

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante: Patricio Álvarez Mendoza MSc.PhD.**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS CAMBIOS EN EL  
NIVEL DE SERVICIO DE REDES DE  
TRANSPORTE URBANO PRODUCTO DE  
EVENTOS CATASTRÓFICOS.**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
Título de Ingeniero Civil

**JUAN ANDRES SILVA MEDINA**

Concepción, Abril del 2016

## INDICE GENERAL

CARACTERIZACIÓN DE LOS CAMBIOS EN EL NIVEL DE SERVICIO DE REDES DE TRANSPORTE URBANO PRODUCTO DE EVENTOS CATASTRÓFICOS. ....	1
RESUMEN. ....	1
CARACTERIZACIÓN OF CHANGES IN THE LEVEL OF SERVICE OF URBAN TRANSPORT NETWORK PRODUCT OF CATASTROPHIC EVENTS. ....	2
ABSTRACT. ....	2
1 INTRODUCCIÓN. ....	3
1.1 Justificación. ....	4
1.2 Alcances del proyecto. ....	4
1.3 Objetivos. ....	5
1.3.1 Objetivo General. ....	5
1.3.2 Objetivos Específicos. ....	5
2 REVISION DEL ESTADO DEL ARTE. ....	6
2.1 Eventos Catastróficos y Sistema de Transportes. ....	6
2.2 Vulnerabilidad. ....	8
2.3 Resiliencia. ....	9
3 CONCEPTOS PREVIOS. ....	15
3.1 Red Vial Estructurante. ....	15
3.2 Ciudad de Tamaño Medio. ....	15
3.3 Capacidad. ....	15
3.4 Modelo de Simulación de Monte Carlo. ....	16
3.5 Modelo SATURN. ....	17
3.5.1 Sub-Modelo de Asignación. ....	17
3.5.2 Sub-Modelo de Simulación. ....	19
3.6 Modelo de distribución gravitacional doblemente acotado. ....	19
4 METODOLOGIA. ....	21
4.1 Construcción de RVF. ....	22
4.2 Estimación de la demanda. ....	26
4.2.1 Determinación del total de viajes. ....	26
4.2.2 Construcción de la Matriz OD. ....	28
4.3 Elección del Modelo de Tráfico. ....	29
4.4 Simulación. ....	31
4.5 Aplicación del Daño. ....	32

4.5.1 Estrategia de daño. ....	32
4.5.2 Niveles de daño. ....	32
4.5.3 Escenarios de daño. ....	32
5 RESULTADOS. ....	34
6 APLICACIÓN. ....	37
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	39
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	42
9 ANEXOS. ....	44
ANEXO 1 – Características de interés de ciudades de tamaño medio ordenadas de acuerdo a distintas variables. ....	44
ANEXO 2 – Red vial estructurante para cada una de las ciudades de tamaño medio.....	45
ANEXO 3 – Trayectorias de daño para la red inicial. ....	47
ANEXO 4 – Funciones de densidad de probabilidad y de densidad de probabilidad acumulada para cada nivel de daño. ....	50
ANEXO 5 – Gráficos comparativos. ....	55

**INDICE DE TABLAS.**

TABLA 2-1 – CARACTERIZACIÓN DE LAS CAUSAS DE AMENAZAS Y TRASTORNOS EN EL SISTEMA DE TRANSPORTES. ....	9
TABLA 2-2– MEDIDAS DEL NIVEL DE SERVICIO DEL SISTEMA DE TRANSPORTES. ....	12
TABLA 4-1– PROPIEDADES DE ARCOS DE ACUERDO A SUS CATEGORÍAS. ....	25
TABLA 4-2– PROPIEDADES DE ARCOS DE ACUERDO A SUS CATEGORÍAS.....	27
TABLA 4-3– MATRIZ OD PARA LA RVF.....	29
TABLA 6-1– TETS DE SIGNIFICACIÓN PARA LAS MEJORAS APLICADAS. ....	38

**INDICE DE FIGURAS.**

FIGURA 2-1 - PROBABILIDAD ACUMULADA V/S CONSECUENCIAS ..... 8

FIGURA 2-2 – CICLO DE LA RESILIENCIA..... 10

FIGURA 2-3 – EFECTOS DE LA TOMA DE DECISIONES SOBRE LA RESILIENCIA.  
..... 11

FIGURA 2-4 – TODAS LAS ESTRATEGIAS DE ELIMINACIÓN. .... 13

FIGURA 4-1 – DISTINTAS CARACTERISTICAS DE LAS CCTM ORDENADAS DE  
ACUERDO A LA POBLACION..... 23

FIGURA 4-2- RVE DE EN DISTINTAS CIUDADES DE CHILE ..... 24

FIGURA4-3 - RVF PARA LA MODELACIÓN..... 25

FIGURA4-4 - ZONIFICACIÓN DE LA RVF..... 28

FIGURA 4-5-ELECCIÓN DE MODELOS DE TRÁFICO..... 30

FIGURA 4-6– ESCENARIO NÚMERO 1 A TRAVÉS DE TODOS LOS NIVELES DE  
DAÑO..... 33

FIGURAS5-1 - .CAMBIO EN EL FACTOR DE AUMENTO DE LAS DEMORAS PARA  
TRES TRAYECTORIAS DE DAÑO..... 34

FIGURAS5-2 - .FACTOR DE AUMENTO DE LAS DEMORAS PARA TODOS LOS  
NIVELES DE DAÑO..... 35

FIGURAS5-3 - .CAMBIO EN LA DESVIACIÓN ESTANDAR Y MEDIA DEL FACTOR  
DE AUMENTO DE LAS DEMORAS PARA TODOS LOS NIVELES DE DAÑO. .... 36

FIGURAS5-4 - FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA LOS NIVELES  
DE DAÑO 5% Y 25%..... 37

*Palabras* =  $8804 + 20 \times 250 = 12804$

## **CARACTERIZACIÓN DE LOS CAMBIOS EN EL NIVEL DE SERVICIO DE REDES DE TRANSPORTE URBANO PRODUCTO DE EVENTOS CATASTRÓFICOS.**

**Juan Andres Silva Medina.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío.Bío.  
jsilvamedina92@gmail.com

**Patricio Álvarez M.MSc.PhD.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.  
palvarez@ubiobio.cl

### **RESUMEN.**

Debido a una gama de factores geográficos, climáticos y topológicos, entre otros, todas las redes de transporte urbano son vulnerables a perder parte de su capacidad debido a la ocurrencia de un evento catastrófico. La resiliencia de una red de transporte urbano puede medirse como el cambio relativo de su nivel de servicio luego de ser degradada. El estudio de múltiples escenarios de daño permite caracterizar el comportamiento de la red en distintos niveles de pérdida de capacidad. El uso de herramientas de simulación y modelación es indispensable para llevar a cabo la metodología propuesta. Finalmente, al realizar un análisis estadístico, es posible determinar si una mejora en la red original, aumenta el nivel de servicio significativamente en los distintos niveles altos de daño.

## **CARACTRIZACIÓN OF CHANGES IN THE LEVEL OF SERVICE OF URBAN TRANSPORT NETWORK PRODUCT OF CATASTROPHIC EVENTS.**

**Juan Andres Silva Medina.**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.  
jsilvamedina92@gmail.com

**Patricio Álvarez M.MSc.PhD.**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.  
palvarez@ubiobio.cl

### **ABSTRACT.**

Due to a variety of geographic, climatic and topological factors, among others, all urban transport networks are vulnerable to lose some of its capacity due to the occurrence of a catastrophic event. The resilience of urban transport network can be measured as the relative change in their level of service after being degraded. The study of multiple damage scenarios to characterize the behavior of the network at different levels of capacity loss. The use of simulation and modeling tools is essential to carry out the proposed methodology. Finally, statistical analysis, it be determined whether an improvement on the original network, service level increases significantly in the different levels of damage.

## 1 INTRODUCCIÓN.

En Chile, las consecuencias de distintos fenómenos naturales han demostrado lo sensible que es su sistema de transportes. Por su geografía rutas estratégicas pueden verse fuertemente afectadas perdiendo de manera parcial o total su capacidad. Algo similar ocurre en las redes de transporte urbano. Un ejemplo de lo anterior son los problemas de acceso, movilidad y comunicación que enfrentaron las ciudades de la Región del Bío-Bío y de las Regiones de Atacama y Coquimbo ocurridos los eventos del 27 de febrero del 2010 y el 16 de Septiembre del 2015 respectivamente. En estas situaciones, mientras más afectada se vea la capacidad, mayores serán las consecuencias para la actividad económica local y mayores serán los incrementos en los tiempos de traslado de suministros y profesionales a las zonas más afectadas. Como lo indican las investigaciones de [Nicholson \(2003\)](#) o [Edrissi et al. \(2015\)](#), en situaciones de emergencia las redes de transportes se transforman en un elemento crítico pues por estas se distribuyen los suministros y se movilizan los recursos necesarios para el restablecimiento de otros servicios vitales como el agua potable, electricidad, alcantarillado, etc.

El trabajo que se presenta a continuación propone una metodología para estimar el efecto en el nivel de servicio de redes de transporte urbano producto de la ocurrencia de eventos catastróficos.

## **1.1 Justificación**

Al existir en Chile poca información acerca del impacto que los fenómenos naturales generan sobre el nivel de servicio en redes urbanas, y dada la dificultad para realizar pruebas dentro de un ambiente controlado se vuelve necesario evaluar sus impactos utilizando técnicas de simulación.

## **1.2 Alcances del proyecto.**

Tanto la matriz de demanda como las características de la red fueron determinadas a través del estudio de las características más relevantes de ciudades chilenas de tamaño medio. El flujo utilizado para evaluar los impactos de los fenómenos naturales corresponde a vehículos livianos y buses urbanos.

### **1.3 Objetivos.**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

Estimar los cambios en el nivel de servicio en redes de transporte urbano producto de reducciones significativas en su capacidad (eventos catastróficos)

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Resumir el estado del arte en cuanto a los efectos y formas de evaluar el impacto que genera la disminución de la capacidad en redes de transporte urbano.
- Proponer una metodología que permita evaluar el cambio en el nivel de servicio producto de disminuciones en la capacidad de una red de transporte urbano debido a eventos catastróficos.
- Identificar las características típicas de los sistemas de transporte de las ciudades chilenas de tamaño medio.
- Caracterizar los cambios que produce un evento catastrófico sobre el nivel de servicio de un sistema de transporte urbano.
- Evaluar el efecto en la resiliencia del nivel de servicio producto de aumentos en la capacidad del sistema de transporte urbano.

## **2 REVISION DEL ESTADO DEL ARTE.**

A continuación se ofrece una revisión de los aportes más significativos para el desarrollo de esta memoria.

### **2.1 Eventos Catastróficos y Sistema de Transportes.**

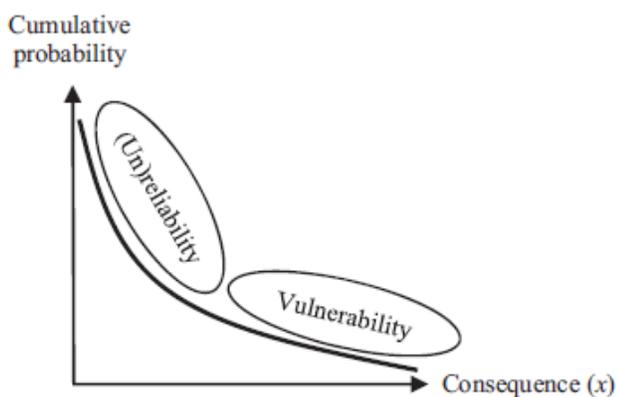
Como señala [Nicholson \(2003\)](#), la confiabilidad del sistema de transportes es un concepto que se ha estudiado al menos durante los últimos 50 años, y es que comprender su interdependencia con otros sistemas es algo de suma importancia para la economía de cualquier país. En su artículo, el autor pone como ejemplo un trabajo desarrollado en 1991 que estudió el efecto de los eventos sísmicos sobre la infraestructura crítica en Wellington (capital de Nueva Zelanda). Considerando la interdependencia de los sistemas, determinó que la restauración de ellos depende en gran medida de la restauración previa del sistema de transportes puesto que la reparación de este permite el traslado de personas y equipos a las zonas dañadas.

Otra dimensión del problemas es la que señalan [Mattson y Jenelius \(2015\)](#), quienes definen que los costos directos o sociales asociados a la falla del sistema de transportes pueden ser bastante severos dependiendo de la causa y el tipo de trastorno que sufra el sistema de transporte. Las consecuencias pueden significar un aumento en los tiempos de viaje, cancelación de viajes, bloqueo de rutas, detención de trenes, cierre de aeropuertos, etc. Así es como un estudio llevado a cabo luego de que en 1994 un terremoto azotara la comunidad de Northridge (Los Angeles) determinó que para los automovilistas sólo la demora asociada al cierre de una vía (Interstate Highway 10) costó del orden de \$1 MM USD por día ([Yee et al., 1996](#)). Cabe señalar que este sismo involucró el bloqueo de al menos 4 autopistas y el cierre de varios aeropuertos cercanos durante 2 horas.

Numerosas investigaciones han estimado los efectos que el daño en la infraestructura vial, generado por eventos sísmicos, puede causar sobre una población. Por mencionar algunos: [Kadhemi et al. \(2015\)](#) estudia la vulnerabilidad de la ciudad de Therán (capital de Irán) frente a un terremoto y [A. Edrissi et al. \(2015\)](#) estudia cómo mejoras en la infraestructura pueden disminuir la cantidad de víctimas fatales producto de mejores condiciones de la infraestructura que favorecen (disminuye la demora) en la entrega de suministros. No obstante, otras investigaciones se han enfocado en otro tipo de eventos que, de igual manera, pueden presentar consecuencias significativas para la población. En esta línea están por ejemplo los trabajos desarrollados por [M. Omer \(2011\)](#) quien estudia cómo la ciudad de Manhattan se ve afectada por el efecto de inundaciones o nevazones. Los autores [Berdica y Mattsson \(2007\)](#) evalúan los impactos sociales del cierre de puentes en Estocolmo. De la misma forma, parte del estudio de [Duan y Lu \(2014\)](#) se interesa en determinar el comportamiento de distintas ciudades del mundo frente a bloqueos en nodos generados por ataques terroristas.

En contraste a lo anterior, [Taylor \(2013\)](#) se enfoca en estudiar los efectos de la variabilidad diaria de los tiempos de viaje, proveyendo una revisión de los trabajos más recientes sobre confiabilidad en el tiempo de viaje y como la incertidumbre afecta el comportamiento de los viajeros. Uno de los resultados más interesantes de su trabajo se resume en la **Figura 2-1**. En dicha figura la curva muestra en el campo de la confiabilidad (unreliability) los eventos que son más probables, por ejemplo la congestión diaria. En el campo de la vulnerabilidad ( ) están los eventos menos probables o menos esperados los que al mismo tiempo tienen asociados mayores consecuencias negativas.

FIGURA 2-1 - PROBABILIDAD ACUMULADA V/S CONSECUENCIAS



Fuente: Taylor, 2013

## 2.2 Vulnerabilidad.

Una definición de vulnerabilidad que resulta bastante útil para este estudio es la que aportó [Berdica \(2002\)](#). En su estudio, la autora hace énfasis en la ocurrencia de un evento destructivo, es decir, en la probabilidad de que un evento suceda. Se entenderá entonces la vulnerabilidad como la susceptibilidad a que los incidentes puedan resultar en reducciones considerables de la serviciabilidad. La autora del estudio identifica que el principal propósito de sistema de transportes es prestar servicios de transporte a los usuarios a pesar de ser dañado de forma significativa.

Otras investigaciones sugieren que para realizar un correcto análisis del riesgo es necesario formular tres preguntas: ¿Qué puede pasar? ¿Qué tan probable es? Y ¿Cuáles son sus consecuencias? Estas preguntas en términos formales permiten identificar un escenario, su probabilidad y su consecuencia más probable ([Kaplan y Garrick, 1981](#)).

[Mattson y Jenelius \(2015\)](#) hacen una revisión de los trabajos más recientes en cuanto a vulnerabilidad y resiliencia. En su trabajo señalan que los trastornos sufridos por un sistema de transporte son causados por eventos de distinta naturaleza, por lo que es necesario usar

herramientas de análisis distintas dependiendo del tipo de evento. La **Tabla 2-1** presenta las relaciones entre el origen y la causalidad de distintos eventos.

TABLA 2-1 – CARACTERIZACIÓN DE LAS CAUSAS DE AMENAZAS Y TRASTORNOS EN EL SISTEMA DE TRANSPORTES.

Causa	Accidental	Intencional
Interna	Fallas Técnicas, descuidos.	
Externa	Condiciones climáticas adversas, desastres naturales	Bromas, ataques.

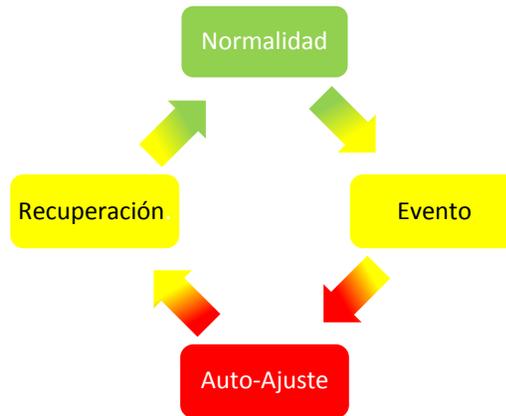
Fuente: Adaptada desde L.G. Mattson y E.Jenelius, 2015

En esta línea de análisis, para el estudio de la vulnerabilidad de una red de transporte urbano [Mattson y Jenelius \(2015\)](#) proponen la construcción de un grafo. En su trabajo ([Mattson y Jenelius, 2015](#)), los autores dedican un capítulo completo de su trabajo al estudio de las distintas formas de construir este grafo para capturar con distintos niveles de sofisticación las características del tipo de red que se desea estudiar.

### 2.3 Resiliencia.

La resiliencia es un concepto utilizado en distintas disciplinas pasando por la psicología, la sociología y distintos campos de la ingeniería. [Hollnagel \(2011\)](#), define la resiliencia como la capacidad intrínseca de un sistema para ajustar su funcionamiento antes, durante, o después de cambios y perturbaciones, de modo que pueda sostener las operaciones requeridas en virtud de ambas condiciones: esperada e inesperada. De esta definición, se puede inferir que la resiliencia es un fenómeno dinámico, o que al menos, en su evaluación, cualquier cambio en el sistema representa una variable de interés. En este sentido, [Urena \(2010\)](#), de acuerdo a la **Figura 2-2**, sugiere estudiar la resiliencia como un ciclo donde se identifican cuatro elementos: a) Normalidad, b) Evento, c) Autoajuste y d) Recuperación.

FIGURA 2-2 – CICLO DE LA RESILIENCIA.



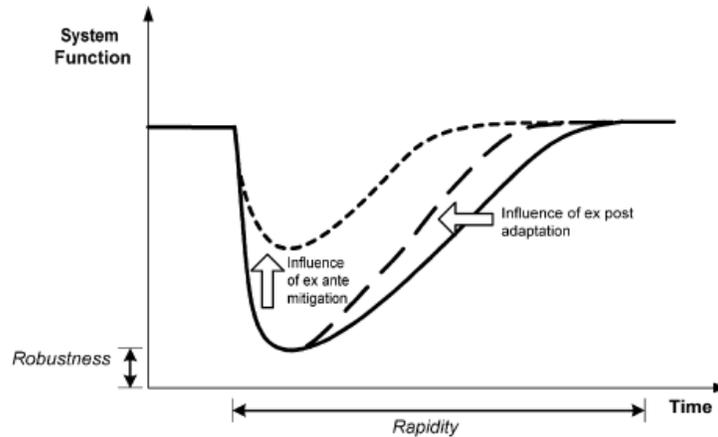
Fuente: Adaptado de N. Urena, 2010:

Otra definición interesante es la que ofrece el [MCEER's Resilience Framework](#) entendiendo la resiliencia como la habilidad de una sociedad para: Reducir la probabilidad de falla, reducir las consecuencias derivadas de la falla y minimizar los tiempos de recuperación. En este contexto se proponen cuatro propiedades fundamentales:

- a. **Robustness**- Fuerza o capacidad de los elementos, sistemas y otras unidades de análisis para mantenerse en pie dado un nivel de tensión o demanda sin sufrir degradación o pérdida de capacidad.
- b. **Redundancy**-El grado en que cada elemento, sistema u otra unidad de análisis es sustituible.
- c. **Resourcefulness**-La capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar los recursos cuando existen condiciones que amenacen con perturbar algún elemento, sistema u otra unidad de análisis.
- d. **Rapidity**-La capacidad para atender prioridades y lograr objetivos en un momento oportuno con el fin de contener las pérdidas y evitar perturbaciones futuras.

McDaniels et al. (2008) estudia cómo es que la toma de decisiones frente a la ocurrencia de algún evento extremo puede modificar la resiliencia de un elemento o sistema.

FIGURA 2-3 – EFECTOS DE LA TOMA DE DECISIONES SOBRE LA RESILIENCIA.



Fuente: McDaniels et al, 2008

Los autores proponen que una estrategia de mitigación (basada en el aumento de la Robustness) frente a una de adaptación no solo disminuye la pérdida de función del sistema sino que también el periodo necesario para recuperar la función inicial, tal como se aprecia en la **Figura 2-3**.

Basado en los párrafos anteriores y sin contradecir ninguna de las definiciones expuestas previamente se puede entender como una medida natural de la resiliencia un cambio en cualquier medida del nivel de servicio de la red, en esta línea [Berdica \(2002\)](#) propone los siguientes indicadores, resumidos en la **Tabla 2-2**, para medir la función del sistema.

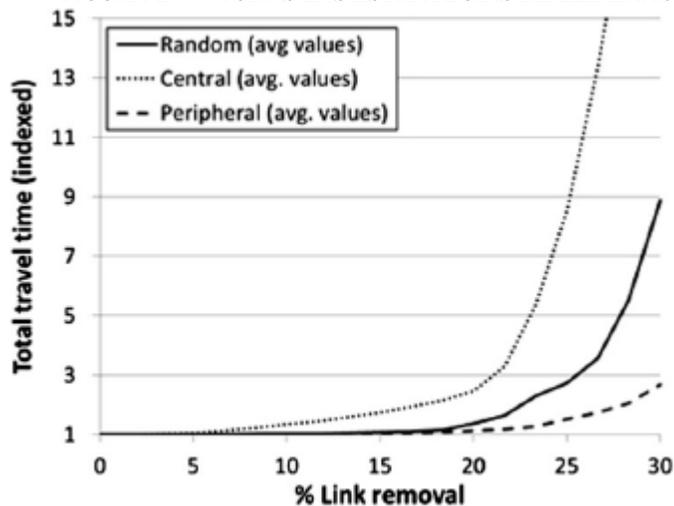
TABLA 2-2- MEDIDAS DEL NIVEL DE SERVICIO DEL SISTEMA DE TRANSPORTES.

Medida	Calculado por
Tiempo de viaje, $tt$	
Precio del viaje, $tr$	$tt/largo\ del\ segmento = velocidad^{-1} - 1$
Precio de la demora, $dr$	$(atr - dtr) = (att - dtt)/largo$
Demoras totales	$dr \times personas \times largo = (att - dtt) \times personas$
Precio relativo de la demora	$dr/dtr = atr/dtr - 1$
Razón de demoras	$dr/atr = 1 - dtr/atr$
Velocidad de la persona en movimiento, $spm$	$personas \times velocidad\ de\ viaje\ promedio$
Índice de movilidad de corredor	$spm/valor\ estandar$
Accesibilidad	<i>Promedio del <math>tt</math> que toma llegar a cierto lugar o porcentaje de los que llegan al lugar dentro de un tiempo especificado.</i>
Viaje en congestión	$\sum segmentos\ con\ congestion \times personas$

Fuente: Adaptado desde Berica , 2002

Un ejemplo de lo expuesto en el párrafo anterior es el de [Ortigoza y Menedez \(2014\)](#) que estudiaron el aumento en los flujos luego de remover de forma progresiva y aleatoria hasta el 30% de los arcos de una red rectangular compuesta por 100 nodos unidos a través de arcos bidireccionales usando 3 distintas estrategias de eliminación: a) Eliminación aleatoria, b) Eliminación central y c) Eliminación periférica. De las tres estrategias señaladas, y de acuerdo a la **Figura 2-4**, la que mayores impactos generó sobre los flujos fue la eliminación central aumentando en promedio alrededor de 13 veces el tiempo de viaje cuando se eliminó el 25% de los arcos en la red.

FIGURA 2-4 – TODAS LAS ESTRATEGIAS DE ELIMINACIÓN.



Fuente: J. Ortigoza, M. Menendez, 2014

Como se mostró en los párrafos anteriores, los conceptos de resiliencia y vulnerabilidad están muy relacionados entre sí, pudiéndose incluso analizar con herramientas similares o evaluarse, bajo ciertas consideraciones, uno en función del cambio del otro.

La documentación y referente a estas temáticas cuenta con estudios que datan al menos desde la última década del siglo XX y con un explosivo aumento luego del 2010. Estos estudios también son bastante variados en cuanto a su naturaleza, pudiéndose encontrar trabajos sumamente teóricos, recopilatorios y extensos trabajos de aplicación a sistemas reales. Con respecto a esto último, la mayoría de las investigaciones han puesto su foco sobre el estudio entre los sistemas de transportes y eventos de tipo sísmico, dejando un poco relegado el estudio y caracterización de otro tipo de eventos, por ejemplo, los climáticos extremos.

A pesar de que muchos de los estudios revisados evalúan económicamente los cambios del nivel de servicio a través de una estimación de los costos directos, se cuenta con un menor desarrollo (seguramente por el la dificultad de estimación) en cuanto a la evaluación

económica de los costos indirectos, por ejemplo, el costo oportunidad que representa la detención de procesos productivos a partir de dañar una red a un determinado nivel.

En vista de los antecedentes expuestos, el estudio de la vulnerabilidad y la resiliencia representaría para Chile un campo de estudio interesante y sumamente beneficioso tomando en cuenta la regularidad con que este territorio experimenta eventos naturales de alto impacto para la sociedad.

### **3 CONCEPTOS PREVIOS.**

El presente capítulo la finalidad ofrecer al lector algunas definiciones útiles para facilitar la comprensión de la metodología

#### **3.1 Red Vial Estructurante.**

De acuerdo a la [LGUC \(2016\)](#) la red vial estructurante corresponde al conjunto de vías existentes o proyectadas, que por su especial importancia para el desarrollo del correspondiente centro urbano, deben ser definidas por el respectivo instrumento de planificación territorial.

Las vías que componen la red vial estructurante se pueden clasificar en Local, Servicio, Colectora, Troncal y Expresa. Las características de cada una de estas categorías se encuentran especificadas en el [REDEVU \(2014\)](#).

#### **3.2 Ciudad de Tamaño Medio.**

De acuerdo a la Metodología para el Análisis de Sistemas de Transporte en Grandes Ciudades y Ciudades de Tamaño Medio ([MESPE](#)) se entiende por ciudades de tamaño medio todas aquellas que mantienen una población de entre 70 000 y 500 000 habitantes y presentan bajos niveles de congestión en la operación del sistema de transportes.

#### **3.3 Capacidad.**

De acuerdo al [HCM \(2000\)](#), la capacidad de una vía dispuesta para el tránsito de vehículos se define como el máximo número de vehículos que pueden pasar por un punto dado durante un periodo específico tiempo y bajo condiciones prevalecientes de la vía, el tráfico y control.

### 3.4 Modelo de Simulación de Monte Carlo.

De acuerdo a [Law y Kelton \(1991\)](#) El modelo de simulación de Montecarlo (MSM) es un esquema de análisis que emplea números aleatorios, los que distribuyen de acuerdo a una función de densidad de probabilidad uniforme entre 0 y 1, para ser usados en la solución de ciertos problemas estocásticos o determinísticos donde el paso del tiempo no juega un rol substancial.

Por ejemplo, supongamos que se quiere evaluar la siguiente integral:

$$I = \int_a^b g(x)dx$$

Donde  $g(x)$  es una función que no es integrable analíticamente. En la práctica, la simulación de Montecarlo no suele ser utilizada para evaluar una sola integral, puesto que en ese caso es más eficiente el uso de algún método numérico, resultando más útil en la resolución de problemas con múltiples integrales. Para ver cómo este problema determinístico puede aproximarse con la simulación de Montecarlo, diremos que  $Y$  es una variable aleatoria que puede ser expresada a través de  $(b - a)g(X)$ , donde  $X$  es una variable aleatoria continua que distribuye uniformemente en el intervalo  $[a, b]$  que será denotada por la expresión  $U(a, b)$ . Se tiene entonces que el valor esperado de  $Y$  corresponde a:

$$E(Y) = E[(b - a)g(X)]$$

$$E(Y) = (b - a)E[g(X)]$$

$$E(Y) = (b - a) \int_a^b g(x)f_x(x)dx$$

$$E(Y) = (b - a) \int_a^b \frac{g(x)dx}{(b - a)}$$

$$E(Y) = I$$

Donde  $f_x(x) = 1/(b - a)$  es la función densidad de probabilidad de  $U(a, b)$ . La expresión que permite estimar la esperanza de  $Y$  corresponde a la siguiente:

$$\bar{Y}(n) = \frac{\sum_1^n Y_i}{n} = (b - a) \frac{\sum_1^n g(X_i)}{n}$$

### 3.5 Modelo SATURN.

Para el presente estudio fue necesario el uso de un software de modelación que permitiese determinar los posibles estados del patrón de flujos luego de ir degradando la red. Para esta tarea se eligió un modelo macroscópico llamado SATURN (En el capítulo 3.2 se señala las razones que justifican el uso de este software) el cual está integrado por dos sub-modelos que serán explicados a continuación.

#### 3.5.1 Sub-Modelo de Asignación.

El sub-modelo de asignación necesita una red de modelación y una matriz de viajes para asignar los viajes a través de la red. El procedimiento usado por SATURN se basa en el principio de Wardrop del equilibrio de tráfico basado en el usuario el cual se puede resumir como “el tráfico se distribuye en las redes congestionadas de modo tal que todos los recorridos utilizados entre un par OD tienen el mismo y mínimo coste mientras que todos los recorridos no utilizados tienen costes más altos o iguales” (Ortúzar y Willemsum, 2008)

Para poder realizar dicho principio, SATURN se basa en el algoritmo de Frank Wolfe que pretende minimizar la siguiente función objetivo:



$$Z(n) = \sum_a^n \int_0^{V_a^{(n)}} C_a(x) dx$$

Donde  $C_a(x)$  es el costo del arco “a” en función de un conjunto de flujos “x”.

### 3.5.2 Sub-Modelo de Simulación.

La función del sub-modelo de simulación es calcular las demoras obtenidas para una cierta ruta especificada por el sub-modelo de asignación.

La ecuación de una curva flujo-demora es de la siguiente forma

$$\begin{aligned} t &= t_0 + av^n & v &\leq c \\ t &= t_0 + ac^n + b\left(\frac{v}{c} - 1\right) & v &> c \end{aligned}$$

$t_0$ : Es el tiempo de viaje a flujo libre (horas).

$v$ : Es el flujo en pcu/hr.

$c$ : Es la capacidad del arco en pcu/hr.

$b$ : Es una constante interna del programa y es igual a la mitad del periodo de tiempo a ser modelado (horas)

### 3.6 Modelo de distribución gravitacional doblemente acotado.

Finalmente, para poder predecir los flujos entre dos pares OD han sido desarrollados varios modelos de distribución siendo uno de ellos el Modelo Gravitacional que debe su nombre a que una de las primeras expresiones formales de este modelo era una analogía a la Ley de Gravitación Universal de Newton ([Ortúzar y Willemsum, 2008](#)). La ventaja del uso de este método es que no necesita utilizar una estructura de viajes observada por lo que

también es llamado Modelo Sintético. La expresión que define este modelo corresponde a la siguiente:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij})$$

Donde  $T_{ij}$ : Son los viajes entre las zonas  $i$  y  $j$

$O_i$ : Son los viajes generados por la zona  $i$ .

$D_j$ : Son los viajes atraídos por la zona  $j$ .

$A_i$  y  $B_j$ : Son factores de balanceo.

$f(c^{ij})$ : Es la función de resistencia al viaje.

La función de resistencia al viaje utilizada en este estudio corresponde a la función exponencial que tiene la siguiente forma:

$$f(c^{ij}) = e^{-\beta c_{ij}}$$

#### **4 METODOLOGIA.**

La metodología para determinar el efecto en el nivel de servicio de redes de transporte urbano producto de eventos catastróficos requiere ciertas consideraciones en cuanto a la oferta, la demanda y la estrategia de daño, las que en términos simples corresponden a la identificación de características comunes de las ciudades estudiadas y la toma de una serie de supuestos necesarios para estimar ciertos valores de entrada necesarios para los modelos utilizados. Lo anterior permitió llevar a cabo la metodología propuesta, la que se desarrolló a través de los siguientes pasos.

- a. Construcción de una Red Vial Ficticia (RVF) capaz de representar en alguna medida las características de mayor interés.
- b. Construcción de una matriz oferta-demanda (MOD) capaz de representar en alguna medida los patrones de viaje.
- c. Elección de un modelo de tráfico capaz de entregar resultados en función de la información disponible.
- d. Definición de una estrategia de daño consecuente con las herramientas metodológicas e información disponible.
- e. Simular las variaciones del nivel de servicio producto de pérdidas de capacidad.
- f. Análisis de la variación en el nivel del servicio de acuerdo a los resultados entregados por la modelación.
- g. Análisis de significancia de los resultados obtenidos luego de aumentar la capacidad de la Red.

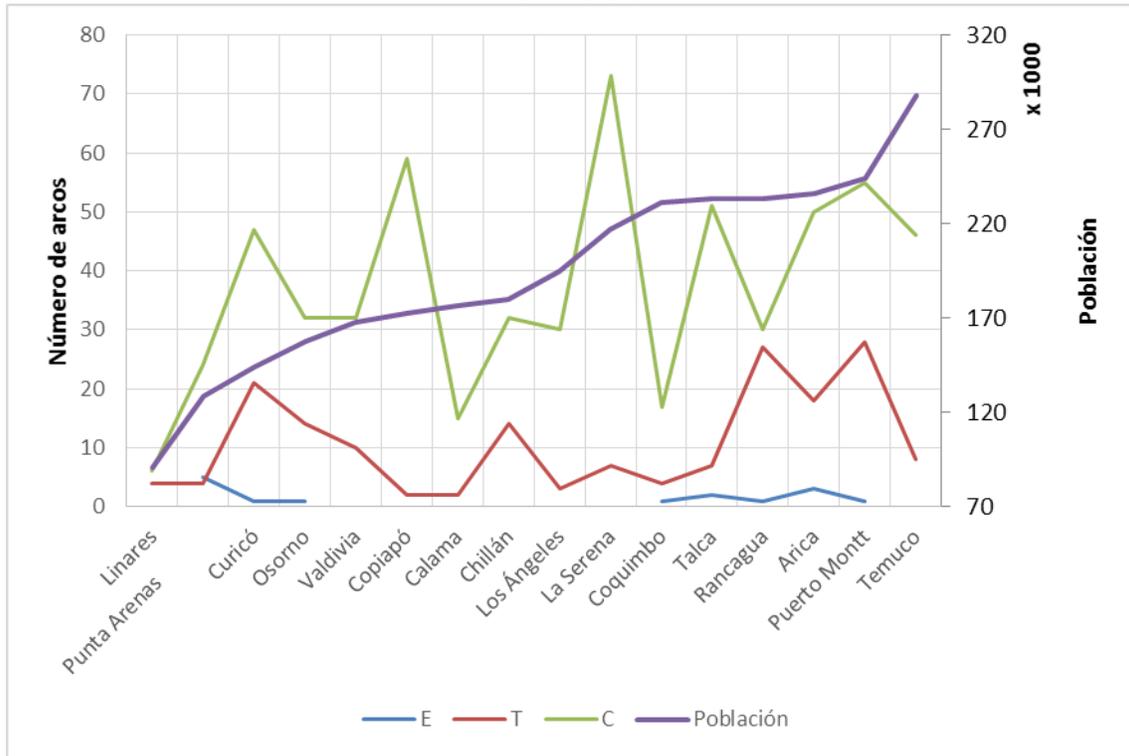
A continuación se explica con mayor detalle cada uno de los pasos de la metodología.

#### **4.1 Construcción de RVF.**

Para construir una RVF que representara la característica, de mayor interés para este trabajo, se estudiaron los principales rasgos de la Red Vial Estructurante (RVE) de cada una de las ciudades chilenas de tamaño medio (CCTM). Se eligieron este tipo de ciudades principalmente por 2 razones: a) La construcción la red de una ciudad de gran tamaño se escapa de los alcances de este trabajo y b) en Chile existen 19 ciudades de tamaño medio que cuentan con documentación relacionada con su infraestructura vial.

Para la identificación de características comunes, se incluyó en el análisis variables como la cantidad de vías de cada tipo, la población y el área de cada ciudad, sin embargo, fue necesario tomar ciertas simplificaciones, específicamente, en cuanto al tipo de arcos a considerar, lo que significó la consideración de sólo las vías de mayor categoría correspondientes a Expresas, Troncales y Colectoras. De manera gráfica, y con ayuda de esquemas similares a la **Figura 4-1**, se buscaron patrones que permitieran visualizar alguna regularidad en cuanto a la topología de las ciudades de tamaño medio. Los gráficos ordenados de acuerdo a las demás cantidades pueden encontrarse en el **ANEXO 1**.

FIGURA 4-1 – DISTINTAS CARACTERÍSTICAS DE LAS CCTM ORDENADAS DE ACUERDO A LA POBLACION.



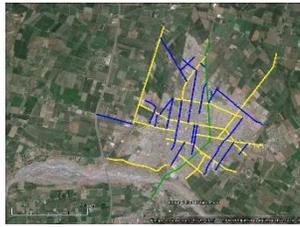
Fuente: Elaboración propia.

Para obtener esta información se utilizó principalmente el Plan Regulador Comunal (PRC) de cada ciudad. Es necesario considerar que las versiones disponibles más actualizadas de los PRC, dependiendo de la comuna estudiada, varían entre los años 1980 y 2014, motivo por el cual cada PRC presenta distintos niveles de sofisticación y claridad en la forma de presentar la información.

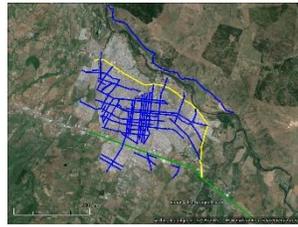
La estimación final de la cantidad de la cantidad de arcos y de su largo medio se determinó con la ayuda de Google Earth mientras que la velocidad y la capacidad de cada vía fueron determinadas en consideración de lo expuesto en el [REDEVU \(2014\)](#).

Finalmente, la estructura de la RVF se construyó luego de revisar detalladamente la distribución de cada una de las RVE. A modo de ejemplo la **Figura 4-2** muestra 3 RVE (la RVE de las demás ciudades pueden ser revisadas en el **ANEXO 2**)

FIGURA 4-2- RVE DE EN DISTINTAS CIUDADES DE CHILE



Rancagua



Talca



Punta Arenas

Fuente: Elaboración propia.

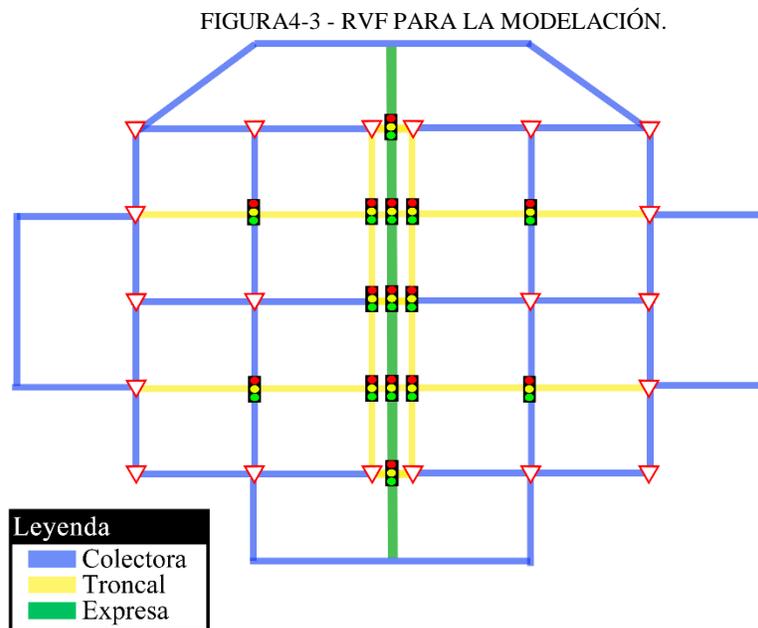
En color Verde, Amarillo y Azul se señalan las vías Expresas, Troncales y Colectoras respectivamente.

Luego examinar tanto las características como la forma de las distintas RVE en estudio se pudo concluir las siguientes características para la construcción de la RVF:

- a. En la mayoría de las ciudades estudiadas las vías colectoras rondan en torno a las 30 y presentan largos de aproximadamente 1 kilómetro. Rodean una gran área compuesta por zonas de atracción o generación de viajes.
- b. Las vías troncales son alrededor de 15 y poseen largos de poco más de un kilómetro. Aumentan la conectividad entre vías colectoras y permiten desplazarse entre una zona y otra, no obstante, en algunas ocasiones también rodean una zona de generación o atracción.
- c. Las vías expresas, que en general corresponden a la Ruta 5 o a la ex Ruta 5 en caso de que la ciudad posea un bypass, tienen una extensión de alrededor de 10 kilómetros y atraviesan los extremos norte y sur del límite urbano extendiéndose además, en algunos casos, por el centro de la Ciudad.

- d. En cuanto a la topología, las vías de las ciudades chilenas, debido a la herencia urbana transmitida por la colonización española, se distribuyen en forma de cuadrícula imitando a un tablero de ajedrez.

La **Figura 4-3** resume las características explicadas anteriormente.



Fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 4-1** muestra información más específica de acuerdo a las características de cada tipo de arco.

TABLA 4-1- PROPIEDADES DE ARCOS DE ACUERDO A SUS CATEGORÍAS.

Categoría	Largo [m]	Velocidad [km/hr]	Capacidad [veh/hr/pista]
Expresas	1 000	100	2200
Troncales	1 000	65	1800
Colectoras	1 000	35	1800

Fuente: Elaboración propia.

La red de la **Figura 4-3** anterior posee 104 de los cuales 36 son bidireccionales y 32 son unidireccionales.

Con respecto a las medidas de control, 20 intersecciones son controladas por señalización mientras que 15 son controladas por semáforo. El control por señalización se

definió para las intersecciones de cuatro “piernas” formadas por dos vías colectoras y para las intersecciones de 3 “piernas” en las formadas por una vía colectoras y una vía troncal. El control por semaforización se definió para las intersecciones en la que participasen una colectoras y una troncal, una expresa y una troncal y dos troncales.

## **4.2 Estimación de la demanda.**

La estimación de la demanda se realizó en dos etapas. En la primera se estimó la cantidad de viajes que se realizan típicamente en una CCTM, mientras que en la segunda se diseñar una matriz OD que fuese capaz de representar de manera ilustrativa las dinámicas de viaje que se dan generalmente en las ciudades CCTM. A continuación se explican los pasos a seguir en cada una de estas etapas.

### **4.2.1 Determinación del total de viajes.**

Para determinar un valor representativo de la cantidad de viajes totales realizados en una ciudad típica se recopiló información acerca del número de viajes diarios, la partición modal y la presencia de transporte público en las ciudades señaladas en la Tabla 3. Se tomó como base el trabajo [Investigación de Transporte en Chile \(2010\)](#) realizado por la CONICYT el cual aporta una visión actual de la investigación científica y desarrollo tecnológico en transporte y áreas asociadas. La **Tabla 4-2** muestra la información extraída de este documento.

TABLA 4-2- PROPIEDADES DE ARCOS DE ACUERDO A SUS CATEGORÍAS.

Ciudad	Año	Viajes	Motorizados			No Motorizado	
			Privado	Publico	otro	Caminata	Bicicleta
Arica	1 998	348 113	22%	38%	6%	33%	2%
Iquique	1 998	407 397	27%	38%	4%	30%	0%
Antofagasta	1 998	52 793	25%	48%	4%	23%	0%
Copiapó	1 998	220 335	19%	40%	6%	32%	2%
La Serena - Coquimbo	1 999	528 431	15%	44%	5%	34%	1%
Rancagua	2 006	670 869	32%	28%	5%	30%	4%
Curicó	2 003	24 571	19%	31%	5%	33%	12%
Talca	2 003	52 327	20%	33%	3%	37%	8%
Chillán	2 003	445 089	19%	26%	5%	41%	8%
Los ángeles	2 004	278 025	21%	29%	10%	36%	4%
Temuco	2 002	65 777	21%	40%	4%	33%	2%
Valdivia	2 002	375 766	23%	38%	4%	33%	2%
Osorno	2 002	363 818	20%	37%	3%	37%	3%
Puerto Montt	2 004	365 904	29%	32%	6%	33%	1%
Punta Arenas	2 005	226 498	33%	29%	9%	28%	1%
<b>Media</b>		<b>295 048</b>	<b>23%</b>	<b>35%</b>	<b>5%</b>	<b>33%</b>	<b>3%</b>

Fuente: Adaptado desde CONICYT, 2010

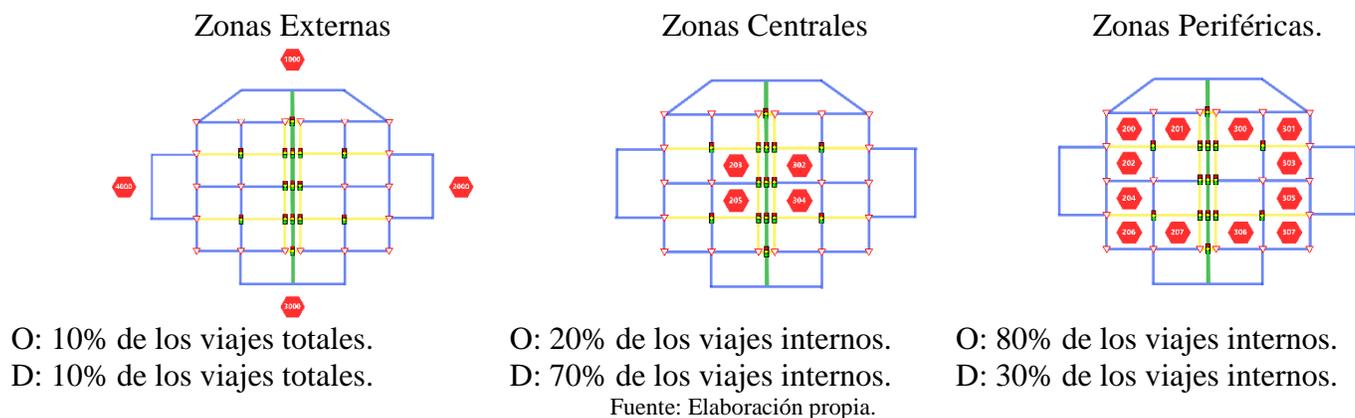
El promedio de viajes diarios se ajustó considerando solo el periodo punta mañana (el cual corresponde al 12% de los viajes diarios), la fracción de los viajes de carácter obligatorio (98% de acuerdo a [Ortuzar y Willumsen, 2008](#)) y la porción de vehículos motorizados (63% en promedio de acuerdo al estudio antes señalado). En este último punto fue necesario realizar un ajuste para incluir el efecto del transporte público. En estricto rigor, es necesario establecer un conjunto de rutas fijas por las cuales se desplace el transporte público, sin embargo, esta tarea se escapa del alcance del trabajo. Para compensar esto se estimó que en una ciudad de tamaño medio cada vehículo de locomoción colectiva es capaz de desplazar en promedio alrededor de 90 personas, durante el periodo punta mañana ([UDP, 2012](#)) para posteriormente usar un factor de vehículo equivalente. De esta manera se estimó en 5 951 viajes en vehículos equivalentes para el periodo estudiado.

#### 4.2.2 Construcción de la Matriz OD.

La construcción de la MOD se hizo usando el método gravitacional doblemente acotado. Para esto es necesario contar con un vector de origen, un vector de destinos, una función de costos y una función de resistencia al costo.

Los vectores origen y destino se estimaron luego de zonificar la RVF, estableciendo 3 tipos de zonas y distribuyéndolas alrededor de estas de acuerdo a la **Figura 4-4**.

FIGURA4-4 - ZONIFICACIÓN DE LA RVF.



Estos valores son propuestos con el objetivo de reflejar las característica más común en las ciudades chilenas durante la punta mañana, es decir, la alta generación de viajes desde las zonas dormitorio (periféricas) hacia las zonas de oportunidades (centrales).

La función de costos se construyó de manera proporcional menor distancia entre cada zona de origen y destino, de manera tal que a medida que la distancia entre dos zonas aumenta también lo hace el costo entre esas zonas.

Para la estimación de la función de resistencia al viaje se usó una función exponencial suponiendo un valor de 0.2 para el parámetro  $\beta$ .

Al aplicar el modelo gravitacional doblemente acotado se logró conseguir la MOD que se muestra en la **Tabla 4-3**.

TABLA 4-3– MATRIZ OD PARA LA RVF.

	200	201	202	203	204	205	206	207	300	301	302	303	304	305	306	307	1000	2000	3000	4000	O
200	0	11	12	78	10	52	9	7	9	7	61	7	39	5	6	5	12	7	6	13	357
201	11	0	10	65	7	53	8	8	10	9	62	8	49	7	7	7	12	7	7	9	357
202	12	10	0	69	11	69	10	7	8	8	54	7	42	5	6	5	9	6	7	12	357
203	10	8	9	0	6	56	6	7	8	8	53	7	42	6	6	6	8	6	7	8	268
204	11	7	12	50	0	74	13	12	6	5	47	5	56	8	8	8	8	7	9	13	357
205	7	7	9	56	9	0	10	9	6	5	44	5	51	7	8	7	7	6	9	8	268
206	9	8	10	52	13	78	0	12	5	5	40	4	58	8	9	8	6	7	12	13	357
207	7	8	7	56	11	69	12	0	6	5	44	5	63	9	10	9	7	7	13	10	357
300	9	9	8	65	6	43	5	6	0	12	70	11	56	6	7	6	13	10	7	7	357
301	7	9	8	59	5	40	5	5	12	0	79	13	51	10	6	9	12	13	6	7	357
302	8	8	7	53	6	43	5	6	9	10	0	9	56	6	7	6	9	8	7	6	268
303	6	8	7	55	5	37	4	5	11	13	73	0	70	12	7	10	9	12	7	6	357
304	5	6	5	42	7	52	7	8	7	7	56	9	0	9	8	9	7	8	8	6	268
305	5	7	5	46	8	57	8	9	6	11	51	12	73	0	11	12	7	13	9	7	357
306	6	7	6	51	8	62	9	10	7	6	55	7	65	11	0	11	7	9	12	7	357
307	6	7	5	47	8	57	8	9	7	9	51	10	74	12	11	0	6	13	11	7	357
1000	5	5	3	26	3	22	3	3	5	5	27	3	21	3	3	2	0	4	4	4	149
2000	3	3	3	20	3	20	3	3	4	6	27	5	26	5	4	5	4	0	3	2	149
3000	3	3	3	22	4	27	5	5	3	3	22	3	26	4	5	4	4	3	0	3	149
4000	6	4	5	26	5	26	6	4	3	3	20	3	20	3	3	3	4	2	3	0	149
D	134	134	134	937	134	937	134	134	134	134	937	134	937	134	134	134	149	149	149	149	

Fuente: Elaboración propia.

Si bien los patrones de viaje que desarrollan los usuarios se ven alterados inmediatamente luego de haber ocurrido una catástrofe natural, para los efectos de este estudio la demanda por viajes se considerará inelástica puesto que se supone que los daños sobre la red persisten a pesar de que la ciudad ha logrado en algún nivel continuar con sus actividades.

Teniendo la RVF y la matriz OD es posible modelar la asignación de flujos a través del modelo SATURN y obtener distintas medidas del nivel de servicio tanto para el estado Base (sin daño) como para la red degradada en distintos niveles.

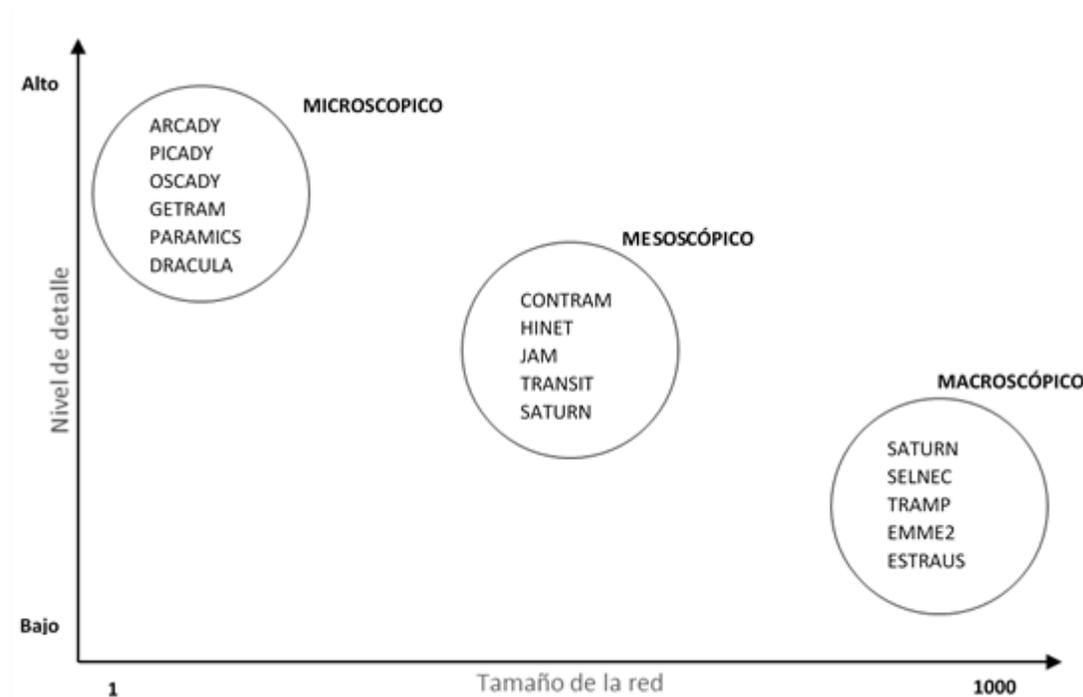
### 4.3 Elección del Modelo de Tráfico.

Las consecuencias de cambios en la demanda o en la oferta del sistema de transportes no son conocidos ni experimentables por los usuarios hasta que estos se materializan. En este

contexto se han desarrollado distintos modelos de tráfico que permiten estimar los efectos de cambios en algún elemento del sistema, permitiendo así que las decisiones no sean tomadas de manera intuitiva o antojadiza.

Para elegir de manera correcta un modelo de tráfico es necesario tener en cuenta variables como la magnitud del problema a modelar, el nivel de detalle necesario para visualizar los cambios y el tamaño de la red. La **Figura 4-5** representa, en función de las variables antes mencionadas el modelo más indicado para modelar una situación.

FIGURA 4-5-ELECCIÓN DE MODELOS DE TRÁFICO.



Fuente: Adaptado desde Apuntes Modelos de Tráfico.

Tomando en cuenta las características del problema como el horizonte de planificación (Estratégico), el nivel de detalle de la red (Bajo) y la cantidad de intersecciones (35) se decidió por usar un modelo Macroscópico.

Dentro de la gama de modelos Macroscópicos se eligió el modelo Simulation And Assignment of Traffic to Urban Road Network (SATURN) principalmente porque esta herramienta de análisis figura en las metodologías usadas para el análisis de ciudades de medio tamaño, gran tamaño y para evaluar los impactos en el sistema de transportes.

#### **4.4 Simulación.**

La forma en que una red de transporte urbano pierde capacidad luego de ser sometida a un evento catastrófico, depende en gran medida de la naturaleza del evento y de características topológicas, topográficas e infraestructurales de la ciudad, por nombrar algunas.

Es así como durante un evento de tipo hidrológico los arcos más afectados son aquellos que se encuentran en las cotas más bajas de la ciudad o están próximos a masas de agua; mientras, que durante erupciones volcánicas o incendios el daño varía en función de la distancia al foco. Por otro lado, el daño que provoca un sismo resulta muy difícil de predecir en cuanto a cuales y en qué medida los arcos de una red perderán capacidad.

La caracterización de los cambios en el nivel de servicio de una red de transporte urbano, debido a cualquiera de estos eventos, resulta muy costosa, si se pretende evaluar todos los posibles casos de daño, se vuelve necesario entonces realizar una simulación de los cambios en el nivel de servicio estudiando sólo una muestra de  $n$  casos de daño del universo de  $N$ .

De acuerdo a lo anterior, y considerando las herramientas de análisis disponibles, se decide usar el MSM para simular los cambios en el nivel de servicio producto de disminuciones en la capacidad.

## **4.5 Aplicación del Daño.**

En el capítulo 4.4 se hace referencia a un universo  $N$  de casos de daño. En este espacio tanto el nivel de daño como las combinaciones de arcos dañados para cada nivel corresponden a una variable aleatoria, por lo tanto, para aplicar el MSM se definieron y ordenaron los  $n$  casos de daño a modelar de acuerdo a las siguientes categorías:

### **4.5.1 Estrategia de daño.**

Una estrategia de daño corresponde a una forma de distribuir el daño sobre los arcos de la red que conserva cierta lógica. Para este trabajo se optó por una estrategia de daño aleatoria uniforme sobre toda la red, es decir, todos los arcos tienen la misma probabilidad de ser dañados, entendiendo el daño de un arco como la restricción de todos sus movimientos. Se eligió esta estrategia puesto que no necesita de ningún antecedente acerca del evento ni de información adicional de la red.

### **4.5.2 Niveles de daño.**

El nivel de daño corresponde al porcentaje de los arcos que se ven restringidos en sus movimientos. En este caso definieron 5 niveles de daño: 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de los arcos de la red. Se dañó la red hasta un 25% ya que en ese nivel ya se observó de forma clara la tendencia de los cambios en el nivel de servicio.

### **4.5.3 Escenarios de daño.**

Un escenario aleatorio de daño corresponde a una combinación aleatoria de arcos que son restringidos. Cada nivel de daño  $k$  cuenta con 20 escenarios de daño los cuales se toman como base para el nivel de daño  $k+1$  restringiendo de manera aleatoria la cantidad de arcos que hagan falta. A modo de ejemplo la **Figura 4-6** muestra todos los niveles de daño para el escenario número 1.

FIGURA 4-6- ESCENARIO NÚMERO 1 A TRAVÉS DE TODOS LOS NIVELES DE DAÑO.

Nivel de daño				
5%	10%	15%	20%	25%
49-48	49-48	49-48	49-48	49-48
40-50	40-50	40-50	40-50	40-50
41-40	41-40	41-40	41-40	41-40
47-37	47-37	47-37	47-37	47-37
59-49	59-49	59-49	59-49	59-49
-	40-39	40-39	40-39	40-39
-	30-31	30-31	30-31	30-31
-	61-60	61-60	61-60	61-60
-	30-20	30-20	30-20	30-20
-	-	48-49	48-49	48-49
-	-	49-39	49-39	49-39
-	-	39-49	39-49	39-49
-	-	39-38	39-38	39-38
-	-	18-28	18-28	18-28
-	-	29-39	29-39	29-39
-	-	-	100-16	100-16
-	-	-	32-42	32-42
-	-	-	27-17	27-17
-	-	-	28-27	28-27
-	-	-	51-41	51-41
-	-	-	-	40-30
-	-	-	-	31-30
-	-	-	-	28-18
-	-	-	-	50-40
-	-	-	-	105-61

Fuente: Elaboración propia.

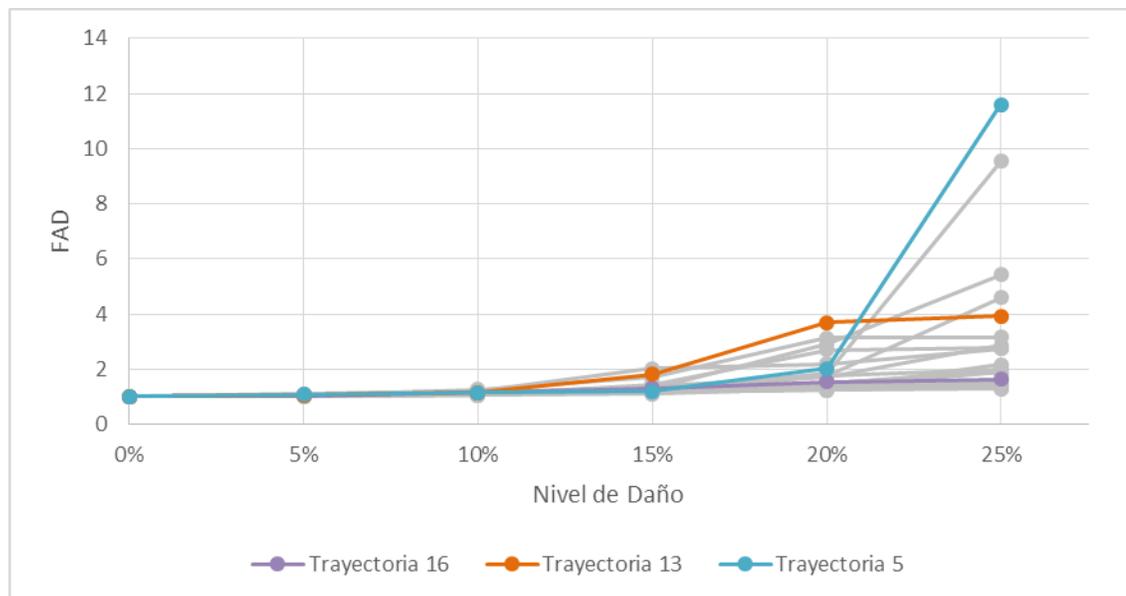
## 5 RESULTADOS.

Los resultados obtenidos luego de la etapa de modelación permiten entender el comportamiento de una red luego de ser degradada gradualmente hasta la pérdida del 25% de los arcos de la red. La medida del nivel de servicio en todos los casos fue la demora total medida en veh-hr , sin embargo, para facilitar el análisis se expresa de forma adimensional a través del índice Factor de Aumento de las Demoras.

$$FAD_x = \text{Demoras en red con un daño del } X\% / \text{Demoras en red sin daño}$$

Al analizar los cambios en el nivel de servicio para cada escenario a través de todos los niveles de daño se pueden identificar 3 situaciones de interés. En la **Figura 5-1** se muestran tres trayectorias representativas.

FIGURAS-1 - .CAMBIO EN EL FACTOR DE AUMENTO DE LAS DEMORAS PARA TRES TRAYECTORIAS DE DAÑO.



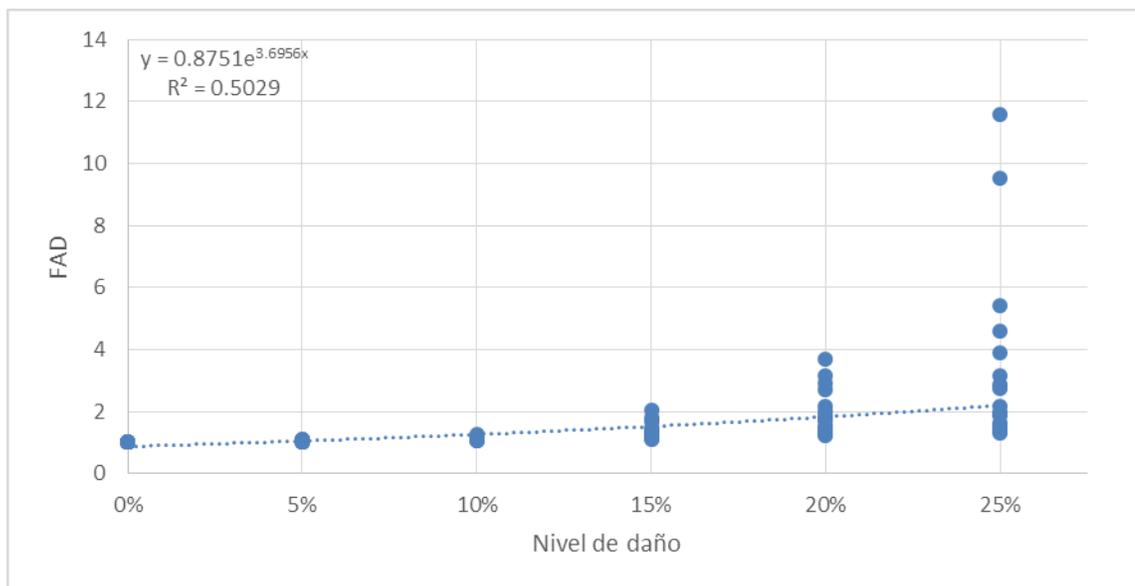
Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 5-1** muestra cómo las distintas trayectorias de daño van cambiando a medida que la RVF va siendo degradada progresivamente. Se puede ver que hasta el nivel de

daño 10% el FAD no hay mayores diferencia entre una trayectoria u otra. En el caso de la trayectoria 16, los FAD siguen siendo bastante marginales llegando a un incremento máximo de un 63% con respecto a la red sin daño. Por otro lado, aunque el FAD<sub>20%</sub> para la trayectoria 13 es 3.69 este solo crece 22 puntos porcentuales en el nivel de daño 25%. Finalmente el caso más desfavorable es el de la trayectoria 5, presentando un FAD<sub>25%</sub> de aproximadamente. En el ANEXO 3 el lector puede revisar cada una de las trayectorias de daño obtenidas para la red original.

La **Figura 5-2** muestra como los FAD asociados a cada uno de los escenarios de daño y una línea de tendencia de tipo exponencial.

FIGURAS-2 - .FACTOR DE AUMENTO DE LAS DEMORAS PARA TODOS LOS NIVELES DE DAÑO.

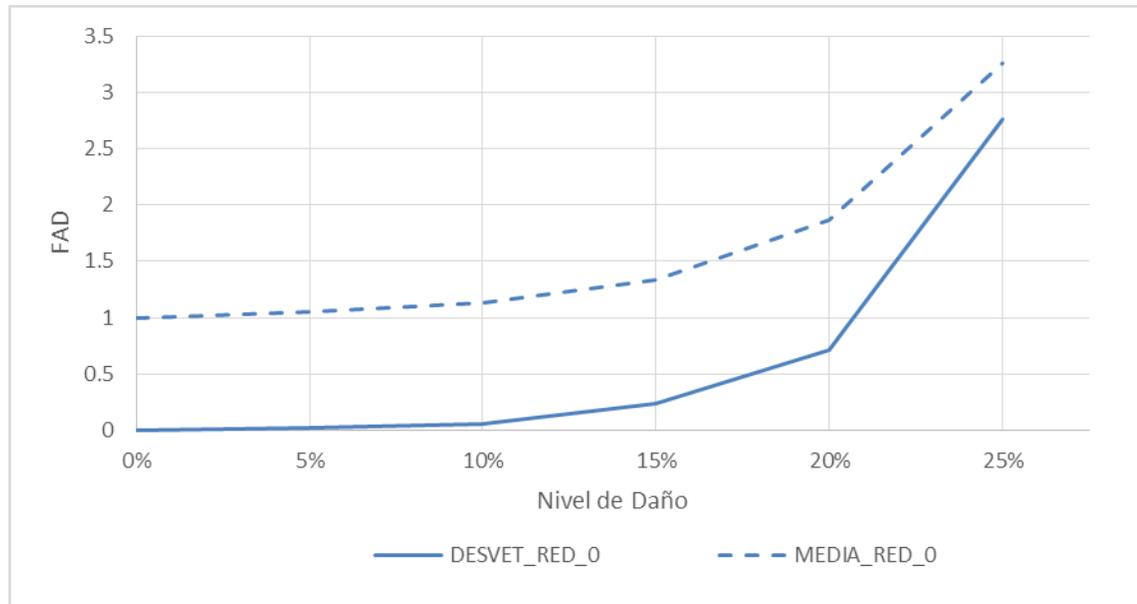


Fuente: Elaboración propia.

Si bien en los primeros niveles de daño la curva se ajusta bastante a los valores observados no es hasta el 15% de daño que los FAD comienzan a alejarse de la curva ajustada. Esto se hace mucho más visible en los niveles de daño 20% y 25% donde a pesar de que el FAD varía de 1.23 a 3.69 y de 1.29 a 11.59 respectivamente, sus valores se concentran en torno al 2.

Para complementar lo expuesto en el párrafo anterior, la **Figura 5-3** muestra el cambio de la media y la desviación estándar de las de demoras asociadas a cada nivel de daño.

FIGURA5-3 - .CAMBIO EN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y MEDIA DEL FACTOR DE AUMENTO DE LAS DEMORAS PARA TODOS LOS NIVELES DE DAÑO.

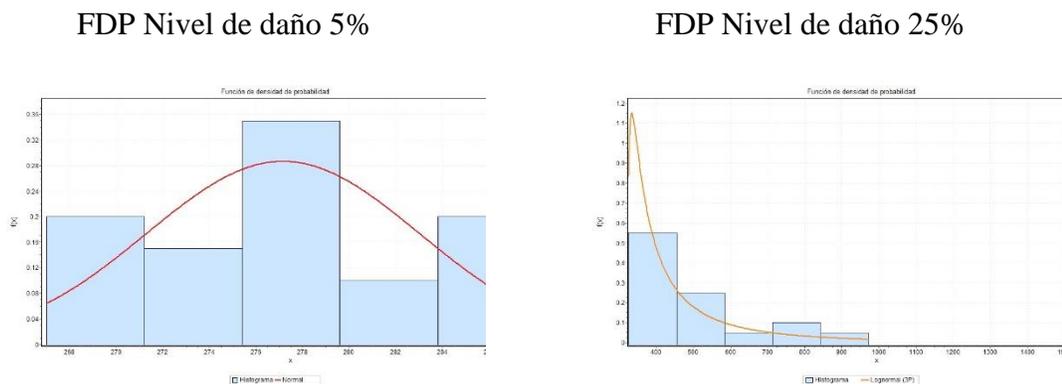


Fuente: Elaboración propia.

Para los dos primeros niveles de daño, tanto la desviación estándar como la media del FAD va aumentando paulatinamente. Desde el nivel de daño 15% la desviación estándar demoras va creciendo de manera acelerada en cada nivel de daño. Se puede apreciar que en el último nivel de daño los dos parámetros estadísticos son bastante similares.

Al estudiar por separado cada uno de los niveles de daño se logró determinar que en los dos primeros las demora distribuyen de forma Normal, mientras que en las tres restantes distribuyen de forma Log-normal. La **Figura 5-4** muestra las FDP para dos niveles de daño.

FIGURA5-4 - FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA LOS NIVELES DE DAÑO 5% Y 25%.



Fuente: Elaboración Propia

En el caso del 5% de daño, los valores se agrupan de manera simétrica en torno a las tres medidas de tendencia central, mientras que en el 25% la media es mayor a la moda y los valores se concentran de forma asimétrica por debajo de esta.

Los gráficos de las funciones de densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada de todos los niveles de daño pueden ser revisados en el **ANEXO 4**.

## 6 APLICACIÓN.

Una posible aplicación de esta metodología es la cuantificación del cambio en la resiliencia de un sistema de transporte urbano producto de una mejora en su capacidad. Para esto se propusieron dos niveles de mejora en la capacidad de la red:

- a. M1 – Gestión de corto plazo : Se modificó la capacidad de los arcos contenidos entre los nodos 27, 28, 29, 30, 31 y 32 pasando de 1800 veh/hr-pista a 2200 veh/hr.
- b. M2 – Gestión de corto y largo plazo: Además de M1 la vía comprendida entre los nodos 37, 38, 39, 40, 41 y 42 se convierte en una vía de doble calzada con 2 pistas por sentido.

Ambas mejoras provocaron un aumento en el nivel de servicio de la red luego de ser degradada de acuerdo a los distintos niveles de daño, no obstante, a cada serie de demoras se le aplicó un test de significación estadística (t student) para determinar si las demoras obtenidas fueron significativamente menores.

Los resultados de estas pruebas se resumen en la **Tabla 6-1**.

TABLA 6-1– TETS DE SIGNIFICACIÓN PARA LAS MEJORAS APLICADAS.

RED	NDD	Media	Desvest	t
RVF+M1	5%	276.9	5.9	-0.14
	10%	299.4	13.9	-0.03
	15%	5.8	0.2	-0.30
	20%	6.1	0.3	0.00
	25%	6.5	0.6	-0.01
RVF+M2	5%	287.0	4.9	-2.49
	10%	306.9	11.7	-1.95
	15%	5.9	0.1	-0.85
	20%	6.1	0.3	-0.94
	25%	6.4	0.6	-0.86
t(0.05,38)				-1.69

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los valores obtenidos, solo en las RED M2, en los niveles de daño 5% y 10%, no se rechaza la hipótesis nula. En el resto de los casos la disminución de las demoras resultó ser no significativa,

El **ANEXO 5** contiene los gráficos que comparan las FDP del nivel de servicio entre la red original la red luego de aplicadas las mejoras.

## **7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Con respecto al marco teórico, existe una amplia gama de estudios que abordan la temática de la vulnerabilidad y la resiliencia, pudiéndose encontrar trabajos teóricos, recopilatorios, casos de estudio y evaluaciones económicas. A pesar de que en su mayoría, los trabajos consultados tienden a estudiar las repercusiones generadas por eventos sísmicos, hay investigadores que se han enfocado en capturar los efectos de otro tipo de eventos. Se puede decir que no existen mayores limitaciones teóricas para aplicar metodologías existentes o diseñar nuevas metodologías dirigidas especialmente a ciudades de Chile. Cabe señalar que el desarrollo de investigaciones en esta línea de estudio sería beneficioso para nuestro país, por la regularidad con que se ve expuesto a eventos que perturban de manera considerable el sistema de transportes.

El mayor inconveniente para la realización de este estudio surgió durante la etapa de recopilación de información para la estimación de oferta y demanda de transporte, puesto que los documentos disponibles están desactualizados. En cuanto a la oferta, la temporalidad de los PRC fluctúa entre el año 1980 y el 2014, mientras que para la demanda los estudios más recientes datan del año 2005. Lo anterior influye directamente sobre los niveles de saturación de la red, los cuales están en torno al 20%. Si bien esto puede parecer un problema, no existen mayores consecuencias negativas, puesto que si se hubiese trabajado con valores más altos de saturación se observaría un comportamiento similar pero a niveles más bajos de daño.

La metodología propuesta permitió caracterizar los cambios que produce un evento catastrófico sobre el nivel de servicio de un sistema de transporte urbano, estimando en cada nivel de daño una serie de escenarios con las probables disminuciones en el nivel de servicio.

Al estudiar cada nivel de daño de forma agregada, se observó que el promedio y la desviación estándar de las demoras fueron aumentando a medida que se degradó la red, especialmente en niveles altos de daño. Es claro que el aumento del valor medio es producto de la disminución en la redundancia de los arcos de la red, lo que incrementa la saturación en las vías y por ende, el tiempo de viaje desde una zona a otra. Por otro lado, el aumento de la desviación estándar es causado por aparición de valores extremos en los niveles más altos de daño. Estos valores extremos se deben al daño de un conjunto de arcos (específico en cada caso) que dificultan la salida y el ingreso de una o varias zonas. Posteriormente, al trabajar en un nivel más desagregado, se logró ajustar a cada nivel de daño una función de densidad de probabilidad para las demoras. Es así como se determinó que en los dos primeros niveles de daño (5% y 10%) las demoras distribuyen de forma normal, mientras que en los niveles de daño más altos (15%, 20% y 25%) las demoras distribuyen de forma log-normal. Lo anterior permite caracterizar la forma en que se distribuyen los cambios en el nivel de servicio de acuerdo a cada nivel de daño. En efecto, para el primer caso las demoras se agrupan en torno a la moda (que coincide con la media y la mediana) de forma simétrica, es decir, las demoras ubicadas a una misma distancia por sobre y bajo de la media tienen la misma densidad de probabilidad, por el contrario, en los niveles de daño superiores, la media es mayor a la moda y los valores de las demoras distribuyen de forma asimétrica en torno a esta, siendo la probabilidad más densa para los valores menores a la moda.

El aumento en las demoras pudiese ser valorizado, en los primeros niveles de daño, de manera simple estableciendo una relación entre el valor del tiempo y las demoras asociadas al nivel de daño. Sin embargo, en los niveles más altos de daño sería necesario preguntarse si sectores estratégicos de la economía están dispuestos a asumir los posibles

aumentos en los tiempos de viajes y como esto afecta al desarrollo de las demás actividades productivas.

Este comportamiento frente al daño se replicó en la red luego de haber implementado dos niveles de mejoras en la capacidad. Como se esperaba, en ambos casos, la red mejorada se comportó de forma más resiliente, es decir, disminuyendo las demoras en cada escenario de daño, sin embargo estas mejoras no fueron significativamente menores excepto en los niveles 5% y 10% de la red, aplicada la mejora M2.

Lo anterior indica que las mejoras en infraestructura aplicadas a la red estudiada, no significan necesariamente aumentos en el nivel de servicio durante escenarios de daño. Sin embargo, es necesario considerar que en este estudio las mejoras en infraestructura consideraron aumentar la oferta existente por medio del aumento de capacidad y no por la implementación de nuevas vías, lo que en algunos casos, si podría significar disminuciones en las demoras durante escenarios e daño.

Finalmente un elemento muy determinante para este estudio fue la serie de supuestos asumidos a la hora de diseñar la RVF y la MOD, puesto que cualquier modificación sobre estos elementos (distribución de los viajes, medidas de control, topología, etc) modificaría la magnitud de los resultados obtenidos. Por lo anterior se recomienda repetir la metodología en un sistema real, que cuente con mejores niveles de información en cuanto a la oferta y demanda, para cuantificar, de manera más precisa, el costo que significa para la economía asumir las disminuciones en el nivel de servicio producto de eventos catastróficos.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

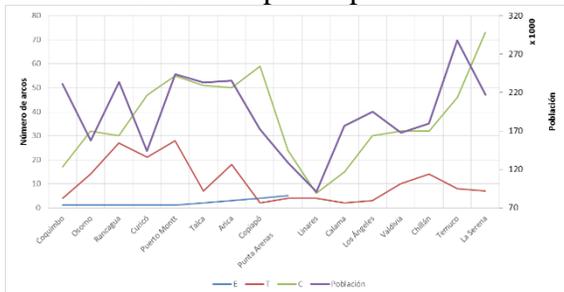
- Alvares, P. (2015). *Modelos de Tráfico*. Presentation, Universidad del Bío-Bío, Concepción.
- Berdica, K. (2002). An Introduction to the road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9, 117-127.
- Berdica, K., & Mattsson, L. (2007). Vulnerability: A Model-Based Case Study of the Road Network in Stockholm. *Critical Infrastructure*, 81-106.
- Demograficas y Vitales | Instituto Nacional de Estadísticas | INE 2015*. (2002). *Ine.cl*. Retrieved 22 December 2015, from [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/familias/demograficas\\_vitales.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php)
- Duan, Y., & Lu, F. (2014). Robustness of city road networks at different granularities. *Physica A*, 441, 21-34.
- Edrissi, A., Nourinejad, M., & Roorda, M. (2015). Transportation network reliability in emergency response. *Transportation Research*, E(80), 56-73.
- Highway capacity manual*. (2010) (4th ed., p. 25).
- Hollnagel, E. (2011). *The Scope of Resilience Engineering* (p. xxix-xxxix).
- Kaplan, S., & Garrick, B. (1981). On The Quantitative Definition of Risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11-27.
- Khademi, N., Balaei, B., Shahri, M., Mirzaei, M., Sarrafi, B., Zahabuin, M., & Mohaymany, A. (2016). Transportation network vulnerability analysis for the case of a catastrophic earthquake. *International Journal Of Disaster Risk Reduction*, 12, 234-254.
- Law, A., & Kelton, D. (1991). *Simulation, Modeling & Analysis* (2nd ed., p. 113). McGraw-Hill.
- Mattsson, L., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems : “ A discussion of recent research. *Transportation Research Part, A*(81), 16-34.

- McDaniels, T., Chang, S., Cole, D., Mikawoz, J., & Longstaff, H. (2008). Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. *Global Environmental Change, 18*, 310-318.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, (2009). *Manual de Vialidad Urbana: Recomendaciones para el Diseño de elementos de infraestructura urbana*. Santiago.
- Nicholson, A. (2003). Transport Network Reliability Measurement and Analysis. *Transportes, XI* (Diciembre 2003), 49-62.
- Observatorio Urbano - MINVU. Observatoriourbano.cl*. Retrieved 22 December 2015, from [http://www.observatoriourbano.cl/Ipt/busca\\_decreto.asp](http://www.observatoriourbano.cl/Ipt/busca_decreto.asp)
- Omer, M., Mostashari, A., & Nilchiani, R. (2011). Measuring the Resiliency of the Manhattan Points of Entry in the Face of Severe Disruption. *American J. Of Engineering And Applied Sciences, 4*(1), 153-161.
- Ortigoza, J., & Menendez, M. (2014). Traffic performance on quasi-grid urban structures. *Cities, 36*, 18-27.
- Ortuzar, J., & Willumsem, L. (2008). *Modelos de Transporte* (pp. 259-263). Santander: Universidad de Cantabria.
- Taylor, M. (2013). Travel through time: the story of research on travel time reliability. *Transportmetrica B: Transport Dynamics, 1*(3), 174-194.
- Urena, N. (2010). *Transportation Network Resiliency: A Fuzzy Systems Approach* (All Graduate Theses and Dissertations). Utah State University.
- Yee, A., Leung, S., & Wesemann, L. (1996). The 1994 Northridge earthquake: a transportation impact overview. *Transport Research, Circular 462*, 7-19.

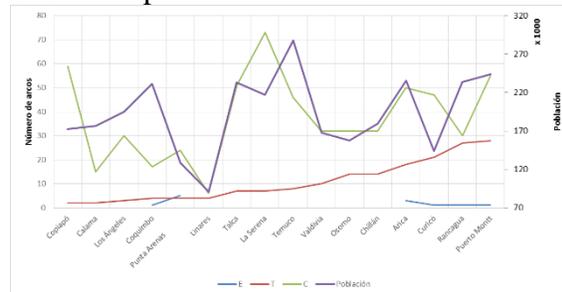
## 9 ANEXOS.

### ANEXO 1 – Características de interés de ciudades de tamaño medio ordenadas de acuerdo a distintas variables.

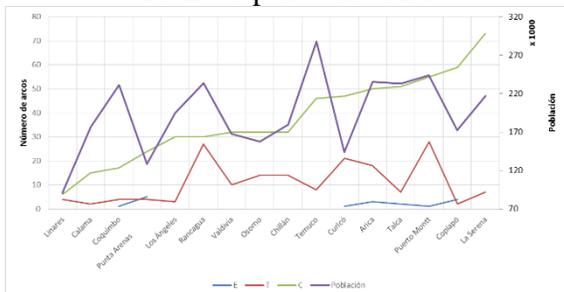
Ordenado por Expresas.



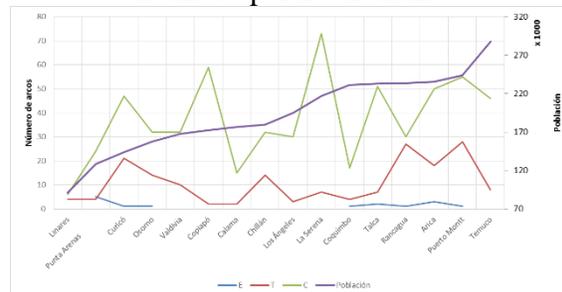
Ordenado por Troncales.



Ordenado por Colectoras.



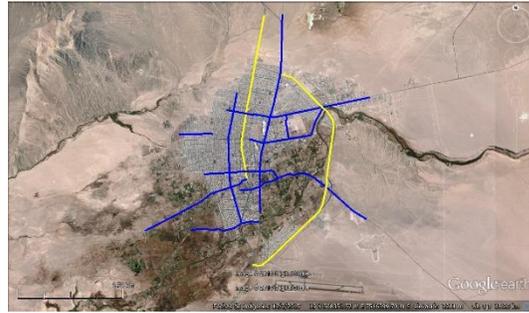
Ordenado por Población.



**ANEXO 2 – Red vial estructurante para cada una de las ciudades de tamaño medio.**



**Arica**



**Calama**



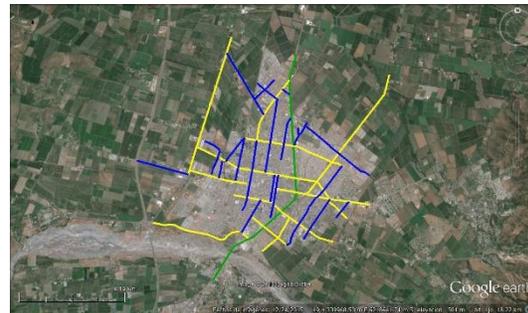
**Copiapó**



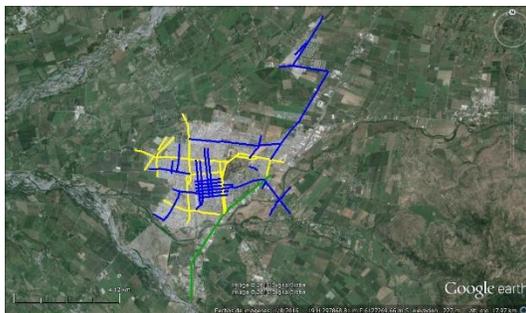
**La Serena**



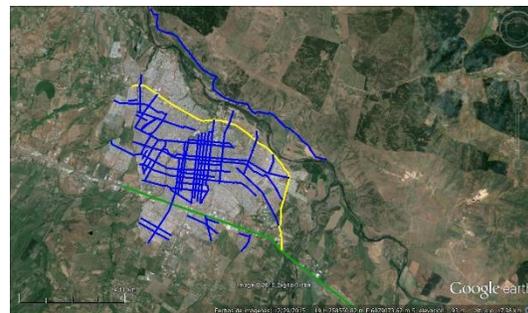
**Coquimbo**



**Rancagua**



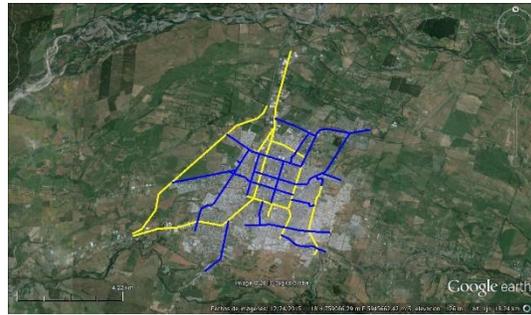
**Curicó**



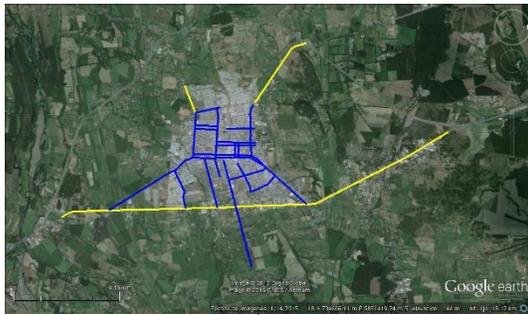
**Talca**



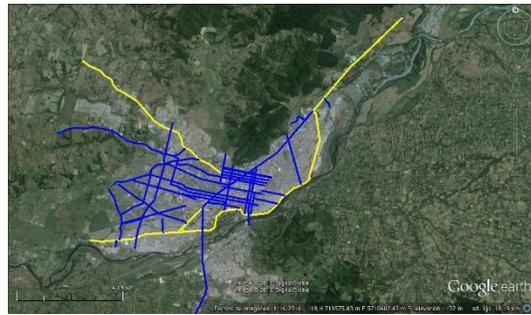
Linares



Chillán



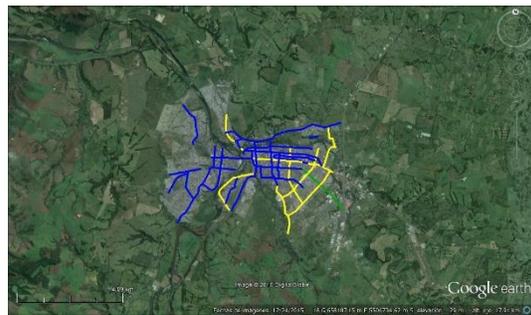
Los Ángeles



Temuco



Valdivia



Osorno

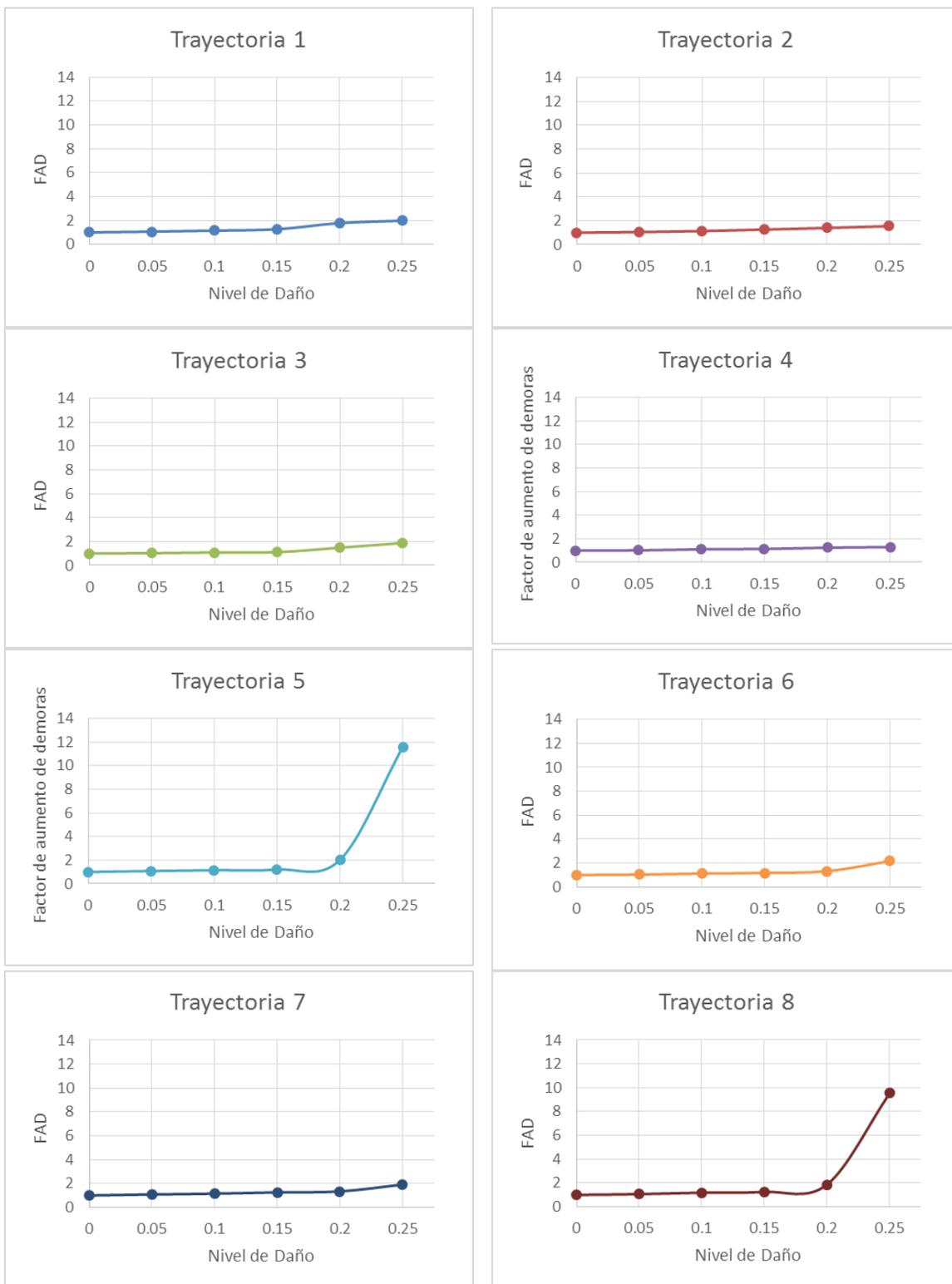


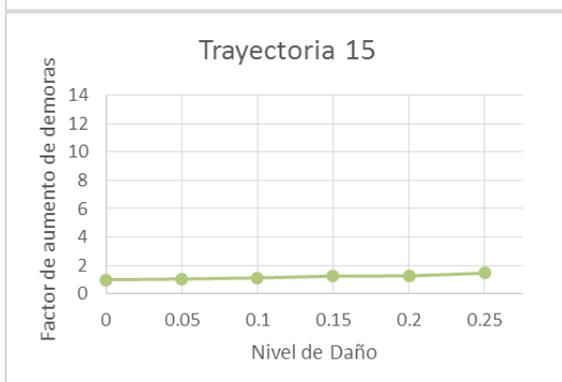
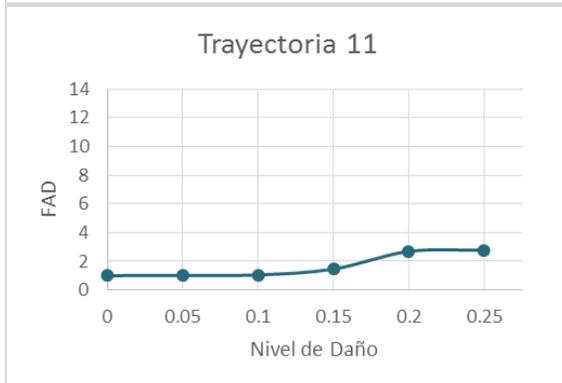
Puerto Montt

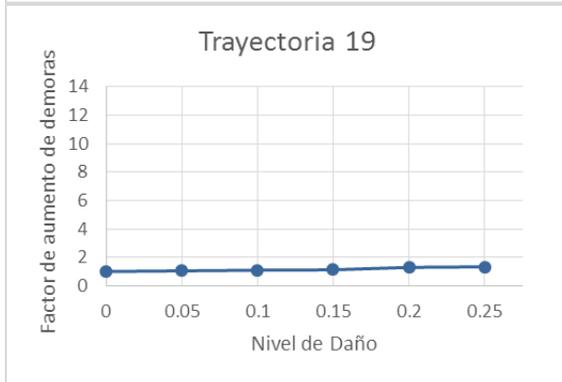


Punta Arenas

**ANEXO 3 – Trayectorias de daño para la red inicial.**

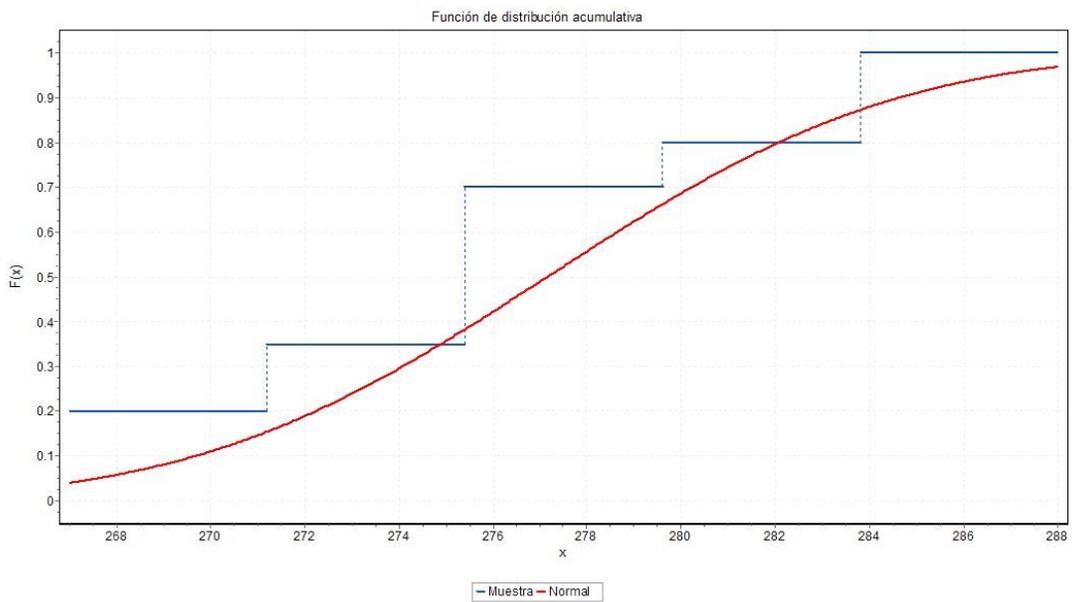
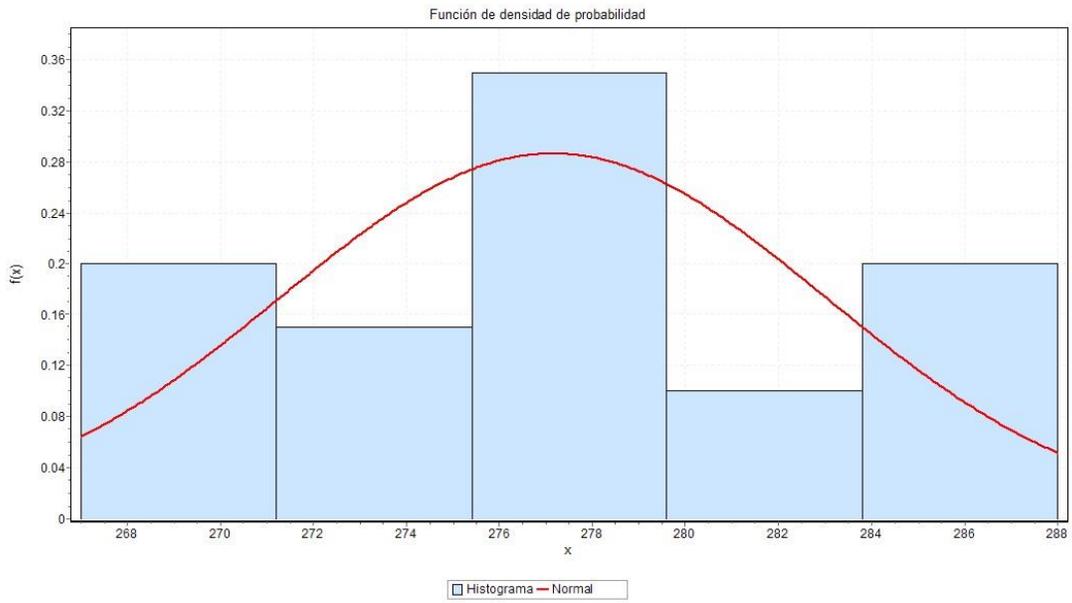




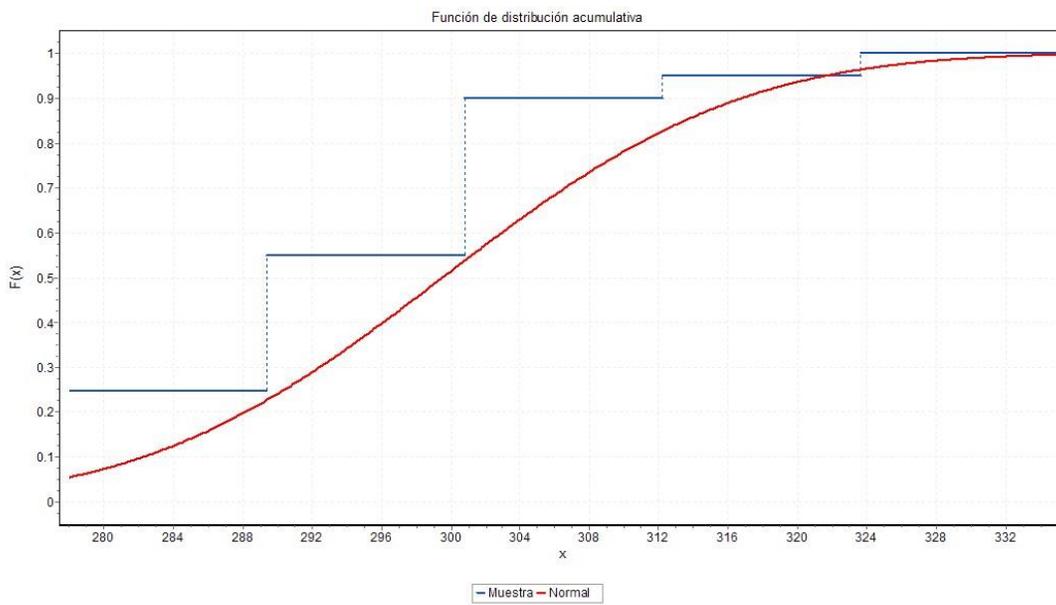
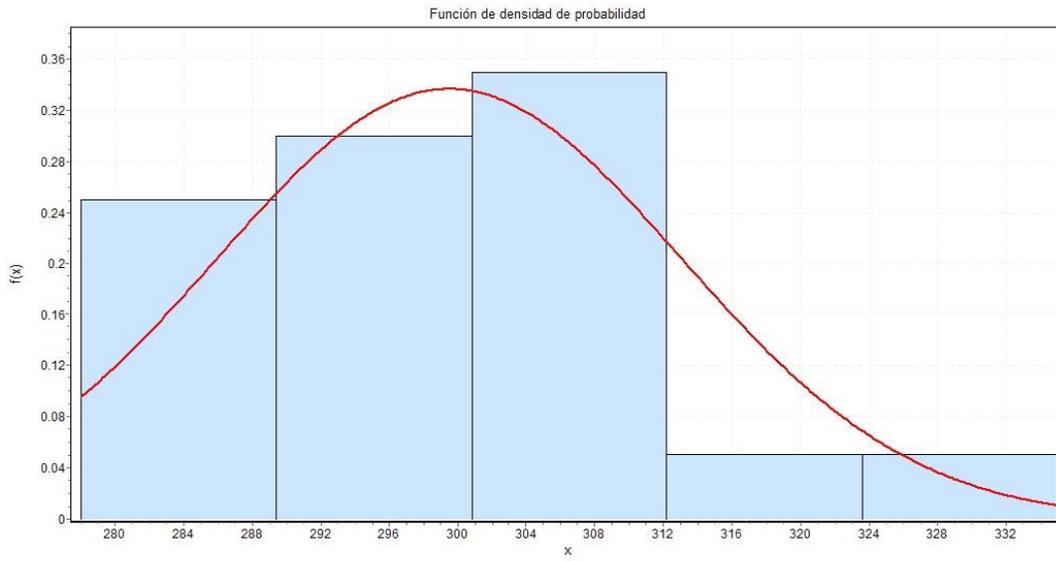


**ANEXO 4 – Funciones de densidad de probabilidad y de densidad de probabilidad acumulada para cada nivel de daño.**

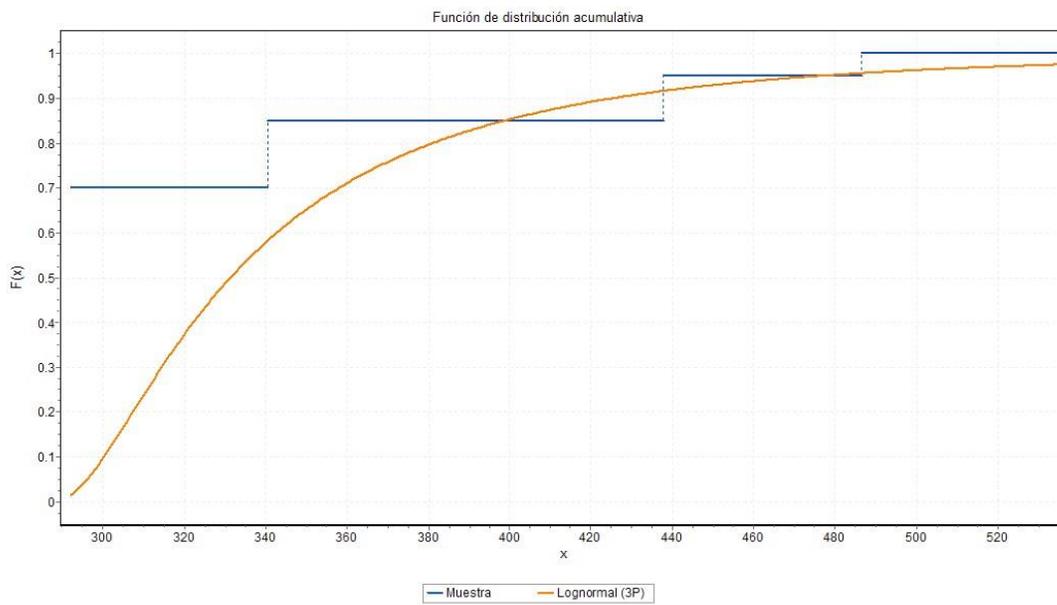
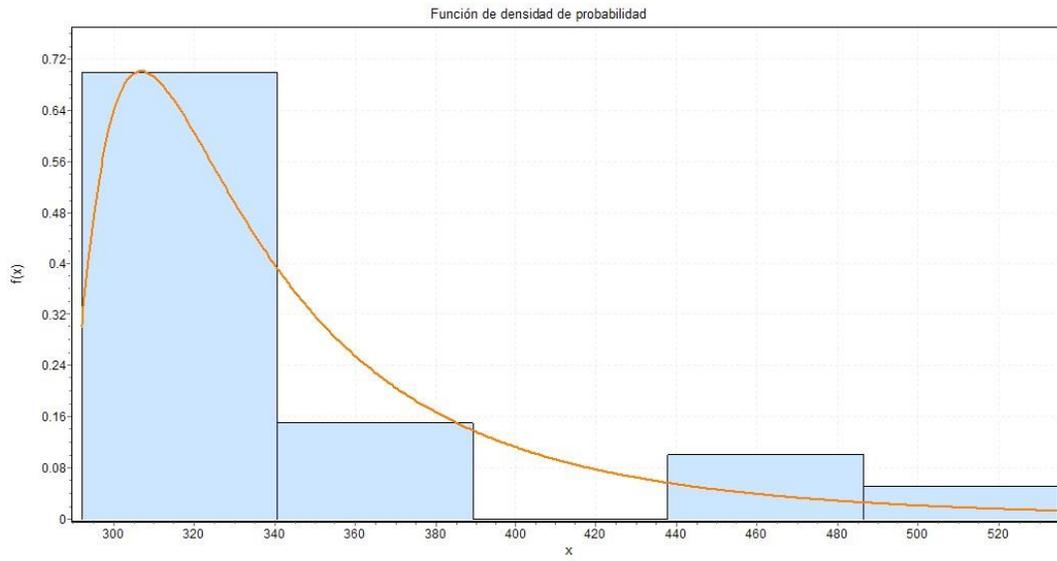
Nivel de daño 5%



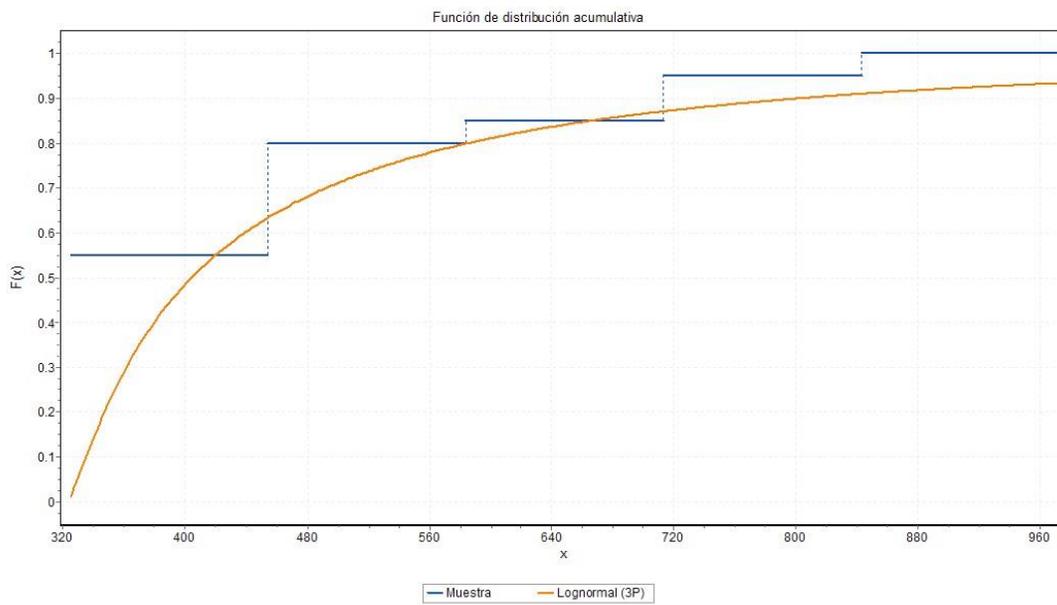
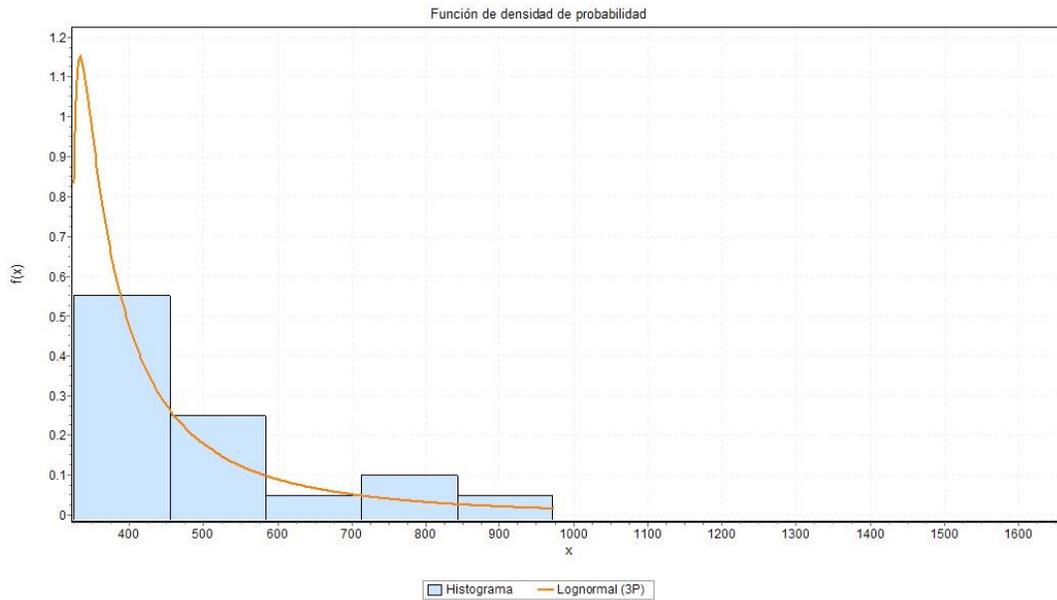
### Nivel de daño 10%



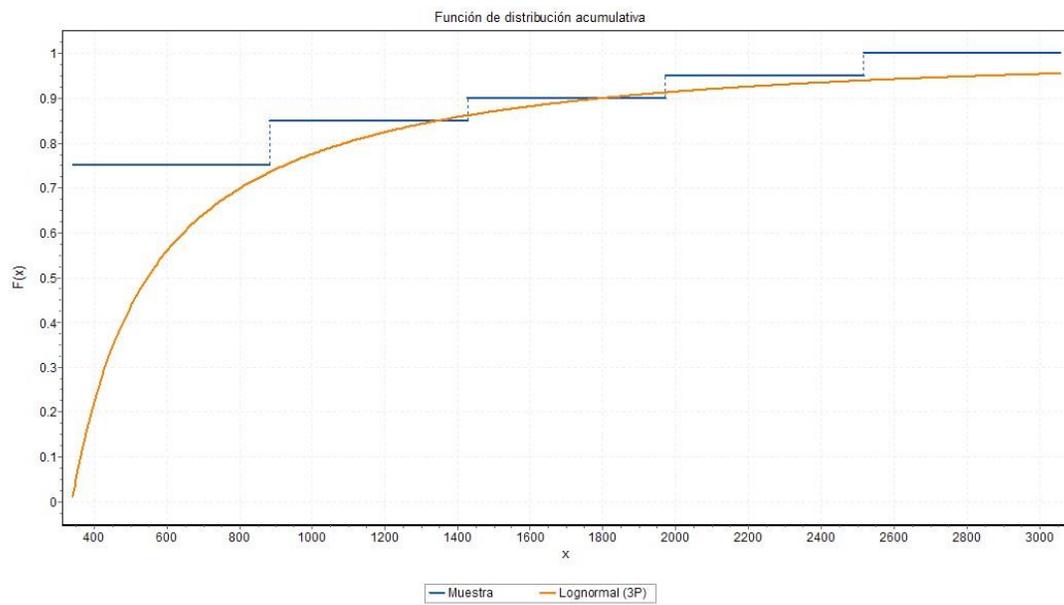
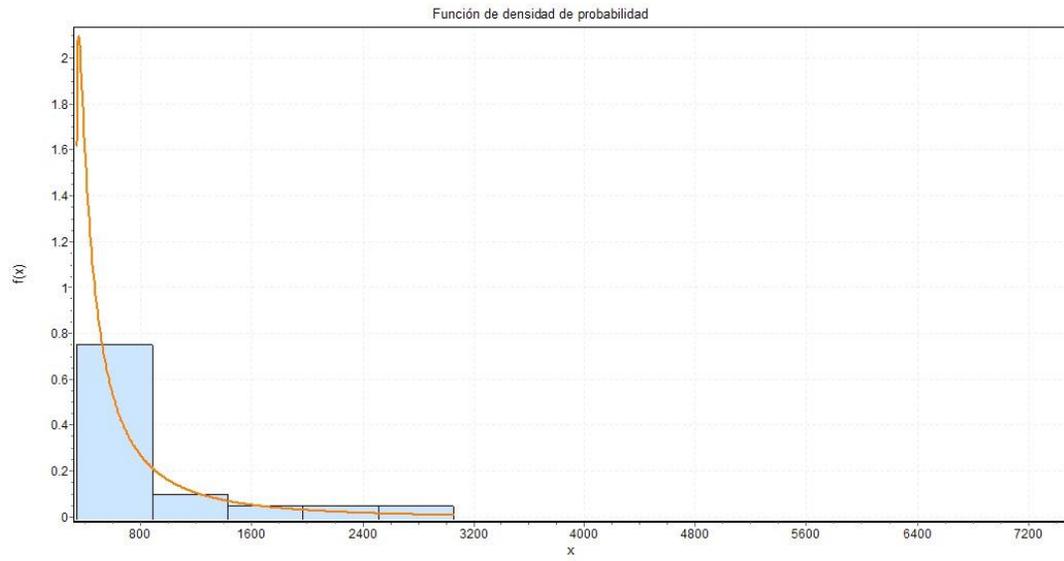
## Nivel de daño 15%



## Nivel de daño 20%

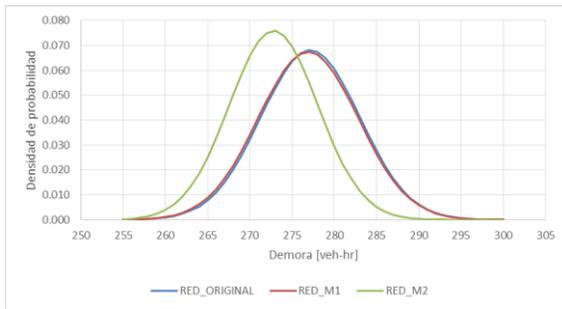


## Nivel de daño 25%

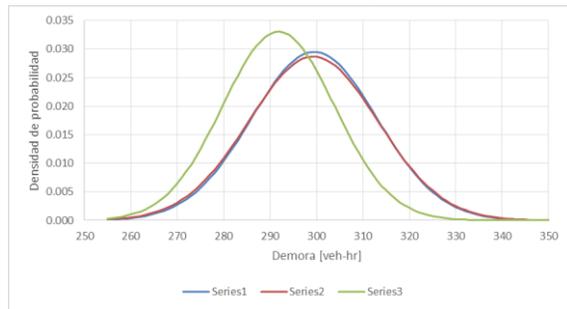


**ANEXO 5 – Gráficos comparativos.**

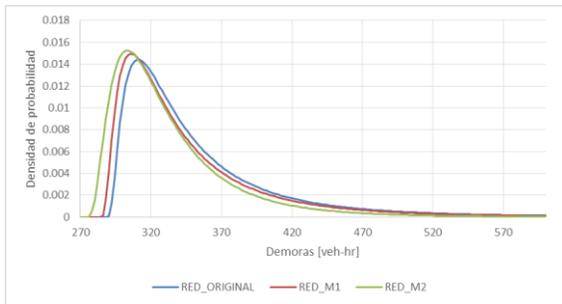
**Nivel de daño 5%**



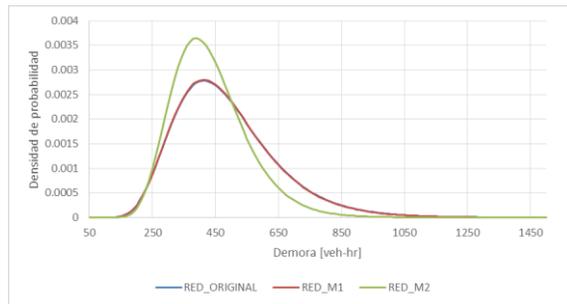
**Nivel de daño 10%**



**Nivel de daño 15%**



**Nivel de daño 20%**



**Nivel de daño 25%**

