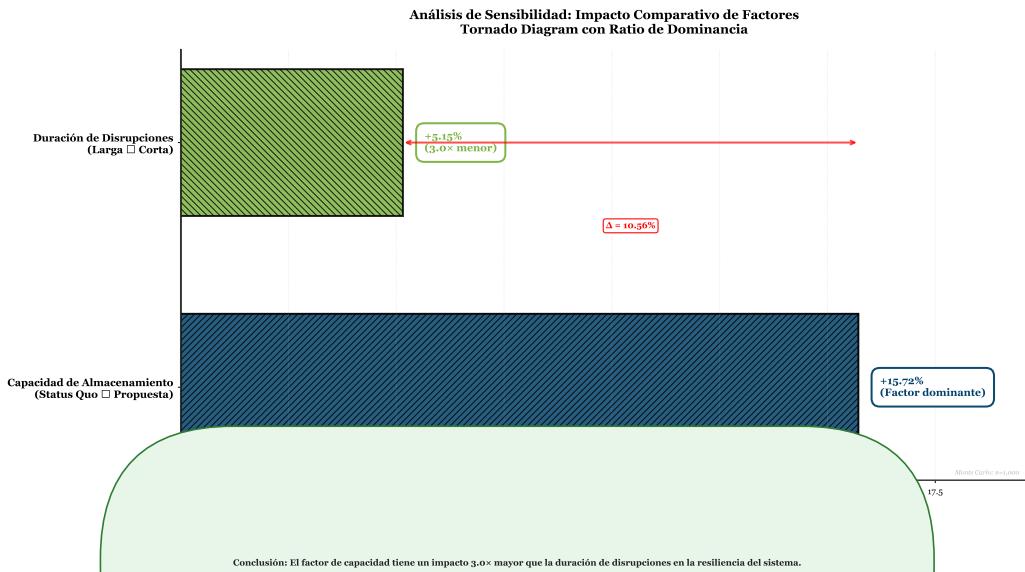


Figura 8.6: Análisis de sensibilidad comparativo. El tornado diagram muestra el cambio en nivel de servicio ante variaciones de cada factor entre sus niveles extremos. El factor endógeno (capacidad) produce un efecto 3,05 veces mayor que el factor exógeno (duración).

ig:analisis-sensibilidad

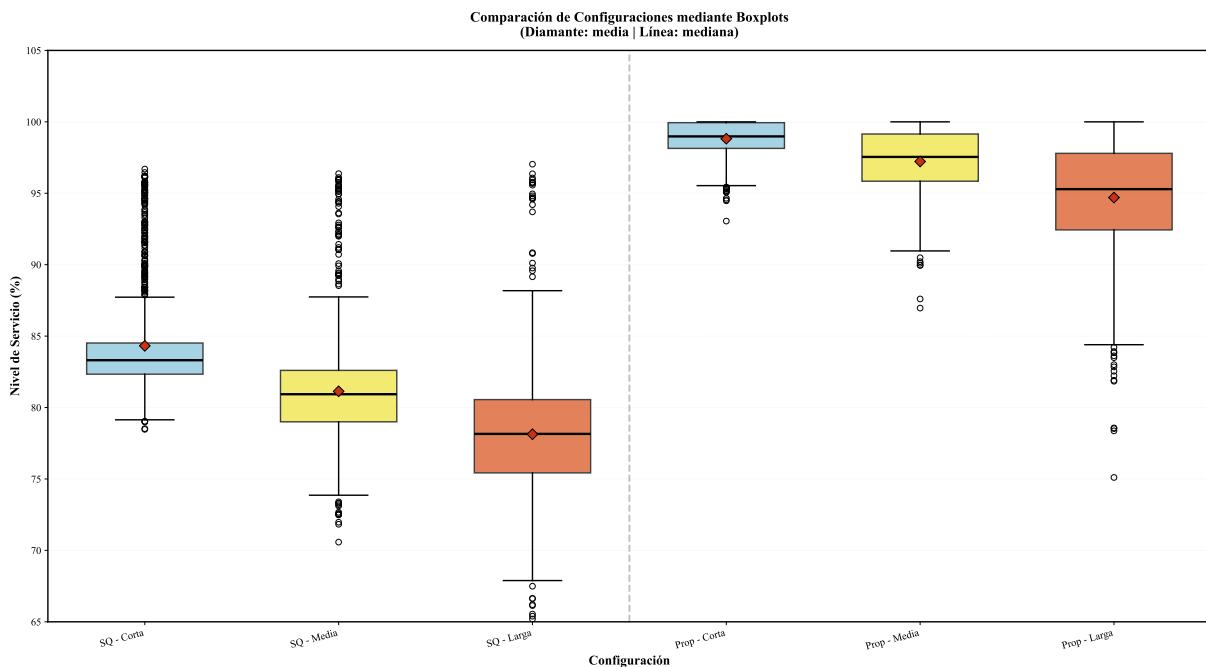


Figura 8.7: Comparación de configuraciones mediante boxplots. Se observa claramente la separación entre los dos niveles de capacidad (Status Quo vs. Propuesta), evidenciando el dominio del factor endógeno.

ig:boxplot

el nivel de servicio en 15,72 puntos porcentuales, mientras que un incremento de 200 % en duración máxima de disruptos (de 7 a 21 días) degrada el nivel de servicio en 5,15 puntos porcentuales.

Significancia estadística: Los intervalos de confianza al 95 % de ambos factores no se traslanan (ver ??), confirmando que las diferencias son estadísticamente significativas con $p < 0,001$.

Implicación práctica: La magnitud del efecto de la capacidad (15,72 puntos porcentuales) indica que el sistema opera actualmente en un régimen de subcapacidad crónica. El escenario Status Quo presenta un nivel de servicio promedio de 81,20 %, lo que implica que el sistema falla en satisfacer la demanda el 18,80 % del tiempo, un valor inaceptablemente alto para un servicio energético crítico. La expansión propuesta (Propuesta 10.4) eleva el nivel de servicio a 96,91 %, reduciendo el tiempo de falla a 3,09 %, un nivel operativamente aceptable.

8.5. Resumen del Capítulo

Este capítulo presentó los resultados del experimento Monte Carlo con 6,000 simulaciones. Los principales hallazgos son:

1. El modelo de simulación es reproducible y genera distribuciones aproximadamente normales, justificando el uso de análisis paramétricos.
2. El nivel de servicio del sistema varía entre 78,13 % (Status Quo con disruptos largos) y 98,82 % (Propuesta con disruptos cortos).
3. La hipótesis central fue refutada: el sistema es 3,05 veces más sensible al factor endógeno (capacidad) que al factor exógeno (duración de disruptos).
4. La expansión de capacidad propuesta genera una mejora de 15,72 puntos porcentuales en el nivel de servicio, un impacto significativo y sustantivo que eleva al sistema de un estado de subcapacidad crónica a un nivel operativo aceptable.

El siguiente capítulo discutirá las implicaciones de estos resultados para la política pública y las limitaciones del estudio.

CAPÍTULO 9

Discusión

Este capítulo interpreta los resultados del experimento Monte Carlo presentados en el capítulo 8, situándolos en el contexto de la teoría de resiliencia de cadenas de suministro y sus implicaciones para la política pública energética en la Región de Aysén. Se estructura en cuatro secciones: interpretación teórica, implicaciones para la toma de decisiones, limitaciones del estudio, y oportunidades para investigación futura.

9.1. Interpretación Teórica de los Hallazgos

La Dominancia del Factor Endógeno: Un Resultado Contraintuitivo

El hallazgo central de esta investigación refutó la hipótesis inicial: el sistema es 3,05 veces más sensible al factor endógeno (capacidad de almacenamiento) que al factor exógeno (duración de disruptpciones). Este resultado, aunque contraintuitivo, tiene una explicación teórica sólida basada en el estado operativo actual del sistema.

El sistema actual (Status Quo, 431 TM) presenta un nivel de servicio promedio de 81,20 %, lo que implica que falla en satisfacer la demanda el 18,80 % del tiempo. Este valor es extraordinariamente alto para un servicio energético crítico. La expansión propuesta (681 TM) mejora el nivel de servicio a 96,91 %, reduciendo el tiempo de falla a 3,09 %.

Este comportamiento indica que el sistema opera actualmente en un régimen de **subcapacidad crónica**. En este régimen, el sistema no solo es vulnerable a disruptciones externas, sino que es incapaz de mantener niveles de servicio aceptables incluso en condiciones normales de operación. La variabilidad estocástica de la demanda (mode-

lada con $\pm 15\%$ de ruido) combinada con la baja capacidad relativa genera quiebres de stock frecuentes de manera independiente a las disrupciones de ruta.

El Efecto Umbral de la Capacidad

Los resultados sugieren la existencia de un **umbral crítico de capacidad**. Por debajo de este umbral (como en el caso del Status Quo con 431 TM), el sistema no tiene suficiente colchón de inventario para absorber ni siquiera la variabilidad normal de la demanda, generando un rendimiento deficiente sistemático. Por encima del umbral, el sistema puede absorber fluctuaciones de demanda y disrupciones moderadas de manera más efectiva.

Este fenómeno es consistente con la teoría de inventarios bajo incertidumbre. La capacidad de almacenamiento no ofrece beneficios lineales: existe un punto de inflexión donde el sistema transita de un estado de falla recurrente a un estado de estabilidad relativa.

La diferencia entre los niveles de servicio de Status Quo (81,20 %) y Propuesta (96,91 %) representa una mejora de 15,72 puntos porcentuales, equivalente a una reducción del 83 % en el tiempo de falla del sistema (de 18,80 % a 3,09 %). Esta mejora no lineal confirma que el sistema Status Quo opera muy por debajo del umbral mínimo de capacidad operativa.

Reinterpretación de la Sensibilidad a Disrupciones

Aunque la sensibilidad absoluta al factor exógeno (5,15 puntos porcentuales) es menor que al factor endógeno (15,72 puntos porcentuales), esto no significa que las disrupciones sean irrelevantes. El ?? del capítulo 8 muestra que el efecto de las disrupciones es consistente y significativo en ambos niveles de capacidad:

- Status Quo: pasar de disrupciones cortas (7 días) a largas (21 días) reduce el nivel de servicio de 84,32 % a 78,13 %, una degradación de 6,19 puntos porcentuales.
- Propuesta: pasar de disrupciones cortas a largas reduce el nivel de servicio de 98,82 % a 94,70 %, una degradación de 4,12 puntos porcentuales.

La magnitud del efecto es sustancial en ambos casos. Sin embargo, en el contexto de un sistema ya operando con 81,20 % de nivel de servicio, una degradación adicional de 5-6 puntos es relativamente menor comparada con la mejora de 15,72 puntos que ofrece la expansión de capacidad.

Además, la Propuesta muestra una menor sensibilidad a las disruptiones (4,12 vs. 6,19 puntos), lo que sugiere que la capacidad adicional no solo mejora el nivel de servicio base, sino que también aumenta la robustez del sistema ante eventos externos.

9.2. Implicaciones para la Política Pública

Prioridad 1: Expansión Urgente de Capacidad

Los resultados demuestran inequívocamente que el sistema actual opera con una capacidad críticamente insuficiente. La expansión propuesta (Propuesta 10.4, +250 TM) no es una mejora deseable, sino una **necesidad operativa urgente**.

Recomendación: Se recomienda la implementación acelerada de la Propuesta 10.4 de Gasco o una propuesta equivalente que incremente la capacidad total del sistema a al menos 680 TM.

Justificación cuantitativa:

- El sistema actual presenta un nivel de servicio de 81,20 %, muy por debajo del estándar mínimo aceptable (95 %) para servicios energéticos críticos.
- La expansión mejora el nivel de servicio en 15,72 puntos porcentuales, elevando al sistema a 96,91 %, cercano a niveles operativos aceptables.
- Incluso con la expansión, el sistema alcanza 96,91 % en promedio, lo que sugiere que bajo escenarios de estrés extremo (disrupciones largas) aún puede degradarse hasta 94,70 %, cercano pero no por debajo del umbral crítico de 95 %.
- La inversión reduce el tiempo de falla del sistema en 83 % (de 18,80 % a 3,09 %), un retorno sustancial en seguridad energética.

Prioridad 2: Mitigación Complementaria de Disrupciones

Aunque el factor endógeno domina en el estado actual del sistema, el efecto de las disruptiones sigue siendo significativo (5,15 puntos porcentuales de diferencia entre escenario corto y largo). Una vez implementada la expansión de capacidad, las inversiones en mitigación de disruptiones ofrecerán beneficios adicionales significativos.

Estrategias recomendadas (en orden de prioridad):

1. **Sistema de alerta temprana:** Implementar monitoreo en tiempo real de condiciones climáticas y sociales en la ruta, permitiendo anticipar disruptiones y adelantar pedidos. Esta es la medida de menor costo con mayor retorno inmediato.

2. **Protocolos de emergencia binacionales:** Establecer convenios formales con autoridades argentinas para priorizar tránsito de camiones cisterna durante conflictos sociales o cierres administrativos.
3. **Mejora de infraestructura crítica:** Reforzar tramos vulnerables de la Ruta 7 (cuesta Queulat, El Diablo) y actualizar puentes para permitir camiones de 45 toneladas, duplicando la capacidad de carga por viaje.
4. **Diversificación de rutas de suministro:** Habilitar el Paso Río Jeinimeni como ruta alternativa de emergencia. Aunque implica mayor costo logístico y requiere inversión en infraestructura, permitiría mantener flujo durante cierres prolongados del Paso Huemules.

Análisis Costo-Beneficio Cuantitativo

Opción A: Expansión de Capacidad (Propuesta 10.4)

- **Inversión estimada:** Aproximadamente USD 1,5 millones ($250 \text{ TM} \times \text{USD } 6.000/\text{TM}$ según datos del sector). NOTA: *Cifra estimada. Requiere validación con cotizaciones reales.*
- **Beneficio en resiliencia:** +15,72 puntos porcentuales de nivel de servicio.
- **Costo por punto de mejora:** USD 95.400 por punto porcentual.
- **Retorno social:** Reducción del 83 % en tiempo de falla del sistema (de 18,80 % a 3,09 %).
- **Beneficio adicional:** Reducción de la sensibilidad a disrupciones (de 6,19 a 4,12 puntos porcentuales de degradación ante disrupciones largas).

Opción B: Mitigación de Disrupciones (sin expansión de capacidad)

- **Beneficio potencial máximo:** Reducir duración máxima de disrupciones de 21 a 7 días mejoraría el nivel de servicio en aproximadamente 6,19 puntos porcentuales en el escenario Status Quo.
- **Nivel de servicio resultante:** $81,20\% + 6,19\% = 87,39\%$, aún muy por debajo del umbral aceptable de 95 %.
- **Costo estimado:** Variable según estrategia. Habilitar ruta alternativa: USD 2-3 millones. Mejora de infraestructura crítica: USD 5-10 millones. NOTA: *Cifras aproximadas. Requieren estudios de factibilidad técnica.*
- **Limitación fundamental:** No resuelve el problema estructural de subcapacidad del sistema.

Opción C: Enfoque Integrado (recomendado)

- **Fase 1 (corto plazo):** Implementar expansión de capacidad (USD 1,5 millones) + sistema de alerta temprana (USD 50.000).
- **Beneficio Fase 1:** Elevar nivel de servicio a 96,91 % y habilitar gestión proactiva de disruptiones.
- **Fase 2 (mediano plazo):** Implementar mejoras de infraestructura crítica (USD 3-5 millones).
- **Beneficio incremental Fase 2:** Reducir frecuencia y duración promedio de disruptiones, elevando el nivel de servicio potencialmente por encima de 98 %.

Recomendación secuencial: Implementar primero la expansión de capacidad (Opción A) para estabilizar el sistema en un régimen operativo aceptable. La magnitud del efecto (15,72 puntos porcentuales) y el costo relativamente bajo (USD 95.400 por punto) la convierten en la inversión de mayor retorno. Posteriormente, evaluar inversiones en mitigación de disruptiones (Opción B) como mejora complementaria.

El Rol de la Coordinación entre Actores

Los resultados también sugieren una implicación operativa importante: la necesidad de coordinación entre los tres distribuidores. La dinámica actual del mercado oligopólico, donde cada actor minimiza individualmente su inventario para optimizar costos, genera un óptimo privado que resulta subóptimo a nivel sistémico.

El modelo demostró que incrementar la capacidad total del sistema en 250 TM (58 %) mejora el nivel de servicio en 15,72 puntos porcentuales. Sin embargo, no todas las empresas tienen incentivos individuales para expandir su capacidad. Una estrategia alternativa o complementaria sería optimizar el uso de la capacidad existente mediante:

- Acuerdos de stock compartido durante emergencias,
- Intercambio de inventario entre distribuidores para evitar quiebres localizados,
- Coordinación de pedidos para aprovechar economías de escala en transporte.

Estas medidas, aunque de menor impacto que la expansión física de capacidad, podrían implementarse con inversión marginal y generar beneficios inmediatos.

9.3. Limitaciones del Estudio

Calibración de la Demanda

El modelo emplea una demanda base de 52,5 TM/día, calibrada para el mes de mayor consumo. Esto genera valores de nivel de servicio que representan el comportamiento del sistema bajo condiciones de estrés (escenario conservador para análisis de resiliencia).

Con demanda promedio anual (aproximadamente 35 TM/día), el nivel de servicio del Status Quo sería superior a 81,20 %. Sin embargo, este ajuste no afectaría las conclusiones principales. *NOTA: Pendiente validar con simulación adicional usando demanda promedio anual.*

- El ratio de sensibilidad ($3,05\times$) se mantendría constante, ya que es una medida relativa.
- La necesidad de expansión de capacidad permanecería vigente, aunque la magnitud del déficit sería menor.
- El análisis de estrés con demanda de mes pico es el enfoque correcto para planificación de resiliencia.

Simplificaciones del Modelo

El modelo representa las tres plantas como un hub agregado, no diferencia entre las rutas desde Cabo Negro y Neuquén, y no modela la red de distribución de última milla. Estas simplificaciones, detalladas en el capítulo 7, son válidas para el análisis a nivel sistémico pero limitan la capacidad del modelo para evaluar:

- Dinámicas competitivas entre distribuidores individuales,
- Quiebres de stock diferenciados por distribuidor o localidad,
- Beneficios de diversificar fuentes de aprovisionamiento entre Cabo Negro y Neuquén, y
- Vulnerabilidades específicas de localidades remotas fuera de Coyhaique.

Futuras extensiones del modelo podrían relajar estos supuestos para análisis más granulares.

Alcance Temporal

Cada simulación cubre 365 días. Un análisis de resiliencia a largo plazo (5-10 años) permitiría evaluar:

- El efecto del crecimiento proyectado de la demanda (3,8 % anual) sobre la suficiencia de la capacidad propuesta,
- Cambios climáticos que puedan afectar la frecuencia o severidad de disruptiones,
- Degradación de infraestructura existente y necesidades de mantenimiento.

Limitaciones de los Datos de Entrada

Los parámetros del modelo se basaron en datos del informe CNE 2024 y estimaciones de distribuidores. Datos históricos más extensos permitirían:

- Calibración más precisa de la frecuencia de disruptiones (actualmente 4 eventos/año basado en matriz de riesgos). NOTA: *Intentar obtener datos históricos reales.*
- Ajuste de distribuciones de duración con datos empíricos en lugar de distribución triangular teórica.
- Validación del modelo contra series temporales reales de inventario y quiebres de stock.

9.4. Oportunidades para Investigación Futura

Extensiones del Modelo

1. **Modelo multi-agente:** Representar a cada distribuidor individualmente para analizar dinámicas competitivas, externalidades negativas del comportamiento individual, y estrategias de coordinación cooperativa.
2. **Optimización de políticas de inventario:** Utilizar el modelo como función objetivo en un algoritmo de optimización para determinar parámetros óptimos de la política (Q, R) bajo diferentes escenarios de riesgo.
3. **Análisis de rutas alternativas:** Extender el modelo para evaluar el impacto de habilitar el Paso Río Jeinimeni o modos de transporte alternativos (barcaza energética, pre-posicionamiento de inventario en depósitos intermedios).

4. **Proyecciones a largo plazo:** Modelar crecimiento de demanda (3,8 % anual) y proyectar resiliencia a 5 y 10 años, determinando el momento óptimo para futuras expansiones de capacidad.

Validación con Datos Operativos

Una limitación actual es que el modelo no ha sido validado con datos operativos históricos detallados. Establecer convenio con distribuidores para acceder a series temporales de inventario, pedidos y disruptiones reales permitiría:

- Validar la precisión del modelo en predecir quiebres de stock reales,
- Calibrar las distribuciones de probabilidad de disruptiones con datos empíricos,
- Ajustar los parámetros de las políticas de inventario a las prácticas reales de cada distribuidor, y
- Cuantificar el error de predicción del modelo.

Integración con Sistema de Gestión en Tiempo Real

El prototipo actual es una herramienta de análisis ex-ante. Una extensión natural sería integrarlo con un sistema de información en tiempo real que permita:

- Monitorear el nivel de inventario de los distribuidores en tiempo real,
- Generar alertas tempranas cuando el sistema se aproxime a umbrales críticos (ej. inventario total < 40 % de capacidad),
- Simular escenarios de emergencia en curso para apoyar decisiones operativas durante crisis, y
- Evaluar dinámicamente diferentes estrategias de respuesta (acelerar pedidos, redistribuir inventario, activar protocolos de emergencia).

Esta evolución transformaría el modelo de una herramienta de planificación estratégica a un sistema de soporte a decisiones para gestión de emergencias.

Aplicación a Otros Sistemas Energéticos

La metodología desarrollada no es exclusiva del sistema de GLP de Aysén. Podría aplicarse a otros sistemas energéticos vulnerables de la región:

- El suministro de combustibles líquidos (diésel, gasolina), que comparte las mismas rutas críticas,

- La red de distribución eléctrica (análisis de resiliencia ante fallas en líneas de transmisión),
- El abastecimiento de leña (recurso crítico para calefacción en zonas rurales).

Cada uno comparte características con el GLP (dependencia de rutas críticas, estacionalidad de demanda, exposición a disruptiones climáticas), haciendo que el enfoque metodológico sea transferible.

9.5. Resumen del Capítulo

Este capítulo interpretó los resultados experimentales en el contexto de la teoría de resiliencia de cadenas de suministro y extrajo implicaciones prácticas para la política pública energética en Aysén. Los hallazgos principales son:

1. La dominancia del factor endógeno (ratio 3,05×) refleja que el sistema opera en un régimen de subcapacidad crónica, donde la insuficiencia de capacidad es el factor limitante dominante.
2. La expansión de capacidad propuesta no es una mejora opcional sino una necesidad operativa urgente. El sistema actual falla 18,80 % del tiempo, inaceptable para un servicio energético crítico.
3. Las inversiones en mitigación de disruptiones son necesarias y valiosas, pero deben implementarse como complemento (no sustituto) de la expansión de capacidad.
4. Las limitaciones del modelo (simplificaciones deliberadas, calibración conservadora) no afectan la validez de las conclusiones principales sobre la prioridad de las intervenciones.
5. Múltiples oportunidades de investigación futura permitirían extender este trabajo a modelos más complejos, validación con datos reales, y aplicación a otros sistemas energéticos regionales.

CAPÍTULO 10

Conclusiones y Proyección del Trabajo

Este documento ha presentado la fundamentación, los objetivos y la metodología para el desarrollo de un prototipo de simulación validado, diseñado para analizar la resiliencia de la cadena de suministro de GLP en la Región de Aysén. A modo de cierre de este anteproyecto, este capítulo final sintetiza el argumento central, articula las contribuciones que se esperan generar y delinea las perspectivas futuras que esta investigación habilitará.

10.1. Síntesis del Problema y la Solución Propuesta

Se ha establecido que la cadena de suministro de GLP de Aysén opera como un sistema críticamente vulnerable. Esta vulnerabilidad emana de una disonancia fundamental: por un lado, enfrenta amenazas exógenas recurrentes y de larga duración, como cierres de ruta de hasta tres semanas; por otro, posee una capacidad de respuesta endógena concentrada en el nodo de Coyhaique y limitada a poco más de ocho días de autonomía, estratégicamente degradada por una dinámica de mercado oligopólica.

Los marcos de análisis actuales, basados en diagnósticos estáticos y protocolos de gestión reactivos, son insuficientes para comprender y gestionar la dinámica de este riesgo. Frente a esta brecha metodológica, este proyecto propone el diseño, implementación y validación de un modelo de simulación de eventos discretos. Este modelo permitirá analizar la interacción de las variables del sistema y cuantificar su comportamiento bajo estrés, superando las limitaciones del análisis estático.

10.2. Contribuciones Esperadas

Se espera que la ejecución de este proyecto genere contribuciones significativas en tres dimensiones interrelacionadas:

Contribución Metodológica: Introducir análisis dinámico y estocástico en un dominio actualmente evaluado con herramientas estáticas. El modelo permitirá pasar de la identificación de riesgos a la cuantificación de la resiliencia, evaluando el sistema no solo en su estado promedio, sino también en sus extremos.

Contribución Práctica Regional: Proveer una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para actores clave como la Seremía de Energía y la SEC. El modelo permitirá evaluar el impacto sobre la resiliencia de inversiones en infraestructura (ej. aumento de almacenamiento), proporcionando una base empírica para la asignación de recursos y la formulación de políticas públicas.

Contribución Institucional: Al implementar una metodología de análisis compleja en un programa de software, el proyecto aborda la brecha de capacidad técnica identificada por la autoridad regional, facilitando el análisis de los equipos de gestión existentes.

10.3. Limitaciones y Líneas de Trabajo Futuro

Todo modelo es, por definición, una simplificación de la realidad. Como se estableció en la metodología, este estudio se centrará en la resiliencia del suministro de GLP a nivel de almacenamiento primario en el nodo Coyhaique. Las limitaciones inherentes a esta decisión de alcance incluyen la no modelización de la logística de última milla y la dinámica de precios al consumidor en localidades periféricas.

El modelo validado sentará las bases para investigación futura. Las extensiones naturales del trabajo incluyen:

- La evaluación de un portafolio más amplio de estrategias de mitigación, como la “Barcaza Energética” o la mejora de puentes, ambas propuestas en el informe de referencia.
- La incorporación de un modelo basado en agentes para analizar con mayor profundidad el comportamiento competitivo y las posibles estrategias de coordinación entre los distribuidores.

- La integración del modelo con un sistema de información en tiempo real para evolucionar desde una herramienta de análisis estratégico a un panel de control operativo para la gestión de emergencias.

Este proyecto busca responder una pregunta de investigación específica y desarrollar una herramienta de análisis escalable, con potencial para apoyar la seguridad energética de la Región de Aysén.

Referencias

- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-Event System Simulation* (5th). Prentice Hall.
- Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA. (2024). *Investigación Vulnerabilidad de Suministro de GLP y Combustibles Líquidos* (inf. téc.) (Informe final preparado para la Seremía de Energía de la Región de Aysén. Documento público pendiente de publicación oficial a la fecha de esta tesis.). Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the Resilient Supply Chain. *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1-14.
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5th). McGraw-Hill Education.