



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

**LOCALIZACIÓN DE ALMACENES
COMO PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA
PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA
EN LA CADENA DE SUMINISTRO EN MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. ALAN JONATHAN MONTERRUBIO GIL

DIRECTOR DE TESIS
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., JUNIO DE 2018

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. BENITO SÁNCHEZ LARA

SECRETARIO: M. EN I. ROBERTO ROMERO PIMENTEL

VOCAL: DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

1 ER. SUPLENTE: DRA. MARÍA DEL CARMEN GONZÁLEZ VIDEGARAY

2 DO. SUPLENTE: DR. MIGUEL GASTÓN CEDILLO CAMPOS

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

TUTORA DE TESIS:

DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

Dedicatorias

A mi familia que se ha mantenido a mi lado durante este largo viaje que ha representado superar nuestras capacidades.

A Nalle, quien comparte el sueño de crecer y de crear una diferencia para beneficiar a los más indefensos.

A aquellos compañeros universitarios y profesionistas que constantemente prueban que el ingenio en México es sobresaliente.

A quienes cuentan con creatividad y deseos de superación, pero que no han contado con el apoyo necesario.

A aquellas personas que tienen un deseo genuino por mejorar México y que lo muestran con su ejemplo.

A aquellas personas amantes de la naturaleza, a quienes defienden sus recursos y los animales que la habitan.

Agradecimientos

A mi mamá, mi papá y a mi hermana Paola, por su amor y apoyo incondicional durante la travesía de mi crecimiento personal y profesional. La culminación de mi maestría representa una satisfacción para todos y es mi forma de regresarles todo lo que han hecho por mí.

A Nalle, ya que en ella he encontrado mi compañera para planear los siguientes desafíos, con quien he podido compartir mis sueños y mis ideales, con miras de convertirnos en personas ejemplares que quieren construir un futuro más justo para todos.

A la Dra. Mayra Elizondo Cortés, mi tutora, a quien considero como una segunda madre y como mi guía en la vida tan noble que representa ser académico. Sus consejos y su forma de compartir su pasión por impartir clases se han quedado impregnados en mí y lo tendré en mente cuando sea mi turno de inspirar a otros a pensar y a desafiarse.

Al Dr. Benito Sánchez Lara, al Mtro. Roberto Romero Pimentel, a la Dra. Maricarmen González Videgaray y al Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos por su atención y tiempo que dedicaron en la revisión y evaluación de este trabajo de investigación.

A mis compañeros y amigos de la generación 2015 de la Maestría en Ingeniería de Sistemas por compartir alegrías y buenos momentos durante esta etapa; particularmente, a quienes considero mis amigos de Investigación de Operaciones, Alex, James, Andrea y Kary por compartir tantas risas y vivencias durante el desarrollo de nuestras investigaciones y a Mauricio, Osvaldo, Salutino y Fabio por compartir sus experiencias y motivaciones.

A Emmanuel, Charli, César, Gustavo y Edraí por brindarme su amistad y apoyo desde hace varios años, compartiendo consejos y palabras de aliento en esta etapa que ahora está concluyendo.



Al Centro Nacional de Prevención de Desastres Naturales por proporcionar información que resultó clave en la realización del modelo desarrollado en esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgar un apoyo esencial durante el desarrollo de mis estudios en la Maestría.

En especial, a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por todo que me ha permitido aprender y a las personas que me ha permitido conocer tanto en la Licenciatura como en la Maestría. Me siento orgulloso de formar parte de la comunidad de esta institución y, tengo siempre en mente el propósito de compartir mis conocimientos y habilidades al servicio de la sociedad que con sus impuestos pagan por nuestra educación.



ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	12
INTRODUCCIÓN.....	16
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO	18
1.2 EL PAPEL DE MÉXICO EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO GLOBALES	18
1.3 CAUSAS DE DISRUPCIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO.....	23
1.4 LOS DESASTRES NATURALES EN MÉXICO.....	28
1.4.1 IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LOS DESASTRES NATURALES EN MÉXICO	37
1.5 LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO	41
1.5.1 EL CONCEPTO DE RESILIENCIA.....	41
1.5.2 DETERMINANTES DE LA RESILIENCIA DENTRO DE LA CADENA DE SUMINISTRO.....	43
1.6 EL PAPEL DE LA DIVERSIDAD EN LA RESILIENCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO	46
1.7 EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN CONSIDERANDO LA RESILIENCIA.....	47
1.8 LA LOCALIZACIÓN DE ALMACENES.....	49
1.9 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	52
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	55
2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO	55
2.2. LA EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EN RESILIENCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO	56
2.3 LA MEDICIÓN DE LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO.....	67
2.4 EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE ALMACENES	78
2.5 EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA COMO MODELO DE LOCALIZACIÓN	84
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	86
3.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO	86
3.2 MÉTODOS Y MODELOS	86
3.2.1 PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA	87



3.2.2 PROGRAMACIÓN ENTERA.....	92
3.2.3 RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO (BRANCH AND BOUND)	94
3.2.4 LINGO	99
3.2.5 ÍNDICE DE RESILIENCIA A NIVEL MUNICIPAL DEL CENAPRED	99
3.2.6 DIAGRAMA DE INFLUENCIA.....	111
3.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO	113
3.3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO	113
3.3.2 ESTRUCTURACIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INTERÉS	115
3.3.3 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	116
3.3.4 FORMULACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO QUE REPRESENTA EL PROBLEMA.....	116
3.3.5 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO MEDIANTE UN PROGRAMA DE COMPUTADORA.....	117
3.3.6 VALIDACIÓN LÓGICA (VERIFICACIÓN) DEL MODELO PROGRAMADO	118
3.3.7 VALIDACIÓN OPERACIONAL DEL MODELO PROGRAMADO	118
3.3.8 GENERACIÓN DE RESULTADOS.....	119
3.3.9 ANÁLISIS DE ESCENARIOS	120
3.3.10 DOCUMENTACIÓN	120
3.4 OBJETIVO GENERAL	120
<u>CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....</u>	<u>122</u>
4.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO	122
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO	122
4.3 ESTRUCTURACIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	123
4.4 DEFINICIÓN DE DIVERSIDAD	128
4.4.1 DESASTRE NATURAL	129
4.4.2 LA PROPIEDAD DEL ALMACÉN.....	129
4.4.3 VÍAS DE ACCESO	130
4.4.4 INSTITUCIONES QUE BRINDAN AUXILIO	130
4.4.5 CAPACIDAD DEL ALMACÉN.....	131
4.5 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN Y DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	132
4.6 FORMULACIÓN DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA.....	138
4.6.1 LAS VARIABLES DE DECISIÓN	138
4.6.2 PARÁMETROS	139
4.6.3 FUNCIÓN OBJETIVO	142
4.6.4 RESTRICCIONES	142



4.7 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO EN LINGO PARA OBTENER SOLUCIONES.....	144
<u>CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN DEL MODELO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</u>	<u>153</u>
5.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO	153
5.2 VALIDACIÓN LÓGICA DEL MODELO PROGRAMADO	153
5.3 VALIDACIÓN OPERACIONAL DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA	158
5.4 RESULTADOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN	163
5.5 EXPERIMENTACIÓN CON EL MODELO DE SOLUCIÓN	169
5.5.1 EXPERIMENTO 1: LOCALIZACIÓN DE 3 ALMACENES	170
5.5.2 EXPERIMENTO 2: LOCALIZAR 5 ALMACENES CON EL PRIMER PLANTEAMIENTO	172
5.5.3 EXPERIMENTO 3: REDUCCIÓN EN EL NÚMERO DE SITIOS POSIBLES PARA LOCALIZAR ALMACENES BAJO EL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA.....	175
5.5.4 EXPERIMENTO 4: CONSIDERACIÓN DE SÓLO 4 CRITERIOS QUE DEFINEN LA RESILIENCIA EN EL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA.....	177
5.5.5 EXPERIMENTO 5: PONDERACIÓN DEL CRITERIO “DESASTRE NATURAL” EN EL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA	179
5.5.6 EXPERIMENTO 6: PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA MULTIOBJETIVO	180
<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u>	<u>182</u>
<u>REFERENCIAS</u>	<u>186</u>
<u>ANEXO 1. “DISTANCIAS” CALCULADAS EN EL PRIMER MODELO CONSIDERADO.....</u>	<u>191</u>
<u>ANEXO 2. “DISTANCIAS” CALCULADAS EN SEGUNDO MODELO CONSIDERADO</u>	<u>195</u>
<u>ANEXO 3. PROGRAMA DEL PRIMER MODELO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA</u>	<u>199</u>
<u>ANEXO 4. PROGRAMA DEL SEGUNDO MODELO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA....</u>	<u>201</u>
<u>ANEXO 4. PROGRAMA DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA CON RESTRICCIÓN DE NIVEL DE RESILIENCIA</u>	<u>203</u>



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 PILARES DEL MODELO DE ALIANZA CON COMPAÑÍAS TRANSNACIONALES (ACT) DESARROLLADO POR PROMÉXICO	20
FIGURA 1.2 PRINCIPALES CAUSAS DE DISRUPCIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO	24
FIGURA 1.3 LAS DISRUPCIONES EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO EN MÉXICO	25
FIGURA 1.4 CAUSAS DE DISRUPCIÓN DE LAS CADENAS DE SUMINISTRO ENCUESTADAS EN MÉXICO	26
FIGURA 1.5 LOS CINCO PRINCIPALES DISPARADORES DE DISRUPCIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO DE ACUERDO CON EL FORO ECONÓMICO MUNDIAL	28
FIGURA 1.6 NÚMERO DE CATÁSTROFES NATURALES EN MÉXICO ENTRE 1970 Y 2010	29
FIGURA 1.7 ZONAS VOLCÁNICAS, SÍSMICAS Y FALLAS ACTIVAS DENTRO DEL TERRITORIO MEXICANO	30
FIGURA 1.8 ZONAS DE CICLONES TROPICALES DENTRO DEL TERRITORIO MEXICANO	31
FIGURA 1.9 ZONAS PROPENSAS A INUNDACIONES EN EL TERRITORIO MEXICANO.....	32
FIGURA 1.10 ZONAS DE GRANIZADAS Y TORMENTAS ELÉCTRICAS EN EL TERRITORIO MEXICANO	33
FIGURA 1.11 ZONAS DE HELADAS Y NEVADAS DENTRO DEL TERRITORIO MEXICANO.....	34
FIGURA 1.12 ZONAS SUSCEPTIBLES A HUNDIMIENTOS Y CORRIMIENTOS DE TIERRAS	35
FIGURA 1.13 ZONAS DE SEQUÍA METEOROLÓGICA POR FRECUENCIA DE AÑOS MUY SECOS Y EXTREMADAMENTE SECOS	36
FIGURA 1.14 APOYO ECONÓMICO OTORGADO AL FONDEN PARA ATENDER LAS ZONAS AFECTADAS POR LOS SISMOS OCURRIDOS EN SEPTIEMBRE DE 2017	38
FIGURA 1.15 IMPACTOS ECONÓMICOS ANUALES DE LOS DESASTRES NATURALES DEL 2000 AL 2016.....	39
FIGURA 1.16 DIFERENTES GRADOS DE DENSIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	43
FIGURA 1.17 DIFERENTES GRADOS DE COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	44
FIGURA 1.18 RECONOCIMIENTO DE NODOS CRÍTICOS EN UNA CADENA DE SUMINISTRO	45
FIGURA 1.19 EVOLUCIÓN DE LOS CRITERIOS CONSIDERADOS EN LA LOCALIZACIÓN DE ALMACENES	52
FIGURA 1.20 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	53
FIGURA 2.1 COMPARACIÓN DE LAS CADENAS DE SUMINISTRO NACIONES Y GLOBALES	57
FIGURA 2.2 FACTORES MÁS IMPORTANTES QUE INCREMENTAN EL RIESGO DE DISRUPCIÓN DE LAS CADENAS DE SUMINISTRO HACIA LA INSEGURIDAD	60
FIGURA 2.3 CLASIFICACIÓN PROPUESTA POR KLEINDORFER Y SAAD (2005) ACERCA DE LOS TIPOS Y LAS CAUSAS DE RIESGOS QUE AFECTAN A LA CADENA DE SUMINISTRO.	62
FIGURA 2.4 PRINCIPIOS BASADOS EN LITERATURA DE LA GESTIÓN DEL RIESGO INDUSTRIAL	64



FIGURA 2.5 HIPÓTESIS DE KLEINDORFER Y SAAD ACERCA DE LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES CONSIDERANDO LA RESILIENCIA	65
FIGURA 2.6 PERFIL GENERAL DEL DESEMPEÑO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO AFECTADA POR UNA DISRUPCIÓN	68
FIGURA 2.7 INDICADORES CONSIDERADOS EN EL ÍNDICE DE RESILIENCIA A NIVEL MUNICIPAL DESARROLLADO POR LA DIRECCIÓN DE ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS DEL CENAPRED	72
FIGURA 2.8 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS INDICADORES MUNICIPALES DE PELIGRO, EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD FRENTE A LOS DESASTRES NATURALES	74
FIGURA 2.9 CLASIFICACIÓN DEL INDICADOR DE VULNERABILIDAD DE LOS MUNICIPIOS EN MÉXICO FRENTE A LOS EFECTOS DE LOS DESASTRES NATURALES	75
FIGURA 2.10 CRITERIOS NO CONSIDERADOS EN LA FORMULACIÓN CLÁSICA DEL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES.	80
FIGURA 3.1 ELEMENTOS ALTAMENTE SIMILARES.....	89
FIGURA 3.2 ELEMENTOS ALTAMENTE DISIMILARES	89
FIGURA 3.3 ELEMENTOS INDIFERENTES.....	90
FIGURA 3.4 SOLUCIÓN DE LA RELAJACIÓN DEL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN ENTERA.....	96
FIGURA 3.5 PRIMERA ITERACIÓN DEL ALGORITMO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO	97
FIGURA 3.6 SEGUNDA ITERACIÓN DEL ALGORITMO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO	98
FIGURA 3.7 METODOLOGÍA SEGUIDA EN ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	114
FIGURA 4.1 MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA INVOLUCRADO EN EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	124
FIGURA 4.2 DIAGRAMA DE INFLUENCIAS ACERCA DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	125
FIGURA 4.3 CONDICIÓN DE EXPORTACIÓN DE DATOS EN HOJAS DE CÁLCULO HACIA EL <i>SOFTWARE</i> LINGO... ..	148
FIGURA 5.1 VERIFICACIÓN DEL MODELO MEDIANTE PRUEBA LÓGICA. ESTADO DEL SOLVER DE LINGO CUANDO SE REQUIEREN 0 ALMACENES	156
FIGURA 5.2 ESTADO DEL <i>SOLVER</i> DE LINGO PARA EL CASO DE VERIFICACIÓN EN QUE SE REQUIERE UN SOLO ALMACÉN	157
FIGURA 5.3 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LA SOLUCIÓN ENCONTRADA POR LINGO EN EL MODELO CONSTRUIDO PARA LA VALIDACIÓN	162
FIGURA 5.4 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LA SOLUCIÓN ENCONTRADA POR EL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA	165
FIGURA 5.5 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LA SOLUCIÓN ENCONTRADA POR LINGO	168
FIGURA 5.6 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DEL PRIMER EXPERIMENTO	171
FIGURA 5.7 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DEL PRIMER EXPERIMENTO	172



FIGURA 5.8 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO BASADO EN EL PRIMER PLANTEAMIENTO.....	173
FIGURA 5.9 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO BASADO EN EL SEGUNDO PLANTEAMIENTO	174
FIGURA 5.10 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DEL TERCER EXPERIMENTO	177
FIGURA 5.11 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LA SOLUCIÓN ENCONTRADA POR LINGO	179
FIGURA 5.12 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DEL QUINTO EXPERIMENTO	180
FIGURA 5.13 LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES BAJO EL MODELO MULTIOBJETIVO	181



LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 DESASTRES NATURALES DE MAYOR IMPACTO ECONÓMICO HASTA 2016.....	40
TABLA 1.2 SECTORES CON INSTALACIONES CRÍTICAS	49
TABLA 2.1 INVESTIGACIONES ACERCA DE LA IMPORTANCIA DE LA RESILIENCIA EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO	66
TABLA 2.2 DIMENSIONES DE LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO CONSIDERADAS EN LA INVESTIGACIÓN DE MUNOZ Y DUNBAR	70
TABLA 2.3 INVESTIGACIONES ACERCA DE LA MEDICIÓN DE LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO	76
TABLA 2.4 INVESTIGACIONES ACERCA DE LA LOCALIZACIÓN DE ALMACENES CONSIDERANDO DISRUPCIONES ...	83
TABLA 2.5 INVESTIGACIÓN ACERCA DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA APLICADO A MODELOS DE LOCALIZACIÓN	84
TABLA 3.1 INDICADORES QUE CONFORMAN LA DIMENSIÓN DE GOBERNABILIDAD.....	101
TABLA 3.2 INDICADORES QUE CONFORMAN LA DIMENSIÓN DE EVALUACIÓN DEL RIESGO	103
TABLA 3.3 INDICADORES QUE CONFORMAN LA DIMENSIÓN DE CONOCIMIENTO Y EDUCACIÓN	105
TABLA 3.4 INDICADORES QUE CONFORMAN LA DIMENSIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO Y REDUCCIÓN DE VULNERABILIDAD.....	107
TABLA 3.5 INDICADORES QUE CONFORMAN LA DIMENSIÓN DE PREPARACIÓN Y RESPUESTA HACIA LOS DESASTRES	109
TABLA 3.6 ESTRATIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA MUNICIPAL	111
TABLA 3.7 SIMBOLOGÍA DEL DIAGRAMA DE INFLUENCIA.....	112
TABLA 4.1 EXPLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE INFLUENCIA QUE DEFINE EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	126
TABLA 4.2 VALORACIONES PARA EL CRITERIO DE DESASTRES NATURALES.....	129
TABLA 4.3 VALORACIONES PARA EL CRITERIO DE PROPIEDAD DEL ALMACÉN.....	129
TABLA 4.4 VALORACIONES PARA EL CRITERIO DE VÍAS DE ACCESO	130
TABLA 4.5 VALORACIONES PARA EL CRITERIO DE INSTITUCIONES DE AUXILIO	130
TABLA 4.6 VALORACIONES PARA EL CRITERIO DE CAPACIDAD DEL ALMACÉN	131
TABLA 4.7 VALORACIONES DE LA VULNERABILIDAD DE LOS MUNICIPIOS HACIA LOS DESASTRES NATURALES..	132
TABLA 4.8 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA CADA SITIO CONSIDERADO EN EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA	134
TABLA 4.9 ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LOS SITIOS CONSIDERADOS EN EL EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	136
TABLA 4.10 NIVELES DE VULNERABILIDAD DE LOS SITIOS CONSIDERADOS HACIA CADA UNO DE LOS DESASTRES NATURALES	137



TABLA 4.11 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA TIJUANA Y MEXICALI CONSIDERADO EN EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA PARA MOSTRAR LA OBTENCIÓN DE LAS DISIMILITUDES	140
TABLA 4.12 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA TIJUANA Y MEXICALI CONSIDERADO EN EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA PARA MOSTRAR LA OBTENCIÓN DE LAS DISIMILITUDES	141
TABLA 4.13 COMPARACIÓN ENTRE LA NOTACIÓN MATEMÁTICA Y LA SINTAXIS DE LINGO EN LA EXPRESIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	149
TABLA 4.14 COMPARACIÓN ENTRE LA NOTACIÓN MATEMÁTICA Y LA SINTAXIS DE LINGO EN LA EXPRESIÓN DE LA PRIMERA RESTRICCIÓN LÓGICA.....	150
TABLA 4.15 COMPARACIÓN ENTRE LA NOTACIÓN MATEMÁTICA Y LA SINTAXIS DE LINGO EN LA EXPRESIÓN DE LA SEGUNDA RESTRICCIÓN LÓGICA.....	150
TABLA 4.16 COMPARACIÓN ENTRE LA NOTACIÓN MATEMÁTICA Y LA SINTAXIS DE LINGO EN LA EXPRESIÓN DE LA TERCERA RESTRICCIÓN LÓGICA	151
TABLA 4.17 COMPARACIÓN ENTRE LA NOTACIÓN MATEMÁTICA Y LA SINTAXIS DE LINGO EN LA EXPRESIÓN DE LA RESTRICCIÓN DE INTEGRALIDAD DE LAS VARIABLES AUXILIARES	151
TABLA 4.18 COMPARACIÓN ENTRE LA NOTACIÓN MATEMÁTICA Y LA SINTAXIS DE LINGO EN LA EXPRESIÓN DE LA RESTRICCIÓN DE INTEGRALIDAD BINARIA PARA LOS SITIOS CONSIDERADOS	152
TABLA 5.1 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA COATZACOALCOS Y MANZANILLO CONSIDERADOS EN EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA PARA MOSTRAR LA OBTENCIÓN DE LAS DISIMILITUDES	154
TABLA 5.2 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA COATZACOALCOS Y MANZANILLO CONSIDERADOS EN EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA PARA MOSTRAR LA OBTENCIÓN DE LAS DISIMILITUDES	155
TABLA 5.3 VALORACIONES PARA EL CRITERIO DE DESASTRES NATURALES.....	159
TABLA 5.4 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA EL ESCENARIO DE VALIDACIÓN	159
TABLA 5.5 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA LOS SITIOS CONSIDERADOS EN LA SOLUCIÓN DEL MODELO DE VALIDACIÓN EN EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA BAJO EL ESCENARIO DE VALIDACIÓN.....	160
TABLA 5.6 ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LOS SITIOS SELECCIONADOS EN EL MODELO DE VALIDACIÓN.....	161
TABLA 5.7 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA CONSIDERANDO LOCALIZAR 4 ALMACENES	164
TABLA 5.8 ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LOS SITIOS SELECCIONADOS EN EL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA	164
TABLA 5.9 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA LA SOLUCIÓN DEL SEGUNDO PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA CONSIDERANDO LOCALIZAR 4 ALMACENES	167
TABLA 5.10 ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LOS SITIOS SELECCIONADOS EN EL EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	167
TABLA 5.11 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA CADA SITIO SELECCIONADO EN LA SOLUCIÓN DEL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA AL REQUERIR 3 ALMACENES	170



TABLA 5.12 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA LA SOLUCIÓN DEL SEGUNDO PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA CONSIDERANDO LOCALIZAR 3 ALMACENES	171
TABLA 5.13 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA CADA SITIO SELECCIONADO EN LA SOLUCIÓN DEL PRIMER PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA AL REQUERIR 5 ALMACENES	172
TABLA 5.14 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA LA SOLUCIÓN DEL SEGUNDO PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA CONSIDERANDO LOCALIZAR 5 ALMACENES	174
TABLA 5.15 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA CADA SITIO CONSIDERADO EN EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA EN EL EXPERIMENTO 3	175
TABLA 5.16 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA CADA SITIO SELECCIONADO EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA BAJO EL EXPERIMENTO 3	176
TABLA 5.17 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA CADA SITIO SELECCIONADO EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA BAJO EL EXPERIMENTO 4	178
TABLA 5.18 ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LOS SITIOS CONSIDERADOS EN EL EJEMPLO DE APLICACIÓN	178
TABLA 5.19 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA CADA SITIO SELECCIONADO EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA BAJO EL EXPERIMENTO 5	180
TABLA 5.20 VALORACIONES DE LOS CRITERIOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA MULTIOBJETIVO	181



[...] When I was a boy my grandfather died, and he was a sculptor. He was also a very kind man who had a lot of love to give the world, and he helped clean up the slum in our town; and he made toys for us and he did a million things in his lifetime; he was always busy with his hands. And when he died, I suddenly realized I wasn't crying for him at all, but for the things he did. I cried because he would never do them again, he would never carve another piece of wood or help us raise doves and pigeons in the back yard or play the violin the way he did, or tell us jokes the way he did. He was part of us and when he died, all the actions stopped dead and there was no one to do them just the way he did. He was individual. He was an important man. I've never gotten over his death. Often I think, what wonderful carvings never came to birth because he died. How many jokes are missing from the world, and how many homing pigeons untouched by his hands. He shaped the world. He did things to the world. The world was bankrupted of ten million fine actions the night he passed on.

[...] Everyone must leave something behind when he dies, my grandfather said. A child or a book or a painting or a house or a wall built or a pair of shoes made. Or a garden planted. Something your hand touched some way so your soul has somewhere to go when you die, and when people look at that tree or that flower you planted, you're there. It doesn't matter what you do, he said, so long as you change something from the way it was before you touched it into something that's like you after you take your hands away. The difference between the man who just cuts lawns and a real gardener is in the touching, he said. The lawn-cutter might just as well not have been there at all; the gardener will be there a lifetime

[...] My grandfather ran off the V-2 rocket film a dozen times and then hoped that some day our cities would open up and let the green and the land and the wilderness in more, to remind people that we're allotted a little space on earth and that we survive in that wilderness that can take back what it has given, as easily as blowing its breath on us or sending the sea to tell us we are not so big. When we forget how close the wilderness is in the night, my grandpa said, some day it will come in and get us, for we will have forgotten how terrible and real it can be. You see?" Granger turned to Montag. "Grandfather's been dead for all these years, but if you lifted my skull, by God, in the convolutions of my brain you'd find the big ridges of his thumbprint". He touched me.

Fahrenheit 451
Ray Bradbury



INTRODUCCIÓN

Dentro de las decisiones estratégicas que deben enfrentar las empresas, sean de reciente creación o que ya han logrado su consolidación en el mercado, destaca la apertura de nuevas instalaciones ya que representa el posicionamiento físico y mercantil dentro de un sector, o bien, el sostenimiento y aumento en la participación en el mismo. La decisión de localizar instalaciones ha sido ampliamente abordada desde diferentes enfoques, principalmente relacionados con los costos de operación y los costos involucrados con el transporte; sin embargo, un entorno cambiante conlleva a la consideración de criterios emergentes en la toma de decisiones con el fin de realizar actualizaciones o nuevas formulaciones de los métodos de solución.

En este trabajo de investigación se considera que uno de estos criterios emergentes que ha tomado una gran importancia es la capacidad de resiliencia¹. Reconociendo que cada día se presentan diversos eventos que dificultan las labores en una empresa y que inclusive pueden provocar el paro total o la quiebra, la resiliencia se ha establecido como una capacidad esencial que debe incorporarse en la gestión de riesgos de cada empresa con el fin de disminuir los efectos de las disrupciones o incluso poder sobrevivir.

En diversas publicaciones se han clasificado las diferentes causas que provocan disrupciones en las actividades involucradas en las cadenas de suministro con el fin de identificar posibles medidas para mitigar los efectos, sin embargo, en esta investigación se destaca un factor que trasciende del control de las personas: *los desastres naturales*. La ubicación geográfica de México es determinante con respecto a los múltiples riesgos asociados con diferentes fenómenos naturales, los cuales han provocado la pérdida de millones de pesos de acuerdo con información publicada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) desde 1980. Las investigaciones que sugieren que la localización de instalaciones considere este tipo de disrupciones se ha ido fortaleciendo debido a los grandes impactos socioeconómicos resultantes del efecto de las catástrofes naturales.

Como apuntan varios autores, la capacidad de resiliencia de una cadena de suministro requiere ser atendida desde el diseño de la misma, es por ello por lo que resulta pertinente incorporar la resiliencia en la localización de instalaciones. Diversas investigaciones han analizado la

¹ **Resiliencia:** Tendencia de un ecosistema a recuperarse después de haber sido perturbado a través de cambios en las variables ecológicas, por causas naturales (inundaciones, huracanes, sequías, invasiones repentinas de insectos, etc.) o antropogénicas (introducción de especies exóticas, fuego, polución, deforestación). El término fue introducido por Holling, C.S. (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 14: 1 – 23. Más adelante se presentará una definición de resiliencia acorde al tema de esta investigación.



resiliencia de la cadena de suministro desde diferentes enfoques y métodos cualitativos y cuantitativos, sin embargo, el problema puede acotarse a ciertos elementos de la cadena que destacan por su importancia como enlaces intermediarios entre una empresa y sus clientes. Los almacenes, al ser elementos logísticos primordiales para asegurar la entrega de un producto o servicio hacia un cliente, requieren no sufrir interrupciones; aunado al hecho de que estas instalaciones suelen ubicarse lejos del control de la planta principal o del corporativo de la empresa, este trabajo identifica a los almacenes como las instalaciones que deben contar con resiliencia dentro de una cadena de suministro.

Gracias a la revisión de la literatura en los temas de resiliencia y localización de instalaciones se encontró una formulación dentro del campo de la Investigación de Operaciones que permite desarrollar una estrategia resiliente en cuanto al problema presentado. Bajo la Teoría de la Cartera, este documento propone que la diversidad de características proporciona resiliencia en la localización de los almacenes; así, la formulación del Problema de Diversidad Máxima permite maximizar la diferencia de características entre cada par de los sitios considerados para ubicar un almacén.

De acuerdo con las condiciones expuestas anteriormente, el objetivo de esta investigación se puede entender como la propuesta de una estrategia de localización de almacenes con un enfoque resiliente en la gestión de la cadena de suministros mediante la formulación del Problema de Diversidad Máxima.

Debido a la estructura de la formulación matemática del Problema de Diversidad Máxima, se pudo construir un modelo flexible y robusto en cuanto a la localización de almacenes: manejar características distintas entre sí, variar el número de almacenes que se requiere localizar, establecer cómo se comporta la localización de almacenes ante cambios ya sea en la forma de calificar las opciones, así como la ponderación de las mismas.

Con el fin de permitir que el lector pueda comprender el desarrollo de esta investigación, este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se explora cuál es la problemática en México que requiere ser atendida por el desarrollo del modelo propuesto, finalizando con la identificación puntual del problema de investigación que se busca resolver. En el capítulo 2 se exploran las recomendaciones provenientes de investigaciones relacionadas con la resiliencia en la cadena de suministro y el problema de localización. La aproximación de otros investigadores en los temas mencionados permite seleccionar el modelo de solución, el problema de diversidad máxima, y construir el objetivo de esta investigación, explicados en el capítulo 3. En el capítulo 4 se desarrolla el problema de diversidad máxima de acuerdo con los requerimientos identificados en el problema de investigación. En el capítulo 5 se exponen los resultados del modelo expuesto, finalizando esta investigación con las recomendaciones y conclusiones que arrojó dicho modelo de solución.



CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En el presente capítulo se analizan las situaciones de desastre que enfrenta México cada año, teniendo en mente la gestión actual de prevención ambiental y las proyecciones hacia el futuro considerando los efectos del cambio climático. Identificando los efectos de los fenómenos naturales como causas de interrupción en cualquier ámbito, posteriormente se vincula específicamente las consecuencias que pueden ocasionar en el sector industrial con base en el funcionamiento de la cadena de suministro, sistema de operación de diversas organizaciones. Inmediatamente se presentan las características que definen la resiliencia de una cadena de suministro, ya que la propuesta recae en la preservación y aumento de ella; concluyendo con el análisis del vínculo entre la diversidad y la resiliencia con respecto al problema de localización de almacenes, ya que esto dará pie a la acotación del problema de investigación.

1.2 EL PAPEL DE MÉXICO EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO GLOBALES

La primera pregunta que guía este trabajo de investigación es: ¿por qué es importante que las cadenas de suministro sean resilientes en México? Sin embargo, la importancia de las cadenas de suministro en el país en sí antecede al cuestionamiento previo. Para responder esto, inicialmente se debe establecer que el sistema actual que define el funcionamiento de las empresas es la cadena de suministro, ya que representa una percepción sistémica acerca de las operaciones involucradas en la satisfacción de una necesidad; esto es, considerar los procesos de los proveedores (básicamente desde la materia prima) hasta los procesos involucrados en la entrega del producto terminado al cliente final, con el intermedio de las transformaciones que lleva a cabo una organización dada. Como Christopher (2011) lo define, una cadena de suministro es definida como una red de organizaciones conectadas e interdependientes que trabajan mutuamente y cooperativamente para controlar, gestionar y mejorar el flujo de materiales e información desde los proveedores hasta los usuarios finales. Ramírez Estrada, Rubio Cortés y Calderón Ortega (2016) reconocen que las cadenas de suministro actuales operan de manera global cada vez con mayor frecuencia, ya que los distintos procesos que se requieren para elaborar un producto o prestar un servicio se llevan a cabo en lugares distintos. Bhatia, Lane y Wain (2013) establecen que las cadenas de suministro globales forman la columna vertebral de la economía mundial, alimentando el comercio, el consumo y el crecimiento económico. Teniendo en cuenta lo anterior, las empresas buscan que



sus procesos se realicen en los lugares indicados de acuerdo con la disponibilidad de materiales, las capacidades necesarias para realizar las actividades con calidad y a costos competitivos. Por ejemplo, un producto puede ser diseñado en Alemania, los componentes de dicho producto fabricados en China, el ensamblaje puede llevarse a cabo en México para que, finalmente, sea transportado de regreso a Alemania.

De acuerdo con el documento presentado por Ramírez Estrada *et al.* (2016), impulsado por la Secretaría de Economía (SE) y ProMéxico - fideicomiso orientado a atraer la inversión extranjera al país -, los esfuerzos con respecto al desarrollo económico en el país están siendo concentrados mayormente hacia el progreso de las manufactureras, puesto que este sector ha representado el principal generador de empleos y posee una gran influencia en otros sectores, considerando que ocho de cada diez exportaciones provienen de la manufactura del país y uno de cada dos dólares de inversión extranjera que llegan al país están destinados a ésta. Por estos motivos, ProMéxico y la SE están enfocados en fortalecer la cadena de suministro de estos sectores, que incluye fortalecer a las pequeñas y medianas empresas que fungen como proveedores potenciales para las cadenas de suministro de empresas transnacionales. Dado que el objetivo específico de ProMéxico es incrementar el valor agregado que pueden proporcionar las empresas mexicanas a empresas extranjeras, así como el valor agregado de localizarse y mantener sus instalaciones dentro del país, se puede establecer el porqué de la importancia de las cadenas de suministro en México, teniendo en cuenta las características globales que han desarrollado este tipo de sistema de organización.

El trabajo realizado por Ramírez Estrada *et al.* (2016) abunda en el papel que desempeña México dentro del comercio global. Con base en la información presentada por ProMéxico y la SE, esta investigación encuentra la justificación del por qué preocuparse por el bienestar de las cadenas de suministro nacionales y las cadenas de suministro que se encuentran involucradas en las operaciones de empresas transnacionales. Por ejemplo, destacan el atractivo del país debido a su apertura a los mercados internacionales, reflejado en la cantidad de tratados de libre comercio que posee con 46 países, que, en su perspectiva, posibilita el acceso a más de mil millones de consumidores; resultando en que el 63% del Producto Interno Bruto (PIB) se debe sólo al comercio internacional. De igual manera resaltan que, de acuerdo con cifras del 2015, las exportaciones mexicanas alcanzaron 380,000 millones de dólares, correspondiendo el 89% a la industria manufacturera. Además, agregan la importancia de México en el sector automotriz, ya que es el cuarto mayor exportador de vehículos ligeros en el mundo: produciendo 3.4 millones de vehículos ligeros en el 2015, además de 180,000 vehículos pesados, provocando que una de cada cuatro exportaciones hacia Norteamérica proviniera de empresas automotrices y de autopartes. Aunado a todo esto, el gobierno mexicano espera la apertura de nuevas plantas y un incremento de la inversión extranjera en este sector.



Ramírez Estrada *et al.* (2016) también destacan algunas ventajas que México lleva desarrollando durante años como su posición geográfica privilegiada (ya que le permite ser un vínculo entre el comercio en el Océano Atlántico y Pacífico), la cercanía comercial con Estados Unidos y el desarrollo de relaciones con países de Asia. ProMéxico enfatiza que busca incentivar la localización de empresas multinacionales mediante el atractivo de que en México encontrará costos competitivos, la posición estratégica que proporciona la ubicación geográfica del país, el capital humano, la apertura comercial y el amplio mercado interno. Esto lo ejemplifican con los efectos del Decreto para el Fomento de la Industria Manufacturera, Maquiladora y de Servicios de Exportación (IMMEX) ya que, conceder privilegios tanto en las importaciones como en la reducción de impuestos al establecerse en el país, motivó la llegada de empresas multinacionales durante varias décadas, atrayendo inversión extranjera, generando empleos y aumentando el número de exportaciones. Hasta el 2015, el número de empresas manufactureras y maquiladoras ascendía a 5,000, con aproximadamente 2.5 millones de personas empleadas en actividades relacionadas a la exportación. Resumiendo, y con el fin de expresar claramente la política que busca consolidar ProMéxico y la SE en los siguientes años, en la Figura 1.1 se muestran los pilares que conforman el llamado modelo de Alianza con Compañías Transnacionales (ACT).

Figura 1.1 Pilares del modelo de Alianza con Compañías Transnacionales (ACT) desarrollado por ProMéxico



Figura 1.1 Adaptado de Ramírez Estrada *et al.* (2016).



Como se puede observar en la Figura 1.1, ProMéxico propone como su primer pilar, dentro del modelo ACT, incentivar la inversión extranjera al solicitar los requerimientos de insumos de las empresas multinacionales para empatarlas con las características y ofertas de proveedores nacionales. Al establecer el vínculo entre empresas nacionales e internacionales, como segundo pilar se considera el aumento en el número de importaciones y exportaciones en el país; provocando, como tercer pilar, el requerimiento de inversiones dentro de las mismas empresas nacionales, la obtención de licencias y certificaciones que soliciten las transnacionales, inversiones y financiamiento por parte del gobierno, así como capacitación al personal y directivos de las empresas nacionales.

Si bien el modelo ACT representa una solución interesante para el desarrollo económico del país, los resultados presentados por Blyde (2014) cuestionan la postura tan positiva mostrada en el trabajo de Ramírez Estrada *et al.* (2016). Blyde (2014) examinó el valor agregado que proporcionan las exportaciones mexicanas en el sector manufacturero con el fin de verificar cómo ha variado la relevancia del país dentro de los procesos de las empresas transnacionales. De acuerdo con lo expuesto por ProMéxico, se pensaría que la mano de obra barata y las concesiones económicas hacia las empresas extranjeras propiciarían que México fuese considerado un país que agrega valor a los productos comercializados. Sin embargo, basado en la información obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con referencia al censo llevado a cabo por IMMEX a las manufactureras que se encuentran registradas en el decreto, Blyde (2014) mostró que la contribución de México en las cadenas de suministro presenta una tendencia decreciente en el periodo de 2007 a 2013; a través de análisis económicos, el autor obtuvo que el valor agregado que proporciona México a la industria manufacturera ha presentado un decremento, aunque no especifica el motivo de este fenómeno. Si bien demuestra que esta tendencia no se debe a que México haya perdido participación en el mercado o que se deba a la variación de los precios de los materiales y salarios de los trabajadores, Blyde (2014) solicita que se desarrollen trabajos que ayuden a determinar las posibles causas que pudieron provocar la disminución del valor agregado que puede ofrecer México a las cadenas de suministro manufactureras globales. Destaca que, en el caso de China, la sustitución de la importación de materiales por la utilización de materiales domésticos provocó que dicho país incrementará su valor agregado.

Al encontrar las posturas opuestas de Blyde (2014) y Ramírez Estrada *et al.* (2016) surge la necesidad de identificar cuáles podrían ser las posibles causas que puedan provocar la disminución de la importancia de México como socio comercial. Por ejemplo, Cedillo Campos (2011) realizó un análisis de casos de estudios donde expone la gran problemática que representa la inseguridad en México y en América Latina dentro del desarrollo de la logística y la cadena de suministro. Si bien es un tema crítico, el autor en primera instancia remarca que el problema de seguridad no es el único riesgo al que se encuentran expuestas las cadenas de suministro. Además, se debe distinguir que la seguridad depende principalmente de la acción



de los gobiernos para erradicarla. Los resultados de la investigación liderada por Cedillo Campos (2011) se retomarán detalladamente en el siguiente capítulo, dentro del marco teórico; sin embargo, el contexto que detalla el autor propone la consideración de una problemática compleja de examinar para las empresas transnacionales: *la gestión del riesgo*.

Cedillo Campos (2011) apunta que, debido al incremento de ataques terroristas en los recientes años, se han desarrollado investigaciones que han centrado su atención en la reducción de interrupciones a la cadena de suministro. A pesar de esta tendencia, destaca que diversos enfoques en seguridad no han alcanzado el objetivo de evitar o gestionar los riesgos por actos criminales o por los impactos de catástrofes naturales, por lo que aún se requiere desarrollar nuevos enfoques que cuenten con una percepción sistémica para brindar mejores soluciones; dicha perspectiva corresponde con la propuesta de este trabajo de investigación. Finalmente, el investigador establece que la falta de gestión de riesgos en la cadena de suministro y en la logística incide en una pérdida de competitividad por los altos costos logísticos tanto para proveedores como para las empresas transnacionales; esto último, presenta una posible causa de la disminución del valor agregado que puede proporcionar el país, por lo que el análisis de los riesgos en la cadena de suministro debe establecerse como una prioridad y conforma uno de los ejes de investigación de este documento.

Rescatando lo anterior, se necesita que las empresas, sean mexicanas o transnacionales, no se encuentren bajo riesgos que perjudiquen sus actividades económicas, considerando que una empresa asigna ciertas actividades en un país con el fin de obtener beneficios y no preocupaciones; por esto, la capacidad de resiliencia establece su importancia, ya que es un tema que influye en el crecimiento económico del país.

En un primer acercamiento en el tema de la resiliencia, Ortiz Adame (2013) no considera que el efecto de los desastres naturales impacte en la inversión extranjera directa de un país o una región; sin embargo, su propuesta se abre a discusión ya que, dentro de su misma investigación, distingue que otros autores han dado importancia a los factores naturales debido a lo ocurrido en el terremoto de Chile en 2010 y el terremoto y tsunami sufrido en Japón en 2011, por ende estos eventos deben considerarse importantes dentro del desarrollo de las cadenas de suministro.

Previamente se ha establecido que se debe atender la continuidad de las actividades económicas para poder brindar mayor certeza al funcionamiento de las cadenas de suministro locales y transnacionales, pero primero se requiere saber lo siguiente: ¿en México se analizan los riesgos a las que se encuentran sujetas las cadenas de suministro? Desafortunadamente, tal como lo indica Campos Cortés (2016), las empresas mexicanas han llevado a cabo pocas acciones relacionadas con la gestión del riesgo en sus cadenas de suministro. El 58% de los participantes en el estudio realizado por Campos Cortés (2016) mencionaron haber sufrido interrupciones en los años 2015 y 2016, un incremento de 14% comparado con estadísticas del



año 2014. Con esto, y ante la incertidumbre de no contar con respuestas concretas, se identificó la necesidad de estudiar las causas que pueden provocar afectaciones en las cadenas de suministro, es decir, las causas de disrupción que pueden provocar el descontento de empresas transnacionales y, en consecuencia, causar una posible disminución en la participación y en el valor agregado que puede brindar México en las cadenas de suministro globales.

En el siguiente subtema se abordarán las causas de disrupción específicas del funcionamiento de una cadena de suministro; sin embargo, debe tenerse en cuenta que este documento se concentra en una problemática que trasciende del control de las personas y de las empresas: *los desastres naturales*. Por esto, se expondrá por qué sólo considerar los desastres naturales como la causa de disrupción más relevante al final de dicho subtema.

1.3 CAUSAS DE DISRUPCIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO

Ante la incertidumbre de las causas que provocan la disminución de la participación de México en cadenas de suministro globales expuesta por Blyde (2014), en esta sección se explora el tema de las causas de disrupción identificadas en la cadena de suministro, ya que se establece que son los motivos por las que las empresas cambiarían sus estrategias comerciales.

Mensah, Merkurjev y Longo (2015) realizaron un análisis acerca de los riesgos que afectan a las empresas transnacionales, resaltando la importancia de desarrollar una estrategia resiliente para superar o prevenir cualquier disrupción que pueda ocurrir después de un incidente o fenómeno. Dentro de su estudio, se prioriza la consideración de las disrupciones ya que se ha encontrado una relación entre las pérdidas de productividad, rentabilidad y ventaja competitiva cuando sucede un evento que imposibilita la operación de cualquier organización. Los investigadores reportan, mediante las respuestas de 519 organizaciones encuestadas de 71 países obtenidas del *Business Continuity Institute (BCI)*², que el 75 % de las empresas aceptaron no poder diferenciar los niveles de disrupción de su cadena de suministro, por lo que se puede indicar que el desarrollo de metodologías que apoyen la resiliencia es urgente.

Una vez establecido que las empresas requieren construir estrategias resilientes, Mensah *et al.* (2015) enlistan las causas de disrupción que lograron discernir, las cuales se muestran en la Figura 1.2.

² *The Business Continuity Institute (BCI)* es el instituto mundial líder en el tema de *Continuidad del Negocio*. Fue establecido en 1994 con el fin de desarrollar profesionales y realizar investigaciones concernientes al aumento de los niveles de resiliencia en las organizaciones. Adaptado de *Business Continuity Institute* (n.d.).



Figura 1.2 Principales causas de interrupción de la cadena de suministro

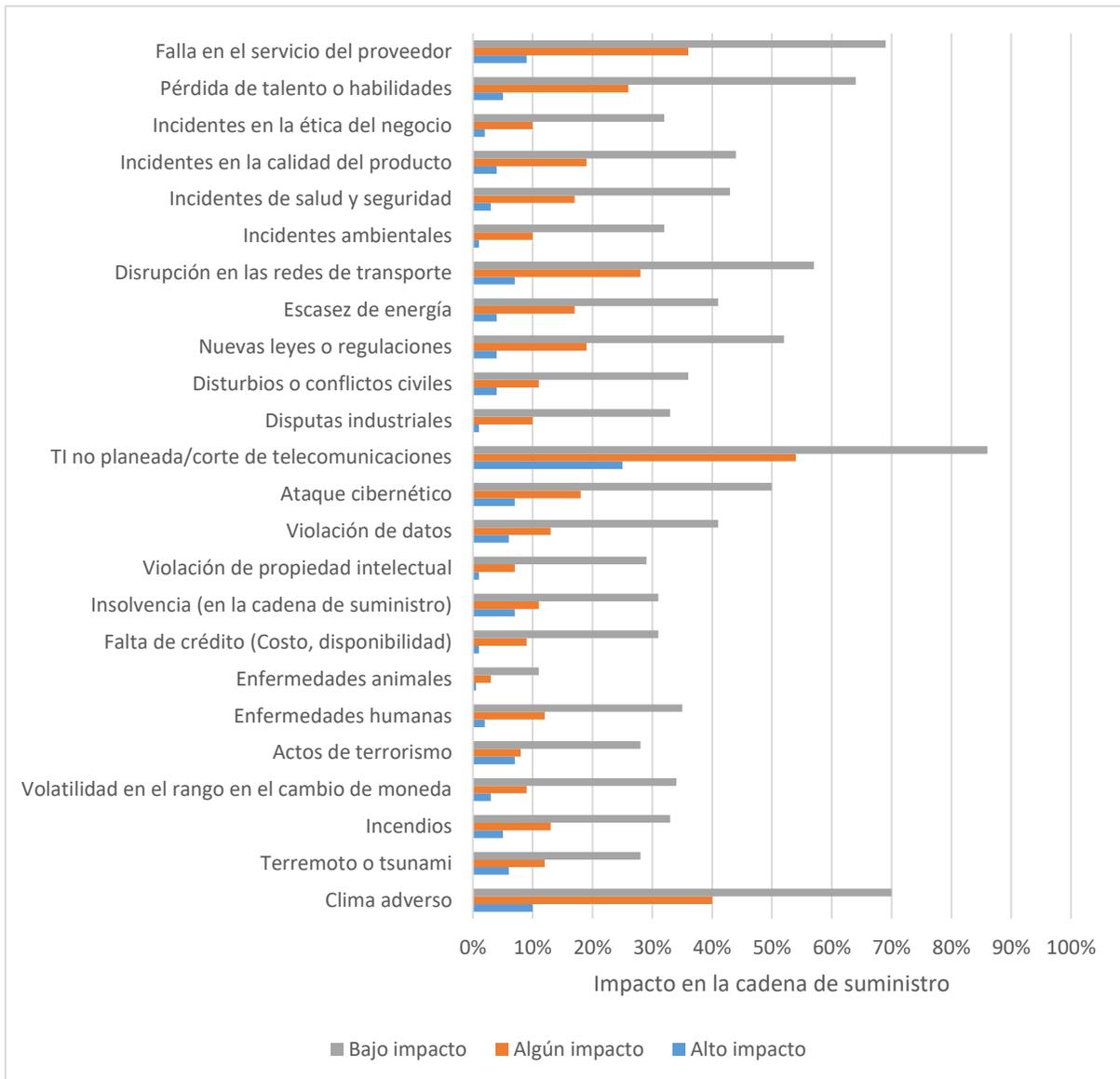


Figura 1.2 – Mensah *et al.* (2015) identifican que las causas de interrupción pueden evaluarse en diferentes niveles de impacto. Adaptado de Mensah *et al.* (2015).

En la Figura 1.2 se logra observar que la principal causa de interrupción identificada en Mensah *et al.* (2015) involucra la interrupción o ausencia de telecomunicaciones, seguida del clima adverso; sin embargo, debe notarse que dentro del estudio no se considera que ciertas interrupciones pueden ocasionar otras. Por ejemplo, una interrupción en las telecomunicaciones puede derivarse de la ocurrencia de un fenómeno natural (clima adverso). Reconociendo que determinar con certeza relaciones causales entre los diferentes eventos disruptivos presentados es subjetivo, así como determinar cuánto repercute un evento a otro, aun así, no



se puede ignorar las posibles influencias entre interrupciones. Esto se resalta ya que dentro de las causas de interrupción mostradas existen eventos disruptivos que se encuentran directamente relacionados con los *fenómenos naturales*, como clima adverso, terremoto/tsunami, incendio, incidentes ambientales; por otra parte, se presentan causas de interrupción que podrían presentar una causalidad con los desastres naturales como enfermedades tanto humanas como en los animales, insolvencia, interrupción en las telecomunicaciones, escasez de energía, interrupción en las redes de transporte, incidentes en la salud y seguridad, falla del proveedor. Con esto, se pretende mostrar que los fenómenos naturales cuentan con una gran importancia si se analizan las repercusiones en las cadenas de suministro por su ocurrencia. Discerniendo que los investigadores concentran sus esfuerzos en describir los eventos que afectan la operación de las cadenas de suministro, resulta necesario destacar la necesidad de trabajos futuros que consideren las interrelaciones existentes entre las causas de interrupción, aunque este trabajo no se concentrara en ello.

Ahora, si se analizan las causas de interrupción desde el punto de vista local, los eventos disruptivos que se identifican en las cadenas de suministro mexicanas se pueden analizar mediante el estudio realizado por Campos Cortés (2016), investigador de la *American Production and Inventory Control Society (APICS)*³ en México.

Figura 1.3 Las interrupciones en las cadenas de suministro en México

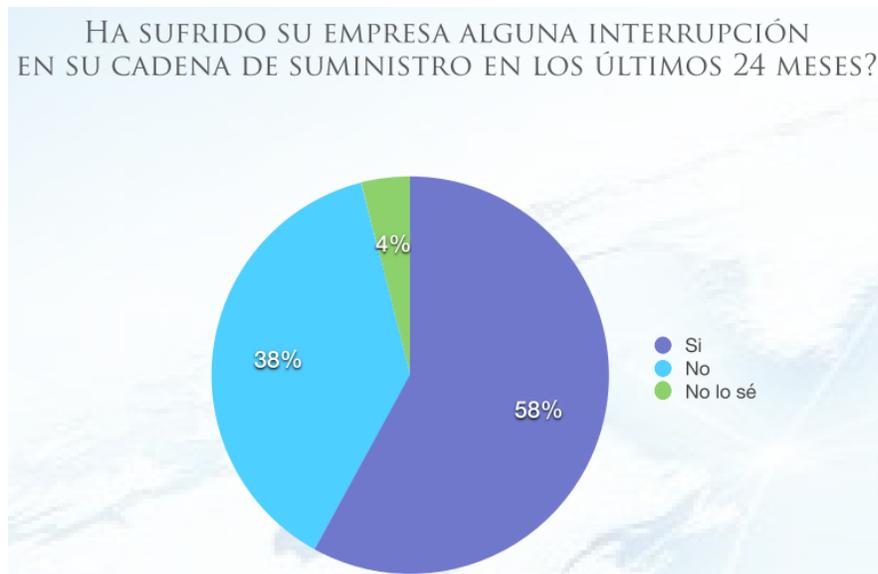


Figura 1.3 Tomado de Campos Cortés (2016).

³ *American Production and Inventory Control Society (APICS)* es una comunidad de investigadores y profesionales especializados en la gestión de la cadena de suministro. Esta organización, creada en 1957, se destaca por proporcionar cursos y diplomas relacionados con métodos y procesos dentro del funcionamiento de una empresa. Adaptado de *American Production and Inventory Control Society* (n.d.)



En dicho estudio se presentan las respuestas de 274 empresas de diferentes sectores y de diferentes tamaños con respecto a los riesgos más frecuentes. En primera instancia, el investigador destaca que las empresas mexicanas han realizado pocas acciones acerca del riesgo a interrupciones; la preocupación de este hecho se refleja en la Figura 1.3, ya que más de la mitad de las empresas encuestadas reconocen haber sufrido interrupciones en los últimos dos años.

Sin embargo, Campos Cortés (2016) cuestiona que el 38% de las compañías encuestadas hayan respondido que no han sufrido interrupciones en los últimos años, aunque considera que tal vez las empresas que no se declararon afectadas por interrupciones contaban con exceso en el inventario o sus medidas preventivas ante interrupciones fueron eficaces y así pudieron reducir los efectos de eventos disruptivos; sin embargo, también debe tomarse en cuenta la posibilidad de que las empresas mexicanas no estén considerando la gestión del riesgo en absoluto y, por ende, respondan que no han sufrido interrupciones simplemente porque no han prestado la atención necesaria a esta problemática.

Figura 1.4 Causas de interrupción de las cadenas de suministro encuestadas en México



Figura 1.4 Tomado de Campos Cortés (2016).

En la Figura 1.4 se muestran las causas de interrupción más frecuentes reportadas por las 247 empresas mexicanas. De acuerdo con los resultados, se puede observar que existe una gran diferencia en comparación con las causas de interrupción de las empresas internacionales expuestas por Mensah *et al.* (2015). La causa de interrupción más importante para las empresas mexicanas es la demanda no planeada, es decir, solicitudes de los clientes fuera de planes, sin embargo, esta causa de interrupción ni siquiera es considerada en los estudios internacionales.



A pesar de que resulta de suma importancia conocer las percepciones de las organizaciones que se encuentran en el país, las diferencias entre ambos estudios pueden atribuirse a un planteamiento distinto de las encuestas realizadas, así como la manera de clasificar los riesgos o el enfoque mismo de la investigación. Un ejemplo es la perspectiva mostrada por Tang (2006), ya que subraya que los riesgos pueden ser categorizados como riesgos de alto perfil y riesgos comunes. Dentro de los riesgos de alto perfil incluye desastres como los terremotos, el terrorismo, los tsunamis, el SARS, etc.; mientras que los riesgos comunes corresponden a eventos operacionales, por ejemplo, la variabilidad en la demanda, problemas en el suministro o en el flujo de materiales e información. Otra clasificación de las interrupciones se puede obtener si se considera su origen, destacando a las interrupciones intrínsecas a aquellos eventos que se encuentran dentro del control de la empresa y interrupciones externas cuando los eventos trascienden del control de la misma (Bhatia *et al.*, 2013).

A pesar de la presencia de la demanda no planeada y del faltante de partes críticas como causas de interrupción en el estudio mexicano, los resultados de Campos Cortés (2016) y de Mensah *et al.* (2015) coinciden en la importancia de presentar fallas por parte del proveedor, así como fallas en el transporte, aunque sorprende la gran diferencia en los impactos que suponen los desastres naturales. Las empresas internacionales ubicaron como la segunda mayor causa de interrupción los efectos de los fenómenos naturales, en contraste con los resultados nacionales que la ubican como la quinta interrupción más frecuente.

Tomando en cuenta las conclusiones contrastantes de Mensah *et al.* (2015) y Campos Cortés (2016), se corroboró dicha información con el informe del Foro Económico Mundial (FEM) desarrollado por Bhatia, Lane y Wain (2013), dentro de la presentación de una Iniciativa de Riesgo de la Cadena de Suministro desarrollada por grupos de académicos, personas de la industria y responsables de algunos gobiernos. Bhatia *et al.* (2013) destacan que se ha registrado un aumento drástico en las repercusiones del clima extremo (desastres naturales) hacia las cadenas de suministro de Europa, Norteamérica y Asia. Concretamente, el reporte del Foro Económico Mundial establece a los desastres naturales y al clima extremos como las dos principales causas de interrupción en la cadena de suministro, como se muestra en la Figura 1.5. Esta conclusión es ejemplificada por las consecuencias del terremoto y tsunami en Japón en el 2011, las inundaciones en Tailandia en el 2011 y 2012 y el huracán Sandy en Estados Unidos en noviembre de 2012. Tan sólo en el 2012 se consideraron pérdidas de 370 mil millones de dólares por interrupciones provocadas por desastres naturales.

A pesar de que los resultados del estudio realizado en México no respaldan que se establezca como prioridad las interrupciones ocasionadas por los efectos de los desastres naturales, los reportes internacionales indican que es de suma importancia que esta causa de interrupción requiera ser atendida como prioridad.



Figura 1.5 Los cinco principales disparadores de interrupción en la cadena de suministro de acuerdo con el Foro Económico Mundial

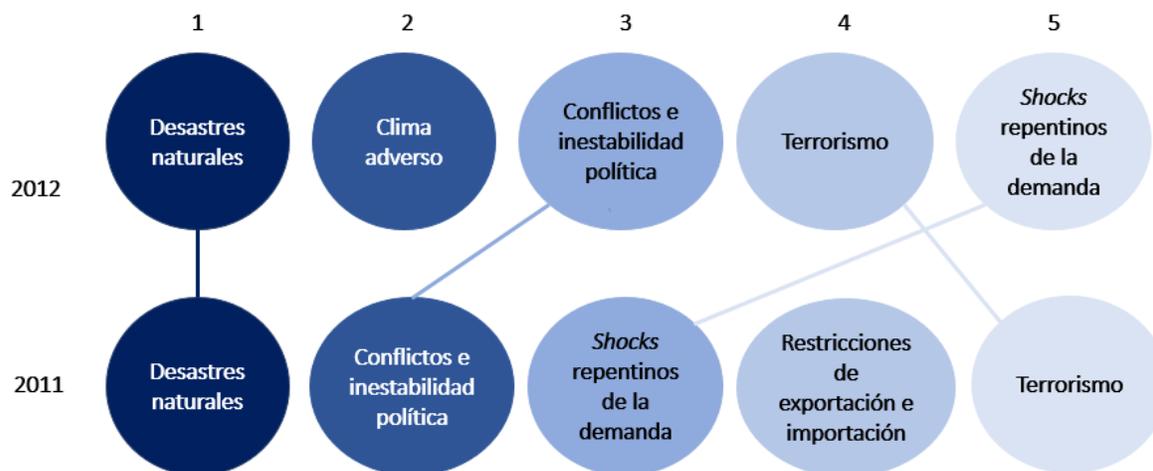


Figura 1.5 Adaptado de Bhatia *et al.* (2013).

Los desastres naturales son eventos que escapan del control de las empresas, además de que, tal como lo mencionan Tang (2006) y Bhatia *et al.* (2013), son riesgos de alto perfil por los grandes estragos que provocan, es por esto por lo que esta investigación se enfoca en estos eventos en particular. Con el fin de ejemplificar lo anterior, en el siguiente subtema se expondrán bases que evidencian las repercusiones que tienen los desastres naturales en el país, así como las proyecciones de acuerdo con la problemática del cambio climático.

1.4 LOS DESASTRES NATURALES EN MÉXICO

En esta sección se enfatiza el por qué esta investigación sólo aborda la presencia de los riesgos relacionados con los fenómenos naturales. Estos fenómenos representan eventos imposibles de impedir y se encuentran fuera del control humano. Con esto en mente, a continuación, se muestra información que justifique por qué los desastres naturales son la prioridad por atender si se busca mejorar la resiliencia de la cadena de suministro.

En consecuencia de la enorme catástrofe que representa el cambio climático, provocando el incremento en intensidad y en el número de fenómenos naturales ocurridos año tras año, se tiene claro que todos los países son afectados por los efectos de esta causa de interrupción, incluso se necesita subrayar que las acciones de la humanidad representan un factor clave en el deterioro ambiental, como lo destaca el Banco Mundial (2012). Por esto, México no se encuentra exento de esta situación, inclusive por su ubicación geográfica cuenta con diversos riesgos latentes que deben considerarse en la planeación de una cadena de suministro para



cualquier organización. México es un país altamente susceptible a un gran número de peligros naturales, afectando las inversiones a largo plazo y el crecimiento económico. El Banco Mundial (2012) subraya que, a partir del terremoto de 1985 - para el cual no existe un número exacto de muertes y se calcula una pérdida económica de 11.4 billones de dólares - el país entendió la necesidad de promover varias iniciativas con el fin de construir resiliencia ante los desastres naturales. La creación del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) en 1986, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en 1988, el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) en 1996 y el Fondo para la Prevención de los Desastres Naturales (FOPREDEN) en 2003 evidencian la importancia de generar conocimientos y desarrollar acciones de prevención, mitigación y recuperación ante la ocurrencia de estos fenómenos.

Figura 1.6 Número de catástrofes naturales en México entre 1970 y 2010

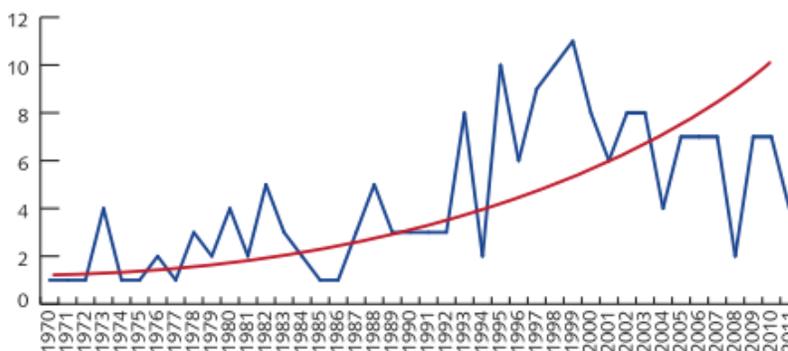


Figura 1.6 El gráfico en color azul indica el número de eventos ocurridos en el periodo de 1970 a 2010. La curva en color rojo representa la regresión exponencial que muestra la tendencia. Tomado del Centro de Investigación de Epidemiología de Desastres, Universidad Católica de Louvain, presentado por el Banco Mundial (2012).

La urgencia de consolidar estrategias resilientes en la gestión de la cadena de suministro se muestra en la Figura 1.6, ya que se observa la tendencia ascendente en la ocurrencia de eventos naturales en el país, presentado en el mismo informe del Banco Mundial (2012); enfocar esfuerzos con respecto a esta causa de disrupción resulta necesario ante la certeza de que, debido al cambio climático y el continuo deterioro exclusivamente por las acciones humanas, los desastres naturales se presentarán en mayor cantidad y con mayor intensidad.

Con la información mostrada en la Figura 1.6 y ante la certeza de que no es posible impedir la ocurrencia de estos eventos, resulta prudente conocer a qué tipo de desastres naturales se ha enfrentado el país, con el fin de realizar proyecciones hacia el futuro y así, de alguna manera, reducir los efectos disruptivos.

En las siguientes figuras se exponen mapas desarrollados por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde se estudian los diferentes desastres



naturales presentes en los estados de la república. Cabe destacar que se podrá identificar que todos los estados se encuentran expuestos por lo menos a un tipo de desastres naturales; esto se apunta ya que posteriormente se introducirá el concepto de diversidad como un criterio que ayuda a aumentar la resiliencia, por lo que tener en cuenta que diferentes desastres naturales intervienen en el país definirá la propuesta de solución de esta investigación.

Figura 1.7 Zonas volcánicas, sísmicas y fallas activas dentro del territorio mexicano

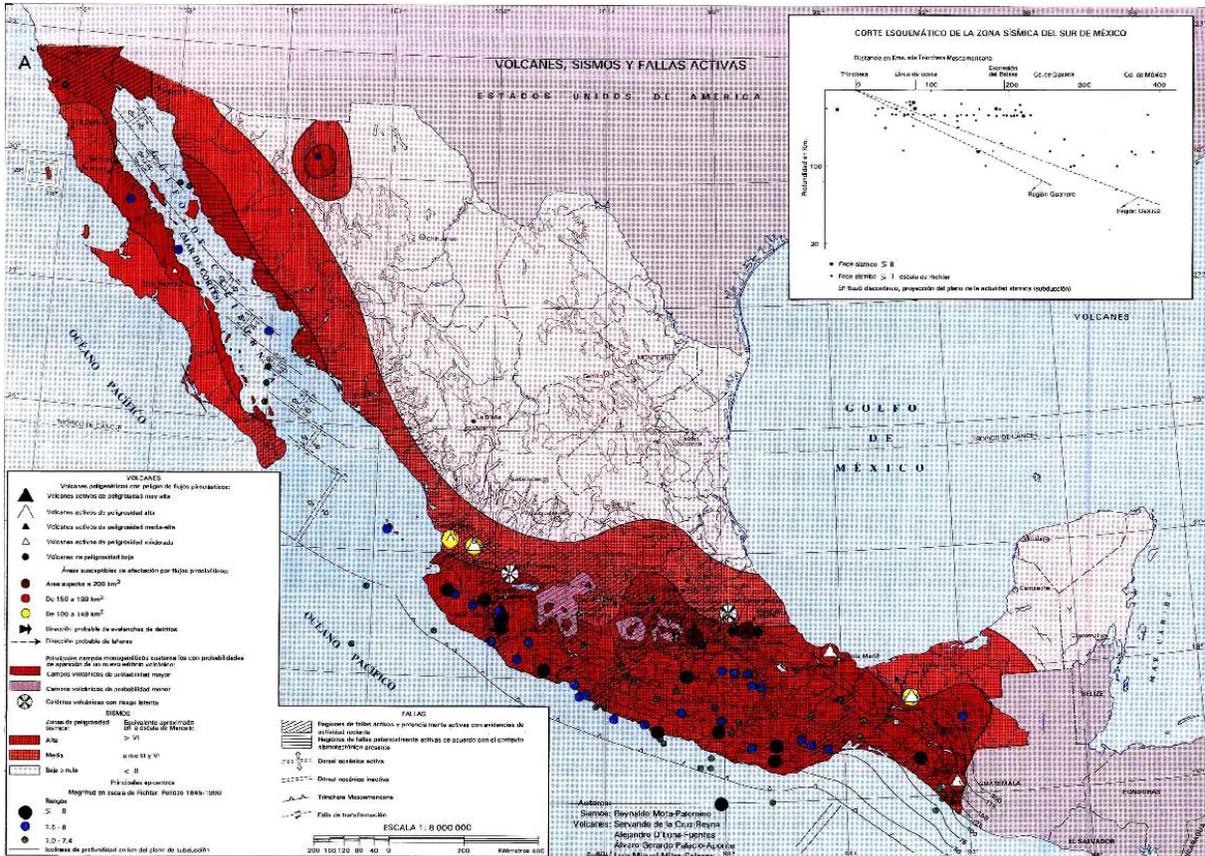


Figura 1.7 Las zonas que presentan un color rojo oscuro son descritas como zonas de alta peligrosidad sísmica. Las zonas de color rojo difuminado representan las zonas sísmicas con una peligrosidad sísmica media. Las zonas sin color muestran las zonas sísmicas con peligrosidad baja o nula. Los círculos negros representan algunos sismos registrados durante el periodo de 1845 a 1990 con una magnitud mayor a los 8 puntos, según la escala de Richter. Los círculos azules simbolizan sismos de magnitud 7.5 a 8 en el mismo periodo; así como los círculos verdes representan sismos de magnitud 7 a 7.4. Los triángulos simbolizan los volcanes activos de peligrosidad.

Tomado de Mota Palomino *et al.* (1992).

A través de la Figura 1.7 se puede observar que las zonas sísmicas y volcánicas se encuentran a lo largo de los estados que limitan con el Océano Pacífico, así como algunos estados que cuentan con acceso al Golfo de México. Algunos estados en la región centro del país también se encuentran señalados, debido al efecto en cadena cuando se suscita este fenómeno natural.



Diferenciando el riesgo específico que representan los sismos en el país, el Banco Mundial (2012) precisa que México se encuentra entre los países con mayor actividad sísmica en el mundo debido a la interacción de 5 grandes placas tectónicas en su territorio así como la actividad de fallas regionales. México sufre de más 90 temblores con una magnitud mayor a cuatro grados en la escala de Richter cada año, esto equivale al seis por ciento del total de temblores en el mundo. Las áreas propensas a terremotos cubren a 11 estados del país y porciones de 14 estados más; prácticamente la mitad del territorio se encuentra sobre zonas sísmicas. Otra importante anotación es que las áreas que se encuentran en riesgo de actividad sísmica representan el 60% del Producto Interno Bruto (PIB) y la misma proporción poblacional del país. El reporte de Mota Palomino *et al.* (1992) también recalca que los terremotos representan el mayor peligro debido a su poder acumulativo, a su capacidad de afectar grandes grupos de bienes, su intensidad y su cobertura tan extensa, estos peligros crecen si se considera la existencia de infraestructura que no fue diseñada para soportar sismos de gran intensidad.

Figura 1.8 Zonas de ciclones tropicales dentro del territorio mexicano

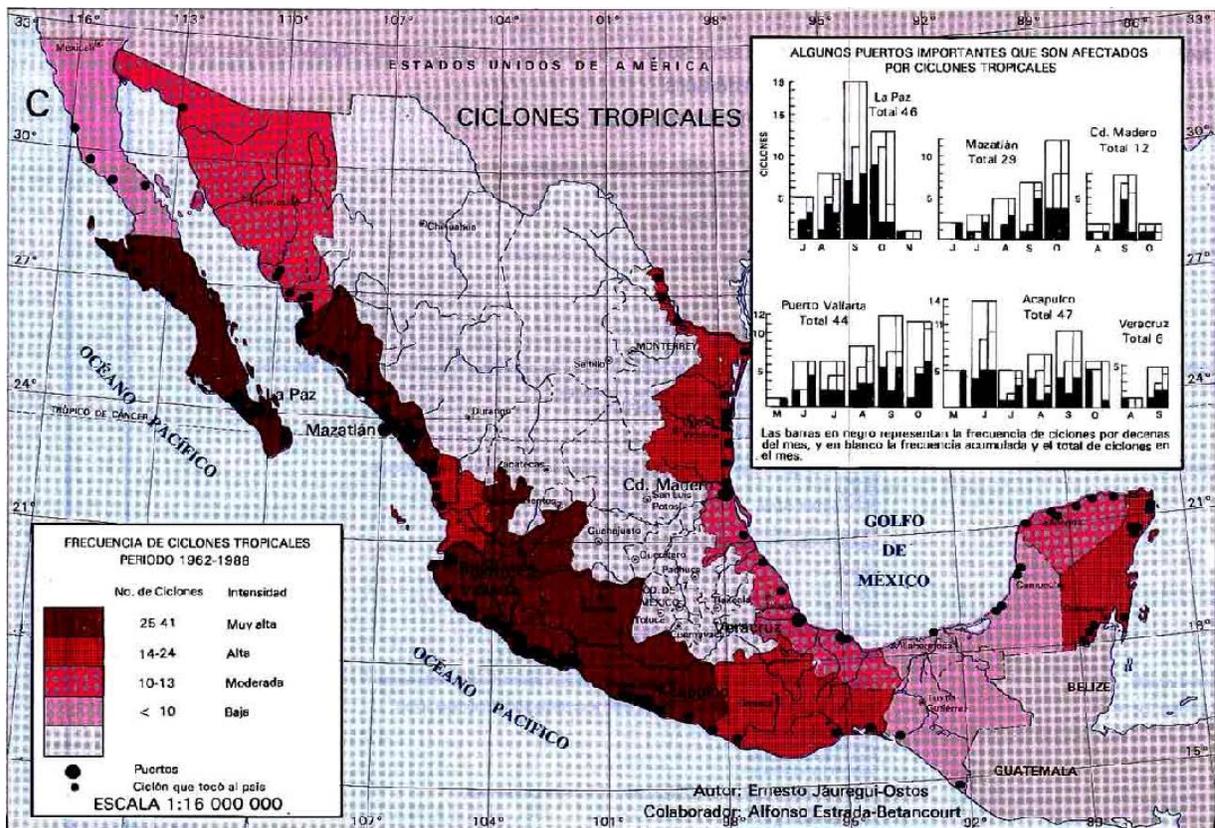


Figura 1.8 Las zonas que han presentado contacto con ciclones tropicales con mayor frecuencia se identifican con color rojo, variando su tonalidad de un color más oscuro representando a las zonas que han tenido contacto con ciclones tropicales con una intensidad muy alta hasta las tonalidades rosas que representan zonas que han tenido contacto con ciclones tropicales de baja intensidad. Tomado de Mota Palomino *et al.* (1992).



En la Figura 1.8 se muestran los ciclones tropicales registrados en el periodo de 1962 a 1988. Dentro de las acotaciones del mapa, el Instituto de Geografía de la U.N.A.M. han presentado algunas gráficas acerca de algunos puertos importantes que han sido afectados por ciclones tropicales: La Paz (Baja California), Mazatlán (Sinaloa), Ciudad Madero (Tamaulipas), Puerto Vallarta (Jalisco), Acapulco (Guerrero) y el estado de Veracruz. Asimismo, en las gráficas se pueden observar los meses con mayor registro de la presencia de ciclones tropicales en cada puerto, permitiendo definir las estacionalidades en que los estados se encuentran en riesgo. En algunos estados, los ciclones tropicales representan un riesgo durante la mitad del año, yendo desde mayo hasta noviembre. En los últimos años, los ciclones tropicales han representado ser un riesgo con efectos demoledores en los estados que han sido afectados, provocando pérdidas millonarias para las empresas, pero especialmente para la población.

Figura 1.9 Zonas propensas a inundaciones en el territorio mexicano

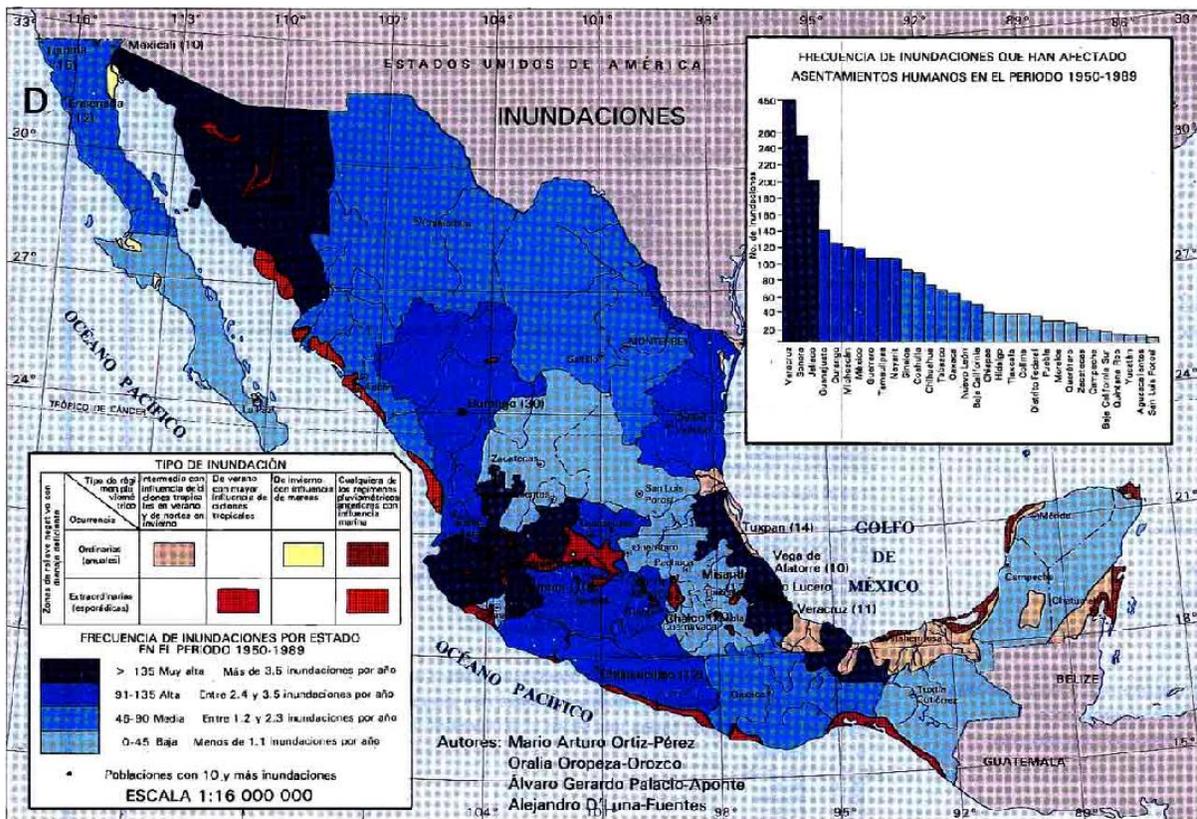


Figura 1.9 Las zonas de color azul con el tono más oscuro representan los estados afectados con mayor frecuencia en el periodo de 1950 a 1989 e indican los estados que han sufrido más de 135 inundaciones en el lapso mencionado. El gradiente siguiente indica estados que han sufrido de 91 a 135 inundaciones. El tono que sigue muestra los estados que vivieron de 45 a 90 inundaciones y el último color simboliza los estados que sufrieron menos de 45 inundaciones. Tomado de Mota Palomino *et al.* (1992).



La Figura 1.9 muestra claramente que todos los estados han sido afectados por inundaciones, sin embargo, se establece que ciertos estados muestran mayor vulnerabilidad ante este desastre. En la parte superior derecha de la figura se comparan las frecuencias de inundaciones que han afectado asentamientos humanos en el periodo 1950-1989. Veracruz destaca como el estado con mayor número de inundaciones; Sonora y Jalisco completan el conjunto de estados catalogados con una frecuencia muy alta de inundaciones. Quintana Roo, Yucatán, Aguascalientes y San Luis Potosí son los estados con la menor cantidad de inundaciones.

El Banco Mundial (2012) establece que las inundaciones, y los ciclones tropicales, representan los eventos hidrometeorológicos más peligrosos para el país, con especial atención en las regiones del Golfo de México y el Mar Caribe, donde los huracanes están presentes casi la mitad de cada año. Este reporte anota que la población ha incrementado en mayor proporción en las zonas costeras que en las demás regiones, lo que significa que ha incrementado la infraestructura en ellas y, por ende, aumenta su vulnerabilidad ante fenómenos naturales.

Figura 1.10 Zonas de granizadas y tormentas eléctricas en el territorio mexicano

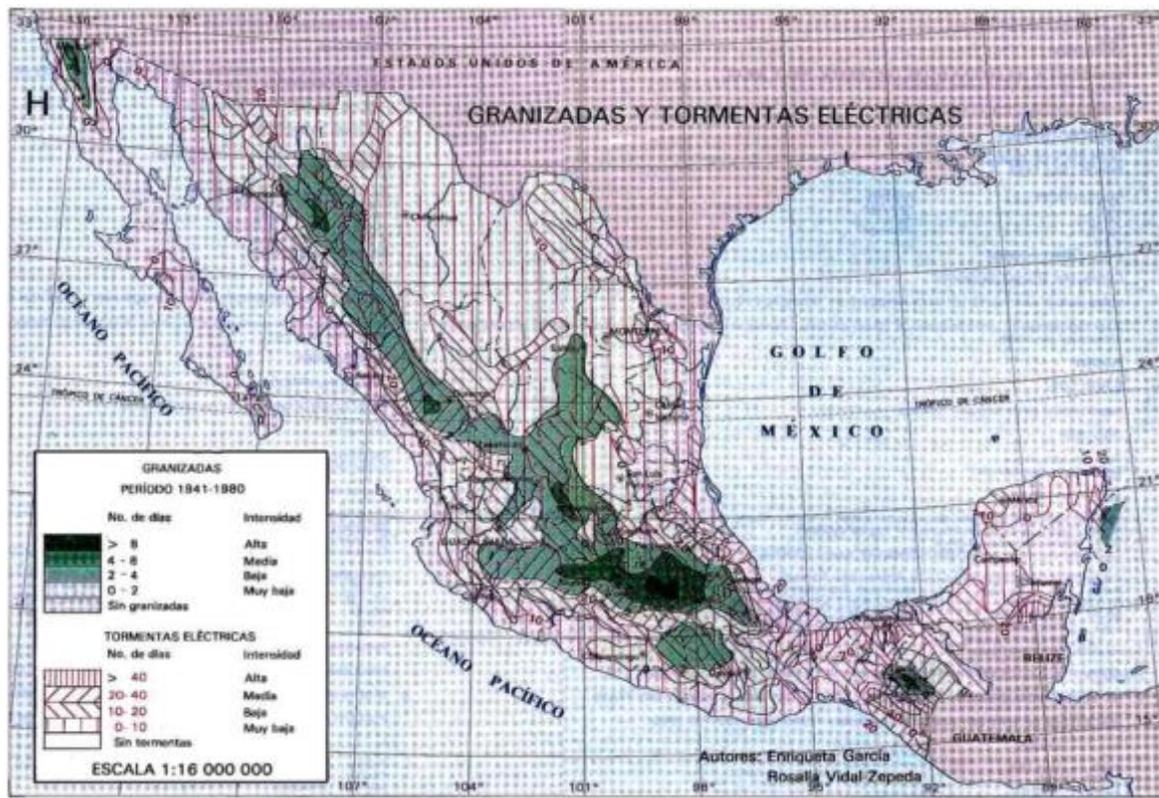


Figura 1.10 Las zonas de color verde oscuro simbolizan las áreas que han presentado granizadas por más de 8 días. La siguiente tonalidad de color verde representa las áreas que han registrado granizadas durante 4 hasta 8 días. La última tonalidad del color verde muestra las áreas con granizadas durante 2 a 4 días. Si las áreas presentan líneas rojas verticales indican que presentan tormentas eléctricas en más de 40 días al año. Tomado de Mota Palomino *et al.* (1992).



Resulta interesante que comparando las Figuras 1.9 y 1.10, no se puede establecer una relación entre los índices de granizadas y tormentas eléctricas con los índices de inundaciones. Se puede pensar que, dado que las inundaciones presentan diferentes causas, a pesar de que las lluvias y granizadas son causas principales de inundación, las zonas que muestran mayor frecuencia de inundaciones no comparten índices similares en granizadas ni en tormentas eléctricas; un ejemplo de esto es el caso de Veracruz.

Figura 1.11 Zonas de heladas y nevadas dentro del territorio mexicano

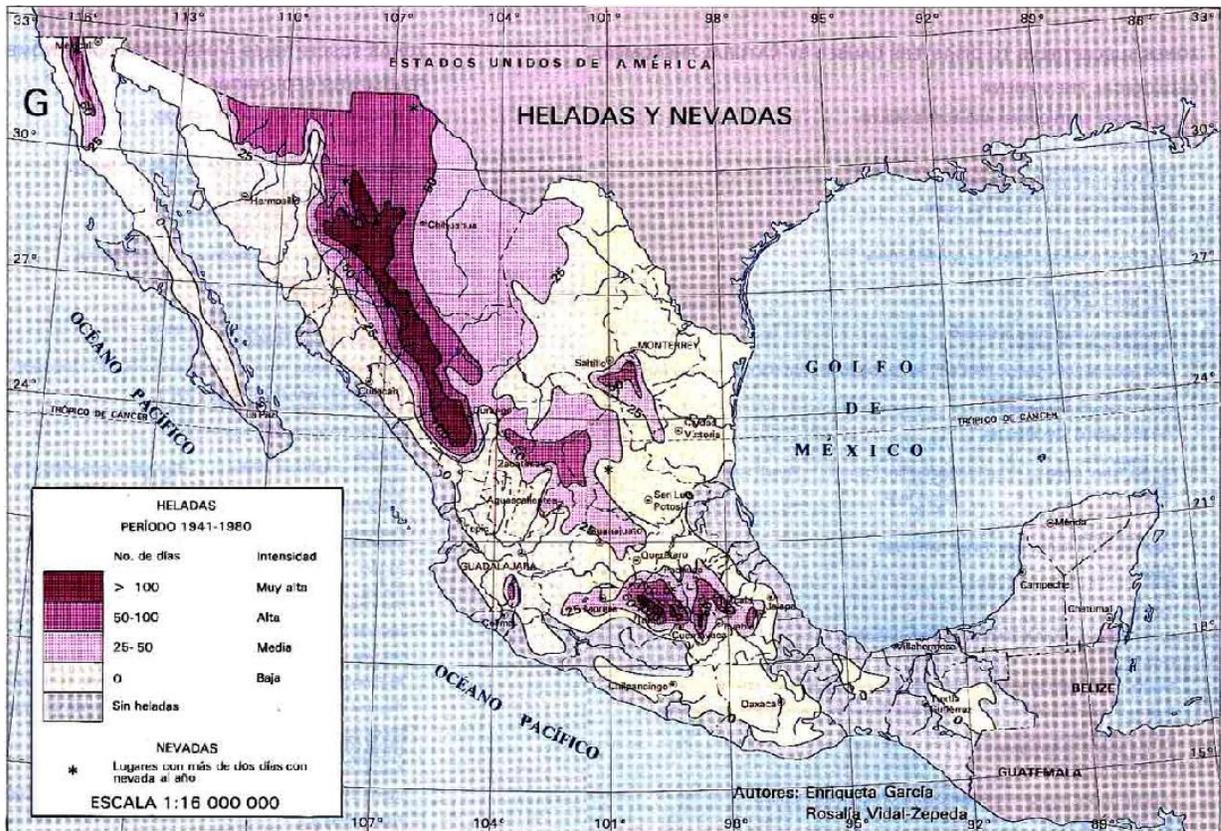


Figura 1.11 Las zonas que presentaron heladas durante el periodo de 1941 a 1980 se muestran con color morado, variando su tonalidad de acuerdo con la intensidad registrada y el número de días en que las heladas permanecieron. Tomado de Mota Palomino *et al.* (1992).

En la Figura 1.11 se puede observar que las zonas heladas se encuentran en los estados del centro, pero, principalmente, en los estados de la región norte que poseen climas áridos. De esta imagen cabe destacar que en los estados con fuerte presencia de heladas sufren entre 50 y 100 días de los efectos de este fenómeno natural; inclusive con zonas situadas en Chihuahua, Durango, Sonora, Sinaloa, Estado de México y Guanajuato que presentaron heladas por más de 100 días. Al igual que otros desastres, las heladas provocan estragos por un periodo prolongado.



Figura 1.12 Zonas susceptibles a hundimientos y corrimientos de tierras

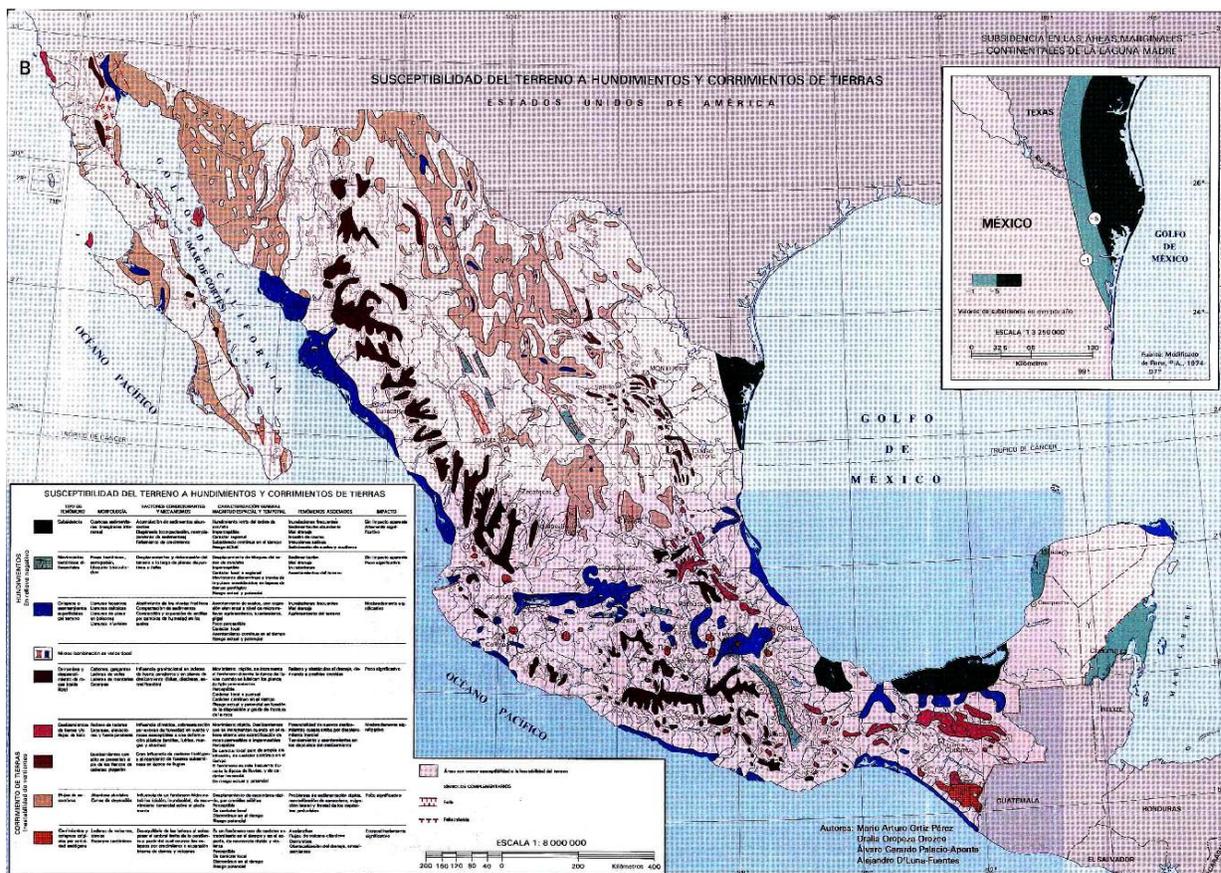


Figura 1.12 Las zonas de color negro simbolizan la susceptibilidad del terreno a hundimientos progresivos de una superficie, las zonas en color verde representan áreas que presentan movimientos tectónicos diferenciales y las zonas de color azul muestran las áreas que son susceptibles a colapsos. Tomado de Mota Palomino *et al.* (1992).

A pesar de que estos fenómenos naturales no suceden de manera repentina ni fortuita, en la Figura 1.12 se muestran las zonas que se encuentran más vulnerables a hundimientos o a corrimientos de tierras. Si bien, es un fenómeno vagamente reconocido, es de suma importancia conocer el estado del suelo en que se pretende construir o establecer alguna instalación.

Finalmente, el último desastre natural estudiado por el Instituto de Geografía de la U.N.A.M en la Figura 1.13 son las sequías. En la imagen se distingue que el grado de sequía meteorológica fue determinada por medio de las anomalías de precipitación con respecto a la moda de largo periodo, considerando años muy secos a las anomalías entre -25% a -50% y años secos en extremo a los de anomalías mayores a -50%. Se logra observar que las zonas áridas en naturaleza son las áreas que presentan los mayores índices de sequías meteorológicas. Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí destacan como los estados con mayores problemas debido a estos fenómenos. De acuerdo con



estadísticas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el 38% del territorio mexicano se ve afectado por las sequías, por lo que este fenómeno natural requiere una atención similar al que obtienen los ciclones y las inundaciones.

Figura 1.13 Zonas de sequía meteorológica por frecuencia de años muy secos y extremadamente secos

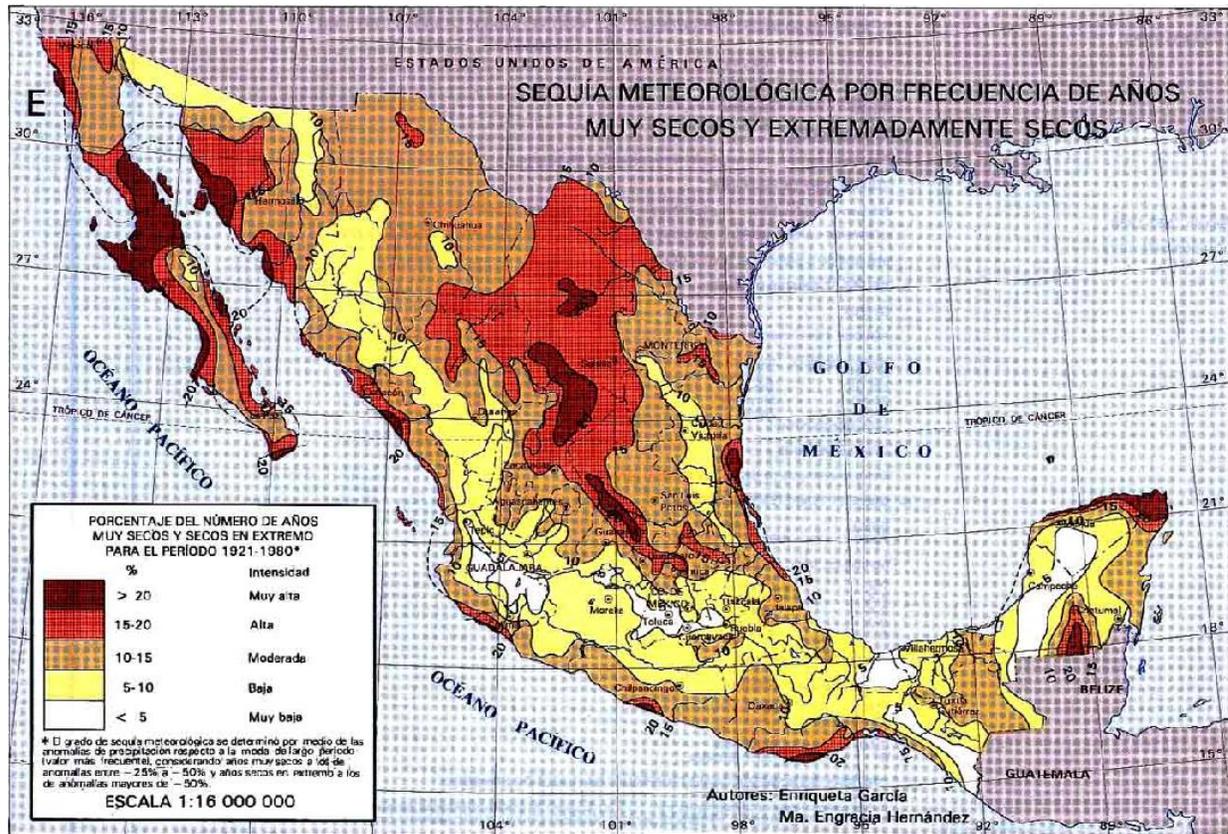


Figura 1.13 Las zonas varían la tonalidad rojiza a blanca de acuerdo con el porcentaje del número de años muy secos y extremos en extremo durante el periodo de 1921 a 1980. Adaptado de Mota Palomino *et al.* (1992).

Una vez que se cuenta con el conocimiento de qué tipo de desastres naturales afectan al territorio mexicano, como se ha ilustrado en las figuras anteriores, debe abordarse de qué manera la ocurrencia de estos fenómenos desencadena múltiples afectaciones en diferentes ámbitos. A continuación, se presenta el reporte publicado por el CENAPRED en el 2016 donde se enfatiza las pérdidas económicas que ha sufrido México debido a los desastres naturales, además se introduce información complementaria acerca de las afectaciones por las catástrofes naturales en el año 2017. Finalmente, con este subtema, este trabajo de investigación sostiene la justificación de por qué considerar a los desastres naturales como causa primordial si se busca mejorar la resiliencia en las cadenas de suministro.



1.4.1 Impacto socioeconómico de los desastres naturales en México

A través de esta sección se busca ejemplificar la dimensión de las repercusiones de no atender a los desastres naturales. Dentro del portal gubernamental del CENAPRED, los investigadores García Arróliga, Méndez Estrada, Nava Sánchez y Vázquez Bravo (2016) presentan el resumen ejecutivo anual de los daños y pérdidas estimadas debido a los desastres naturales y antrópicos que ocurrieron en México en 2016. Desafortunadamente, este reporte es el más reciente que ha desarrollado dicho organismo hasta el momento, por lo que no se están considerando las enormes pérdidas sufridas durante el 2017. Por este motivo, en esta sección se presentan algunas estadísticas pertenecientes al informe elaborado por el CENAPRED en 2016, pero complementado con información proveniente de medios de comunicación acerca de las repercusiones de los desastres naturales en 2017, con el fin de poder brindar una mejor perspectiva del impacto socioeconómico que pueden generar las catástrofes naturales.

Por ejemplo, García Arróliga *et al.* (2016) informan que la estimación de las pérdidas económicas sufridas en 2016 fueron cercanas a 13,793 millones de pesos, equivalente al 0.07% del Producto Interno Bruto (PIB). A pesar de que en el mismo documento establecen que el 2016 constituía el tercer año consecutivo con reducciones en las afectaciones económicas causadas por desastres naturales, en el año 2017 se sufrieron pérdidas humanas, materiales y económicas que aún no han terminado de registrarse.

De acuerdo con el reporte de Noticieros Televisa presentado una semana después de los acontecimientos del 19 de septiembre de 2017, el gobierno mexicano estimaba que sólo la reconstrucción de las partes afectadas por los sismos sufridos el 7 de septiembre en Oaxaca y Chiapas y el 19 de septiembre en Morelos, Ciudad de México, Puebla, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y Tlaxcala costaría 38 mil 500 millones de pesos. Incluso, el portal de Transparencia Presupuestaria (2018) del gobierno federal reporta que, hasta el día 27 de febrero del presente año, sólo el FONDEN ha asignado 38 mil 83 millones de pesos, tal como muestra la Figura 1.14. Si bien, se puede reconocer que se ha avanzado en la gestión de los desastres naturales si se compara con el conocimiento existente en el año de 1985, como lo indica el Banco Mundial (2012), dicha organización previene la existencia de una tendencia exponencial hacia el acontecimiento de fenómenos naturales en México (indicado en la Figura 1.6), por lo que se requiere seguir mejorando acciones que incrementen la resiliencia.

A pesar de que el CENAPRED remarca las reducciones en la cantidad de pérdidas humanas y económicas durante el enfrentamiento de los desastres naturales en los años 2014, 2015 y 2016, el año 2017 presentó grandes desastres naturales que repercutieron en la devastación de varios inmuebles en varios estados del país, así como un aumento en las pérdidas humanas.



Figura 1.14 Apoyo económico otorgado al FONDEN para atender las zonas afectadas por los sismos ocurridos en septiembre de 2017



Figura 1.14 Tomado del portal de Transparencia Presupuestaria (2018).

El mes de septiembre del año pasado representó un gran desafío para la gestión gubernamental, como lo indica el artículo de la revista Expansión (2017) debido a la ocurrencia de los siguientes eventos:

- la tormenta tropical Lidia azotó el sur de la península de Baja California el 1 de septiembre, causando lluvias torrenciales y ráfagas de vientos que afectaron varios estados, provocando la muerte de 7 personas y daños en viviendas y carreteras;
- el 7 de septiembre, un sismo de magnitud 8.2 en la escala de Richter⁴ con epicentro en Tonalá, Chiapas provocó la muerte de 96 personas, 110,000 inmuebles dañados en Oaxaca, Chiapas y Tabasco y más de 2 millones de personas afectadas por dicho fenómeno natural;
- el huracán Katia tocó tierra en Veracruz la noche del 8 de septiembre, dejando dos personas muertas y afectaciones en 235 viviendas;
- el 14 de septiembre, el huracán Max impactó las costas de Guerrero ocasionando lluvias torrenciales, fuertes vientos y oleaje elevado en Guerrero, Oaxaca y Michoacán;
- el 19 de septiembre, un sismo de magnitud 7.1 en la escala de Richter con epicentro en Axochiapan, Morelos, estremeció el centro del país, provocando el derrumbe de edificios en Morelos, la Ciudad de México y Puebla. Tan sólo en la Ciudad de México se presentaron 39 edificaciones colapsadas y 500 inmuebles fueron declarados inservibles. El número de personas fallecidas ascendieron a 228 en la Ciudad de México, 74 en Morelos, 45 en Puebla, 13 en el Estado de México, 6 en Guerrero y una en Oaxaca, dando un total de 369 (Animal Político, 2017).

⁴ La escala de Richter, llamada así en honor al sismólogo estadounidense Charles Francis Richter, es una escala logarítmica que asigna un número para cuantificar la energía que libera un terremoto, creada en 1936 por dicho científico junto con Beno Gutenberg en el Instituto de Tecnología de California. Fuente: Sarah Romero (2017).



A estas catástrofes naturales se le suman múltiples afectaciones por inundaciones provocadas por lluvias durante los meses de agosto y septiembre en las principales ciudades del centro del país, así como nevadas en los estados del norte a finales del 2017 y principios del presente año. Para poder brindar un mayor panorama de las repercusiones de los desastres naturales en los últimos años, García Arróliga *et al.*, (2016) muestran datos históricos respecto a los impactos socioeconómicos anuales a partir del año 2000 hasta el 2016 mostrados en la Figura 1.15.

Figura 1.15 Impactos económicos anuales de los desastres naturales del 2000 al 2016

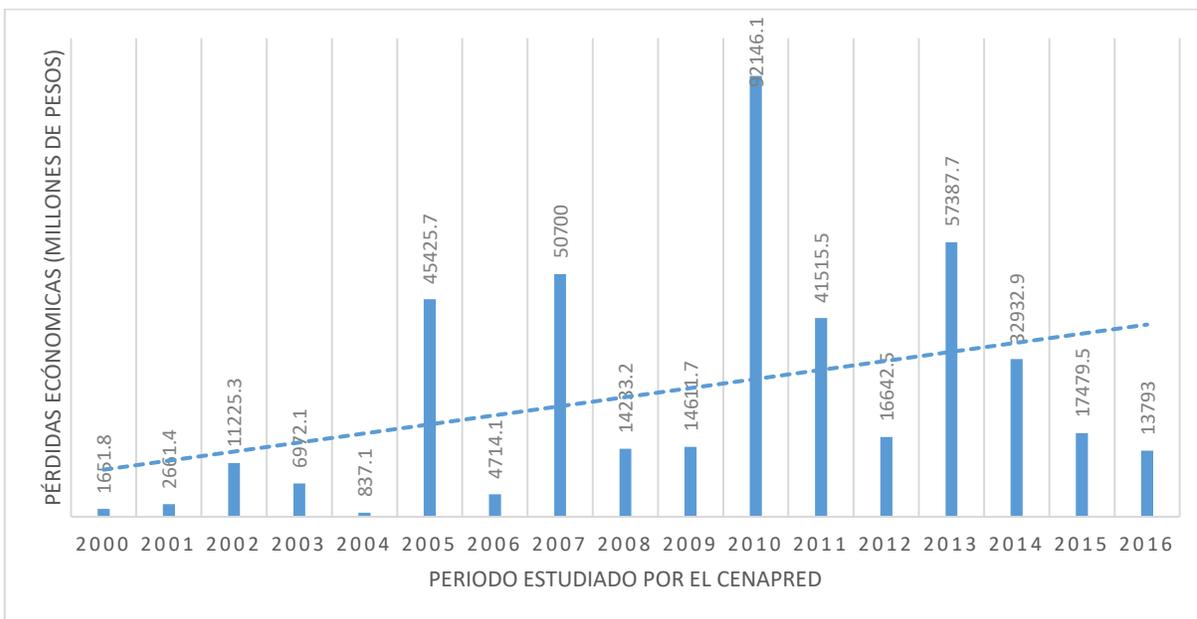


Figura 1.15 Estimaciones de las pérdidas económicas debido a los desastres naturales sufridos en México. La línea punteada muestra la regresión lineal que denota la tendencia al alza en las afectaciones económicas. Adaptado de García Arróliga *et al.* (2016).

Dentro de la Figura 1.15 se puede notar que las pérdidas económicas sobresalen en cuatro años específicos. El CENAPRED identifica que en esos años sucedieron cuatro grandes desastres naturales: el huracán Wilma en 2005, las inundaciones en Tabasco en 2007, los huracanes Alex, Karl y Mathew en el 2010 y los ciclones Ingrid y Manuel en el 2013. Lo anterior, demuestra que los desastres naturales son una constante en las afectaciones hacia la población y la economía del país y, a pesar de que se pueden presentar años con disminuciones en el impacto socioeconómico, la tendencia muestra que las pérdidas económicas incrementarán, prueba de esto es lo sucedido en el 2017. Además, también se reporta que desde el año 2000 hasta el año 2016 los desastres naturales han costado aproximadamente 424, 929 millones de pesos por las afectaciones que han provocado, más de 33 millones de personas se han visto perjudicadas por los daños materiales consecuentes de los fenómenos naturales y 8,164 personas han fallecido.



Otra cuestión para considerar recae en que las afectaciones no se concentran en una sola entidad federativa, sino que año con año todos los estados del país se ven afectados por lo menos por un fenómeno natural; prueba de esto, en la Tabla 1.1 se muestran los desastres naturales que han ocasionado un mayor impacto económico hasta el 2016.

Tabla 1.1 Desastres naturales de mayor impacto económico hasta 2016

Número	Fenómeno	Fecha	Estado	Pérdidas económicas en millones de pesos
1	Lluvias fuertes, frentes fríos y desbordamiento de ríos	Octubre de 2010	Tabasco	31, 871.26
2	Ciclones tropicales Karl y Mathew	Septiembre de 2010	Veracruz	24, 679.80
3	Huracán Odile	Septiembre de 2014	Baja California Sur	24, 133.17
4	Huracanes Ingrid y Manuel	Septiembre de 2013	Guerrero	23, 411.40
5	Huracán Alex	Junio de 2010	Nuevo León	21, 500.86
6	Huracán Wilma	Octubre de 2005	Quintana Roo	18, 258.00
7	Huracán Stan	Octubre de 2005	Chiapas	15, 031.50
8	Inundaciones	Septiembre de 2011	Tabasco	10, 423.70
9	Sismos de magnitud 7.2	Abril de 2010	Baja California	8, 644.10
10	Lluvias e inundaciones	Agosto de 2010	Chiapas	8, 456.06

Tabla 1.1 Tomado de información publicada por el CENAPRED.

Dentro de esta sección se ha identificado mediante los estudios del CENAPRED, así como los análisis del Instituto de Geografía de la U.N.A.M., que todos los estados del país se ven afectados por lo menos por un fenómeno natural. Además, se ha observado que los daños no se presentan de manera uniforme en el país. Considerando que se está abordando la necesidad de brindar resiliencia a las cadenas de suministro, distinguiendo su característica global, el hecho de que los desastres naturales no se presentan uniformemente en cierta área no significa que no puedan afectar las operaciones de alguna empresa que se localice en otra región.

La cadena de suministro, como se introdujo en el primer subtema de este capítulo, tiende a desarrollar características globales o, en su defecto, ante casos en que todas las actividades de una empresa se realicen dentro de un mismo país, pero rara vez será dentro de una misma entidad federativa. Es por esto por lo que se requiere adoptar una visión holística para poder tomar una decisión. ¿Qué se debe entender por esto? Esto significa que los efectos de un



desastre natural ocasionarán daños en las regiones que reciben el impacto - donde puede encontrarse el centro de producción o algún almacén, centro de servicio, la planta de un proveedor o las instalaciones de un cliente -, pero, debido al funcionamiento de la cadena de suministro, también habrá repercusiones para aquellas actividades que dependen o requieren de insumos localizados en la zona afectada; es decir, se puede interpretar que los desastres naturales provocan efectos látigo en todas las organizaciones.

Anteriormente se ha presentado cómo se están planeando las cadenas de suministro actualmente en el país, recordando que la estrategia comercial que busca consolidar la SE y ProMéxico consiste en el fortalecimiento de las relaciones entre empresas mexicanas y transnacionales que provoque la localización de instalaciones de las empresas extranjeras, así como el incremento en las exportaciones e importaciones y el crecimiento de las empresas nacionales con el fin de cumplir con los requerimientos de los clientes extranjeros. Esta investigación considera que un criterio que debe cuidar el gobierno, así como las empresas que busquen beneficios de esta estrategia es la continuidad de las operaciones, por ello se analizó cuáles son las causas de interrupción identificadas en la cadena de suministro. Se destacó que los desastres naturales son una causa de interrupción que merece especial atención teniendo en cuenta el efecto del cambio climático, mostrando la diversidad de fenómenos naturales que afectan al país, así como las repercusiones económicas que han acarreado en los últimos años. Ahora, es momento de concentrarnos en la estrategia que permita a una cadena de suministro defenderse ante los efectos de cualquier evento disruptivo, es decir, la resiliencia; ya que, como lo mencionan Bhatia *et al.* (2013) los riesgos de interrupción son creados o magnificados por la forma en que las cadenas de suministro están configuradas.

1.5 LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO

1.5.1 El concepto de resiliencia

El concepto de resiliencia se encuentra relacionado con la capacidad de los sistemas físicos y humanos de responder ante eventos extremos y recuperarse de ellos (Bruneau *et al.*, 2003; Rose y Liao, 2005); sin embargo, resulta de suma importancia reconocer que el resurgimiento del término resiliencia está fuertemente ligado con el estudio de los fenómenos naturales. En 1973, el ecólogo y entomólogo forense Crawford Stanley Holling introdujo el término en su artículo *Resilience and stability of ecological systems*. Holling (1973) emplea el concepto de resiliencia para definir “la tendencia de un ecosistema a recuperarse después de haber sido perturbado a través de cambios en las variables ecológicas, por causas naturales o antropogénicas”.



La cadena de suministro al constituirse como un sistema - ya que cuenta con elementos, relaciones y una estructura definida - se encuentra inmersa en un ambiente o suprasistema cambiante y que afecta el funcionamiento de la misma. Por esto, es necesario reconocer una propiedad de los sistemas con respecto a eventos que alteran un sistema, la *entropía negativa*. De acuerdo con la definición de entropía negativa de Caws (2015) como la tendencia natural de que un sistema se modifique según su estructura y se plasme en los niveles que poseen los subsistemas dentro del mismo, se puede relacionar este concepto con la primera fase que constituye el concepto de resiliencia, la *resistencia*.

De acuerdo con la investigación de Falasca, Zobel y Cook (2008), se expone que el origen del concepto de resiliencia se remite al concepto de resistencia. La resistencia se define como las medidas tomadas para mejorar el desempeño de una organización con el fin de reducir pérdidas ante la presencia de un desastre. Aunque la resistencia es una propiedad inherente en todos los sistemas, se enfatiza en la importancia de la mitigación del desastre; es por esto por lo que el concepto de resiliencia encuentra su cabida ya que se comprende como el desarrollo de la respuesta completa. La resiliencia incluye las mejoras en la flexibilidad y el desempeño de un sistema previo y durante un evento o desastre.

Debido a su significado, la resiliencia ha sido abordada y adoptada por diferentes disciplinas, tomando en cuenta que es un concepto de gran importancia en la constitución y sobrevivencia de una entidad, persona o ecosistema. Enfocando la atención al objeto de estudio: la cadena de suministro, la resiliencia ha sido estudiada bajo los objetivos de salvaguardar las operaciones de una empresa ante los riesgos emergentes, así como el análisis y desarrollo de estrategias que ayuden a mitigar dichos riesgos o inclusive prevenirlos.

A pesar de que se han expuesto algunas ideas referentes al concepto de resiliencia, es importante establecer una definición adecuada de resiliencia concerniente a la cadena de suministro, por lo que se recupera la conceptualización realizada por Falasca *et al.* (2008):

“La resiliencia en la cadena de suministro es la capacidad de reducir las probabilidades de una interrupción, reducir las consecuencias de esas interrupciones una vez que hayan ocurrido y reducir el tiempo de recuperación hacia un desempeño normal.”

Falasca *et al.* (2008) también destacan que la resiliencia en la cadena de suministro es un propósito que las empresas han considerado recientemente e inclusive que han comenzado a incorporar, sin embargo, esto no ha sido fácil ya que los aspectos y acciones que pueden incrementar la resiliencia frecuentemente entran en conflicto con las metas tradicionales, tales como reducir los costos y/o incrementar la eficiencia operacional. Diferentes investigaciones citadas en el trabajo de Falasca *et al.* (2008) expresan la necesidad de poder *medir* la resiliencia, así que se han desarrollado teorías sobre qué criterios la conforman.



Craighead, Blackhurst, Rungtusanatham y Handfiel (2007) derivaron diferentes hallazgos y proposiciones relacionados con la severidad de las interrupciones de la cadena de suministro mediante investigación empírica. Dentro de sus hallazgos, lograron concentrar tres características específicas de la cadena de suministro: densidad, complejidad y nodos críticos, además de que lograron definir capacidades de mitigación de la cadena de suministro con el fin de prevenirse y recuperarse de los desastres. Las aportaciones de Craighead *et al.* (2007) han permitido el desarrollo de investigaciones que buscan cuantificar las características expuestas, con el fin de diagnosticar niveles de resiliencia; un tema expuesto y propuesto también por Falasca *et al.* (2008).

Dentro de la revisión de la literatura, las características propuestas por Craighead *et al.* (2007) representan un buen eje para comprender cómo se pueden manejar los eventos disruptivos de la cadena de suministro y desarrollar nuevas estrategias que permitan el aseguramiento o la mejora de la resiliencia, como este trabajo se propone hacerlo; es por ello que a continuación se discute el significado de lo que ahora se conocerán como *determinantes de la resiliencia*.

1.5.2 Determinantes de la resiliencia dentro de la cadena de suministro

El primer determinante de la resiliencia es la densidad, la cual se puede entender como la cantidad de nodos que existe dentro de un espacio geográfico en la cadena de suministro. Si una gran cantidad de nodos de una cadena de suministro se encuentra agrupada de manera muy cercana, ese segmento es identificado con un nivel de alta densidad. Estas ideas se pueden comprender de una mejor manera a través de la Figura 1.16.

Figura 1.16 Diferentes grados de densidad en la Cadena de Suministro

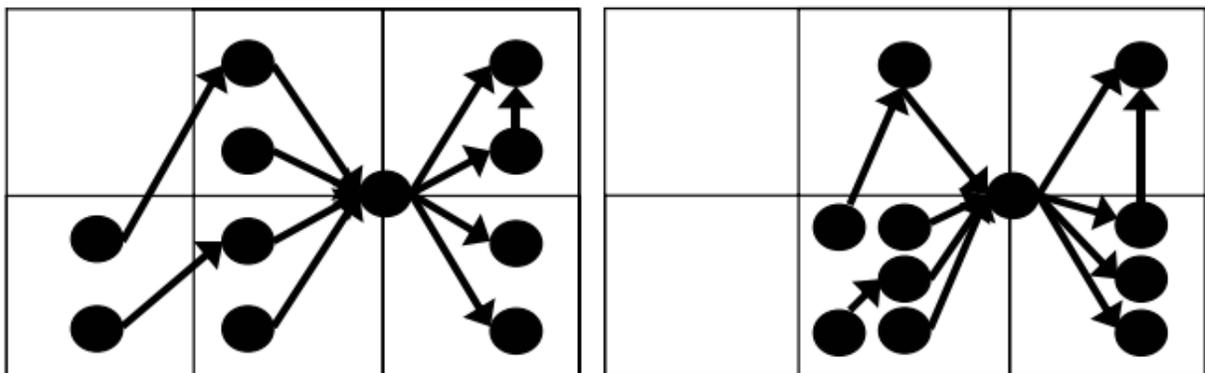


Figura 1.16 La representación del lado izquierdo muestra una cadena de suministro con baja densidad. La representación del lado derecha muestra una cadena de suministro con alta densidad. Tomado de Falasca *et al.* (2008).



Las repercusiones que puede sufrir una cadena de suministro con alta densidad fueron ejemplificadas en las investigaciones de Papadakis (2003, 2006). Dichos estudios presentaron el impacto financiero que provocó el terremoto ocurrido en 1999 en Taiwán. Debido a la alta densidad de empresas manufactureras de componentes de cómputo en Hsinchu, Taiwán, el daño resultante a causa del terremoto ocasionó grandes problemas en las cadenas de suministro globales dentro de la industria de las computadoras personales. Concretamente, la densidad de una cadena de suministro puede significar que el impacto total de un evento disruptivo en toda la cadena de suministro puede incrementarse si una porción significativa de los nodos está localizada dentro de la misma región.

El siguiente determinante para tomar en cuenta para evaluar la resiliencia en la cadena de suministro es la complejidad. La complejidad está relacionada tanto con el número de nodos en una cadena de suministro como con el número de interconexiones entre dichos nodos. Una cadena de suministro de menor complejidad contará con una menor cantidad de nodos o interconexiones entre ellos. Como consecuencia de una estructura más simple, se espera que una disrupción no sea significativa ya que el número de nodos que puedan ser afectados será menor. En la Figura 1.17, se puede observar el significado de la complejidad.

Figura 1.17 Diferentes grados de complejidad en la Cadena de Suministro

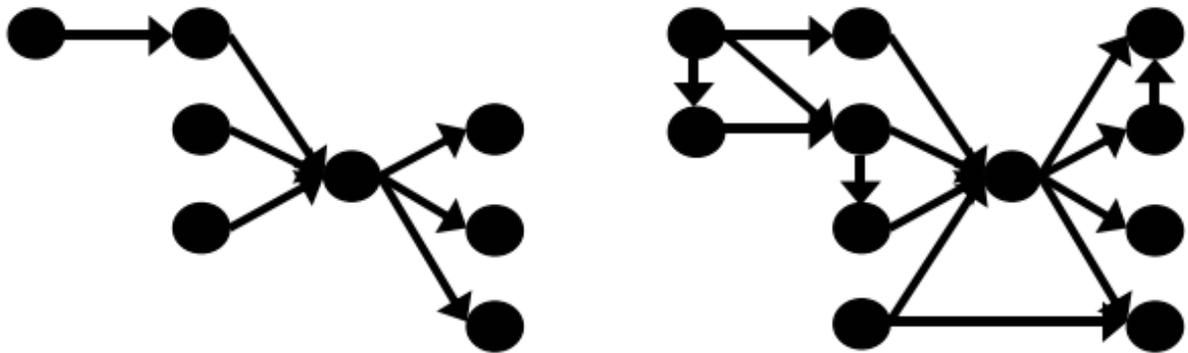


Figura 1.17 La representación del lado izquierdo muestra una cadena de suministro con menor complejidad. La representación del lado derecho muestra una cadena de suministro con mayor complejidad. Tomado de Falasca *et al.* (2008).

A pesar de que la primera recomendación dentro de este determinante es mantener una cadena de suministro con una complejidad simple, Craighead *et al.* (2007) reconocen que puede existir una ventaja al agregar nodos a la cadena de suministro. Para ejemplificar esto se retoma el caso de la industria de las computadoras personales, específicamente en los procesadores. Evaluar si se puede emplear un proveedor adicional de un componente tan crítico proporcionará una ventaja al no depender de un solo proveedor, a pesar de que agregar un nodo más hará a la cadena de suministro más compleja. Un abastecimiento adicional puede



actuar como un “amortiguador” potencial, por lo que agregar complejidad puede provocar el incremento en la resiliencia; el análisis no se reduce en sólo evaluar el número de nodos e interconexiones, sino que también es necesario considerar los atributos de cada nodo o relación dentro del funcionamiento de la cadena de suministro. Esta última consideración se contempla en el último determinante.

El número de nodos críticos en una cadena de suministro constituye el último determinante de la resiliencia. Un nodo crítico se refiere a la importancia relativa de un nodo dado o un conjunto de nodos dentro de la cadena de suministro (Craighead *et al.*, 2007). Siguiendo con el caso de la industria de las computadoras personales, una disrupción que afecte a Intel, proveedor de procesadores - probablemente el nodo más crítico de toda la cadena de suministro - tiene un impacto diferente en el desempeño de la cadena de suministro que una disrupción que afecte a un proveedor de teclados. La Figura 1.18 ayuda a esclarecer lo que significa un nodo crítico.

Figura 1.18 Reconocimiento de nodos críticos en una cadena de suministro

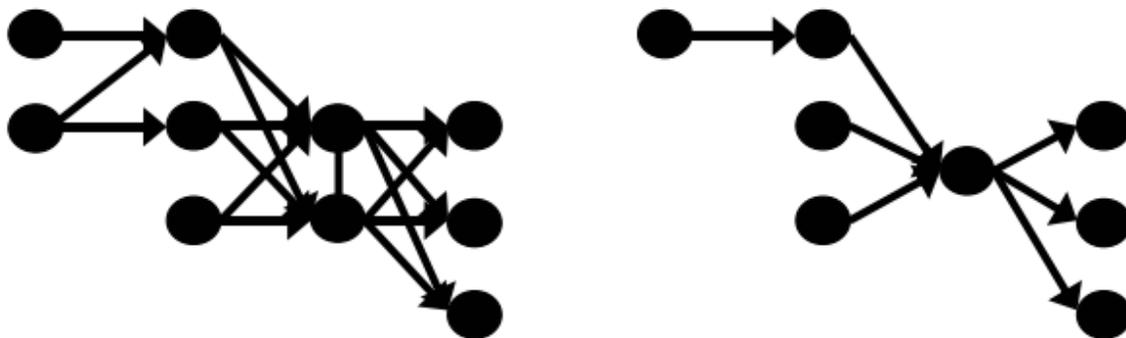


Figura 1.18 - La figura del lado izquierdo representa una Cadena de Suministro con un número menor de Nodos Críticos, mientras que la representación del lado derecho muestra gran dependencia debido a la presencia de un mayor número de Nodos Críticos. Tomado de Falasca *et al.* (2008).

Una cadena de suministro que contiene una gran cantidad de nodos críticos cuenta con un mayor potencial para la disrupción en comparación con una empresa que cuente con segundas opciones para los procesos críticos. En otras palabras, el desempeño de la cadena de suministro con nodos altamente críticos resulta fuertemente dependiente de ellos. Incluso, si solo uno de estos nodos críticos es removido, la cadena de suministro puede ser reducida a subredes desconectadas.

Con el conocimiento de las características que una cadena de suministro resiliente debe cuidar, sin descuidar los efectos que los desastres naturales pueden acarrear, en la siguiente sección se comienza a construir una propuesta que permita considerar todos los factores ya descritos con el fin de que la cadena de suministro aumente su resiliencia.



1.6 EL PAPEL DE LA DIVERSIDAD EN LA RESILIENCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

Durante la revisión de la literatura que se realizó en el tema de la resiliencia en la cadena de suministro con el fin de desarrollar estrategias que ayuden a mejorar esta capacidad, se encontró el trabajo realizado por Kleindorfer y Saad (2005). Los autores desarrollaron un marco conceptual para el manejo de los riesgos de interrupción en la cadena de suministro, el cual incluye tareas de especificación, evaluación y mitigación de los mismos. Dentro de su propuesta de manejo de riesgos disruptivos, los investigadores analizan considerar la diversificación como un método de mejora de la resiliencia, específicamente a tomarse en cuenta en los problemas de localización de instalaciones, en opciones de abastecimiento y logística, así como el reconocimiento de los enlaces más endebles.

De acuerdo con el análisis realizado con respecto a la estrategia que buscan consolidar la Secretaría de Economía y ProMéxico - dentro de las cuales se espera que empresas transnacionales localicen sus instalaciones en el país, además de que las empresas nacionales se desarrollen y se fortalezcan como proveedores, provocando también la apertura de nuevas instalaciones -, en la propuesta de Kleindorfer y Saad (2005) con respecto a este problema en específico, la localización, resulta interesante si se considera la resiliencia como un criterio primordial si se busca que todo tipo de empresas cuenten con continuidad en sus labores. Además, recordando lo indicado por Bhatia *et al.* (2013), los riesgos de interrupción son creados o magnificados debido a la forma en que se configura la cadena de suministro, lo cual se establece también a través de los determinantes descritos en la sección anterior y que se refiere al problema de localización.

La diversidad representa un enfoque adecuado para proponer un nuevo paradigma con respecto a los modelos de localización, ya que en este caso se busca que propicie el aumento de la resiliencia en la cadena de suministro considerando la acción y efectos de los fenómenos naturales. Pero ¿cómo la diversidad representa resiliencia y cómo se relaciona con el problema de localización de instalaciones?

Sheffi y Rice Jr. (2005) discuten algunas características que se deben considerar; por ejemplo, en el caso de localización de almacenes se relacionan el uso de inventario de seguridad, la consideración de capacidad extra, el manejo de proveedores redundantes, trabajar con componentes estandarizados y con procesos simultáneos. El problema de investigación que se está identificando es desarrollar un modelo de localización que permita mejorar la resiliencia en la cadena de suministro (debido a que el crecimiento de la economía mexicana depende de la continuidad de los negocios), y, debido a los efectos que provocan, considerar el peligro que representan los desastres naturales mediante la propiedad de diversidad; ¿la diversidad en



qué? la diversidad en las características que se pueden evaluar en los sitios potenciales para localizar cierta instalación. Incluso también se puede considerar el nivel de incidencia que tiene cada uno de los fenómenos naturales en los sitios donde se pretende localizar alguna instalación o varias al mismo tiempo.

Los determinantes de la resiliencia en la cadena de suministro mostrados anteriormente justifican y agregan validez a la propuesta de considerar diversidad como una propiedad resiliente. Se requiere diversidad si se piensa en la densidad de los nodos y relaciones, tal como se expuso en el caso de Taiwán. Considerando el determinante de la densidad, la diversidad puede entenderse como dispersión en la localización. La diversidad también es necesaria si se piensa en la complejidad: diversidad de opciones en nodos que pueden provocar dependencia, como se ejemplificó con la dependencia del proveedor de procesadores en las cadenas de suministro de computadoras personales. En este caso una mayor complejidad ayudará a contar con mayor resiliencia. Esta última explicación también abarca al último determinante, el número de nodos críticos, ya que la diversidad de opciones evitará esto.

El desarrollo de la propuesta de este trabajo de investigación explora un campo de conocimiento aún no profundizado. Si bien, se han encontrado diversos trabajos que abordan y comparten recomendaciones con respecto a la resiliencia y los riesgos a los que está sujeta la cadena de suministro, la mayoría de estas investigaciones delimitan sus resultados a modelos conceptuales. La información mostrada en las experiencias de otros investigadores ha servido para validar el desarrollo de este documento, el siguiente paso es seguir las recomendaciones y formular modelos matemáticos que expandan el cuerpo de conocimiento de este tema.

La diversidad como una propiedad que mejora la resiliencia ha asentado la base sobre la que se construirá el modelo matemático, por esto es que la propuesta de Kleindorfer y Saad (2005) se profundizará en el siguiente capítulo con el fin de que quede claro a qué se refiere este concepto. La siguiente pregunta que surge es: ¿cómo la resiliencia se puede ver reflejada en la localización de instalaciones? El siguiente subtema presenta una investigación que ayudará a responder esta interrogante.

1.7 EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN CONSIDERANDO LA RESILIENCIA

La decisión de localizar instalaciones es un problema que frecuentemente surge en el desarrollo de una organización. Por este motivo es que dentro de la literatura se pueden encontrar diversas formulaciones basadas en modelos matemáticos que pretenden solucionar este requerimiento al seleccionar las mejores ubicaciones. Sin embargo, los modelos de localización que buscan encontrar la mejor ubicación posible, es decir, la óptima, trabajan con el supuesto de que las instalaciones se desempeñarán continuamente, sin interrupciones. Medal (2012)



reconoce que este supuesto se considera válido en algunas ocasiones, pero si se tiene en cuenta una problemática como el cambio climático, la disponibilidad de las instalaciones se verá afectada por interrupciones que pueden ser prolongadas y que no deberían ser ignoradas en los modelos de localización de instalaciones.

Con este enfoque, Medal (2012) retoma los modelos de Investigación de Operaciones usados para ayudar a tomar la decisión de localizar instalaciones, aunque busca adaptarlos o mejorarlos para diseñar una cadena de suministro que se encuentre protegida de interrupciones. Dentro de los primeros análisis que realiza, recomienda en primera instancia considerar los siguientes argumentos:

- establecer dónde se almacenarán suministros de socorro;
- diseñar sistemas, en general, que sean menos vulnerables a interrupciones;
- planear la capacidad de la instalación de acuerdo con las interrupciones potenciales.

A partir del análisis sistémico que realiza Medal (2012), recomienda también considerar las instalaciones que suelen fungir como auxiliares de una cadena de suministro, las cuales también se pueden estudiar mediante los modelos de Investigación de Operaciones como las carreteras, los cruces, las instalaciones de suministro, los centros de transporte, los centros de distribución, entre otros. A pesar de que estos elementos pueden resultar ajenos a la conformación física propia de una empresa, debe enfatizarse que pueden formar parte de los criterios que determinen qué ubicación es la más adecuada para cierta infraestructura. Sin embargo, el autor establece que se debe priorizar la localización de instalaciones propias de una empresa. Por ejemplo, si una carretera o un cruce resulta inutilizable por cualquier causa de interrupción es muy probable que existan otras rutas que proporcionen una solución alternativa, pero si una planta o un almacén sufre una interrupción, en la mayoría de las ocasiones provocará que las operaciones se detengan, incluso imposibilitando recibir o enviar suministros.

Dentro de la misma investigación, Medal (2012) comparte la perspectiva de los problemas de localización en Estados Unidos. Identifica 18 sectores empresariales donde se pueden destacar instalaciones críticas, sin embargo, dentro de la Tabla 1.2 prioriza a sólo 7 de ellos. Esta información es relevante si se tiene la visión de aplicar la propuesta de esta investigación a otros campos.

A pesar de las sugerencias encontradas en la Tabla 1.2, para este trabajo de investigación es prioritario enfocarse en elementos de cualquier cadena de suministro, ya que se busca que pueda ser utilizada por cualquier empresa. Por esta razón, la atención debe centrarse en terminales intermodales, almacenes, fábricas o tiendas, elementos básicos en la conformación de cualquier organización.



Tabla 1.2 Sectores con instalaciones críticas

Sector	Instalaciones Críticas
Energía	Plantas de Energía y subestaciones
Tecnologías de la Información	Estaciones de conmutación de internet
Servicio Postal y Embarques	Instalaciones de Procesamiento
Comunicaciones	Torres de Transmisión
Sistemas de Transporte	Aeropuertos, Puertos, Terminales intermodales
Servicios de Emergencia	Hospitales, Estaciones de Bomberos
Agua	Instalaciones de tratamiento de aguas residuales

Tabla 1.2 Adaptado de Medal (2012).

Con la información obtenida dentro de este subtema, se tiene la certeza de determinar que la resiliencia es un aspecto necesario para tomar en cuenta dentro de un problema de localización, la cual será definido mediante la diversidad, criterio que se explorará para evaluar los sitios posibles. La última pregunta por explorar es: ¿la capacidad de resiliencia se puede emplear para localizar cualquier elemento de una cadena de suministro tomando en cuenta una diversidad de características entre los sitios considerados? La respuesta puede variar de acuerdo con la estructura de cada empresa, pero los elementos que pueden calificar con mayor frecuencia dentro de las características descritas son los almacenes. ¿Por qué? La localización de una sola planta puede realizarse mediante las formulaciones clásicas de investigación de operaciones en combinación de un método multicriterio para reducir el número de sitios posibles; la cantidad de instalaciones es determinante en la propuesta pensada en este trabajo. Por el otro lado, es más viable que una empresa se pueda ver en la necesidad de localizar varios almacenes, ya que estos elementos logísticos son claves en el funcionamiento y el crecimiento de una organización. Para dejar este tema más claro, el último subtema abordará la importancia de los almacenes, con el fin de esclarecer por qué su localización resulta un tema de estudio relevante.

1.8 LA LOCALIZACIÓN DE ALMACENES

La última consideración dentro de este capítulo es definir por qué los almacenes son los elementos adecuados para desarrollar una propuesta de localización resiliente medida bajo la propiedad de la diversidad. En primera instancia, Bhatia *et al.* (2013) ejemplifican que durante la crisis vivida en Tailandia en el 2011, debido a las inundaciones sufridas en este país, las empresas encargadas de manufacturar computadoras agotaron los inventarios existentes ya



que más de 1,000 fábricas fueron afectadas por este desastres natural, considerando que un cuarto de las provincias en Tailandia sufrieron los estragos. Incluso se predijo que la producción de discos duros se redujo en un 30% en el último trimestre del 2011. Con este caso, la consideración de inventarios extra para contener este tipo de interrupciones representa una decisión estratégica con el fin de que la cadena de suministro permanezca funcional, por lo que la localización de almacenes es un tema que se debe atender.

Korpela y Tuominen (1996) destacan que la decisión de localizar un almacén representa un elemento esencial dentro de la estrategia de distribución logística de una compañía. Puntualizan que la decisión de seleccionar sitios “óptimos” para los almacenes causa efectos significativos en medidas de desempeño como el servicio al cliente y los costos logísticos; estas medidas de desempeño resultan prioritarias teniendo en cuenta la estrategia comercial que buscan fortalecer la Secretaría de Economía y ProMéxico.

Korpela y Tuominen (1996) reconocen que la selección de un sitio para un almacén resulta compleja ya que recomiendan analizar criterios cualitativos y cuantitativos para tomar la mejor decisión. Inclusive critican que los modelos de localización sigan considerando la disminución de costos como único objetivo; postura polémica ya que la mayoría de las empresas procura este tipo de objetivos. La crítica se extiende debido a que la mayoría de las empresas no analizan los riesgos de interrupción en que se encuentran inmersos, como se ha expuesto en el subtema 1.3, ya que se enfocan en estrategias que buscan el máximo aprovechamiento. A través de este capítulo, se ha presentado que la resiliencia es necesaria en el funcionamiento de las organizaciones aunque sufra de una probable desaprobación (misma postura de Korpela y Tuominen (1996) con respecto a la localización de almacenes), debido a que se contrapone a las estrategias que alientan la máxima eficiencia y la minimización de costos.

Retomando las recomendaciones de los autores mencionados, se establece que la localización de almacenes cuenta con una importancia fácil de identificar ya que cuenta con una gran influencia en el desarrollo de otras áreas de trabajo, como el transporte, la gestión de inventarios y la distribución. Esto se puede traducir a que los flujos de materiales, productos terminados, dinero e información pasan por las instalaciones de los almacenes de cualquier cadena de suministro. Además, acotando a la problemática del impacto de los desastres naturales en las cadenas de suministro, Miguel Llovera (2017) apunta que dichos fenómenos provocan la disminución de la producción de los productos básicos en las zonas productivas que se vean afectados. Esto, en consecuencia, provocará que también disminuya el abastecimiento de dichos productos por lo que ocasionará que surja una necesidad de contar con inventario extra que permita suministrar a la demanda extraordinaria. Es decir, bajo el efecto de los desastres naturales, se requiere que las empresas dedicadas a ciertos productos o servicios cuenten con inventarios necesarios para satisfacer la demanda incremental para poder soportar un posible paro en la producción. Miguel Llovera (2017) proporciona con este



ejemplo la razón medular de que la localización de varios almacenes es una decisión estratégica necesaria para atender la demanda extraordinaria de ciertos productos que se pueden requerir debido a la acción de las catástrofes naturales, así como también expone que es un método de prevención ante posibles paros de producción y como una medida que permitirá que los precios de dichos productos no sufran un aumento, caso contrario si se presentará una escasez. Estrictamente en el problema de localización, Korpela y Tuominen (1996) sugieren la consideración de los siguientes puntos:

- determinar si las instalaciones del almacén serán propiedad de la organización, arrendadas o rentadas;
- establecer el tamaño óptimo y el número de almacenes requeridos;
- localizar las ubicaciones óptimas para los almacenes.

Teniendo en cuenta que el problema a resolver es la mejora de la resiliencia, las recomendaciones dadas por Korpela y Tuominen (1996) resultan de utilidad en la definición de la diversidad dentro de un modelo matemático. La diversidad en las características de los sitios considerados para localizar un almacén propiciarán una mejora en la resiliencia, ya que la propuesta se está construyendo de acuerdo con las determinantes de la resiliencia: disminuir la densidad de los nodos de la cadena de suministro (dispersión de los almacenes, de modo que la totalidad no se vea afectada simultáneamente por un fenómeno natural), agregar complejidad a la cadena de suministro (considerar la localización de varios almacenes con el fin de no ser dependiente de una instalación que pueda estar en riesgo) y la disminución en el número de nodos críticos (un mayor número de almacenes evitará que éstos se conviertan en nodos críticos).

La investigación de Korpela y Tuominen (1996) ha brindado validez y robustez a la propuesta de este trabajo de investigación, reflejado en su constante invitación al establecimiento de nuevos criterios de localización de almacenes. De acuerdo con la evolución del funcionamiento de las cadenas de suministro, así como de las investigaciones concernientes, en la Figura 1.19 se muestra la evolución de los criterios que han sido eje en el problema de localización, resaltando la tendencia al cambio y a la mejora. La resiliencia es el criterio y el nuevo enfoque propuesto en esta investigación con el fin de aportar otra perspectiva, si se prioriza la gestión de los riesgos disruptivos en las cadenas de suministro.



Figura 1.19 Evolución de los criterios considerados en la localización de almacenes

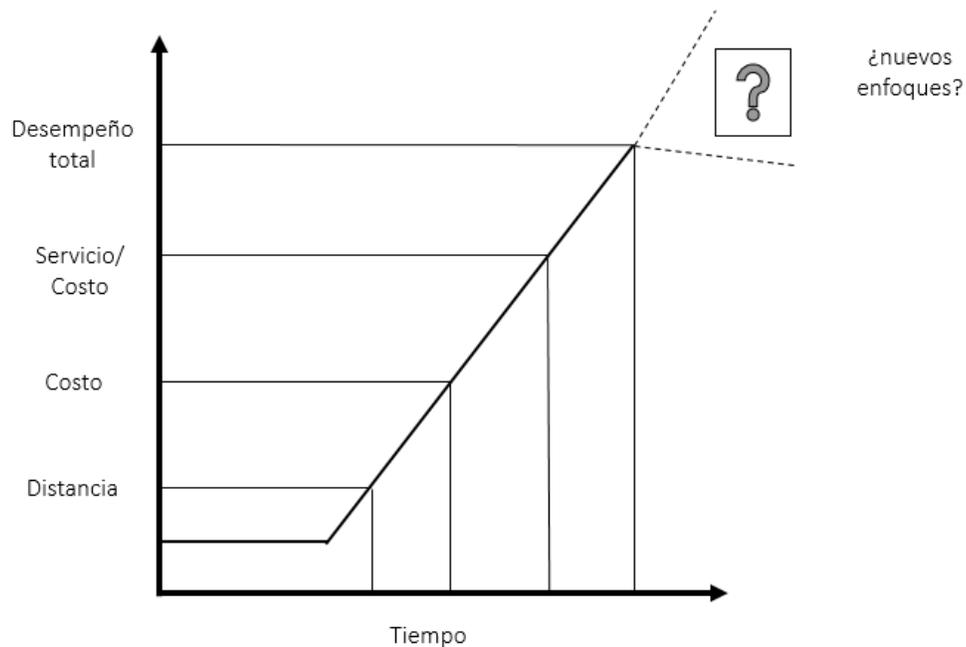


Figura 1.19 Adaptado de Stock y Lambert (2013).

Con el desarrollo del último objeto de estudio de este trabajo de investigación – la última pieza del rompecabezas -, este capítulo finaliza con la definición del problema de investigación. El problema de investigación permite que, de manera clara y concreta, se conozca qué se está tratando de solucionar. Incluso, Korpela y Tuominen (1996) exponen que una de las técnicas que han ayudado a enfrentar los riesgos que enfrentan las organizaciones recae en la localización de inventarios de seguridad.

1.9 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A lo largo de este capítulo, mediante la presentación de diferentes problemáticas y objetos de estudio, pieza por pieza se ha construido un problema que regirá la investigación de este documento. La exposición de diferentes situaciones que han encontrado convergencia - un punto en común - ha permitido la identificación de una brecha dentro del cuerpo de conocimiento referente a los temas estudiados en cada subtema.

Si se toma en cuenta la problemática que confiere el desarrollo económico del país, a través del funcionamiento continuo de las cadenas de suministro, se logró identificar la estrategia comercial que buscan impulsar la Secretaría de Economía y ProMéxico. A su vez, dentro de las proyecciones de dicha estrategia se ha establecido como una de las metas: provocar la



localización de instalaciones extranjeras y mexicanas, a partir del fortalecimiento entre el vínculo de empresas transnacionales con proveedores nacionales. Con esto, este trabajo enfatiza que uno de los criterios en especial que permitirá que la meta se pueda alcanzar es asegurar lo más posible la continuidad de las actividades productivas; aquí es donde entra el concepto de resiliencia en la discusión y, por ende, las causas de interrupción de una cadena de suministro.

Estudiando la naturaleza de las causas de interrupción, los desastres naturales destacaron por provocar los daños más severos en las cadenas de suministro y en las diferentes regiones en general, además de que son eventos que las personas no pueden controlar y que son imposibles de impedir, a diferencia de otras causas de interrupción. Una vez que se estableció que la resiliencia representa el aspecto a atender, se determinaron las características que lo definen – densidad, complejidad y nodos críticos - y la propiedad que permite que pueda aumentar, la diversidad.

Finalmente, se analizó que el problema de localización dentro de la cadena de suministro representa una necesidad si se está considerando la resiliencia y que la localización de almacenes constituye el acercamiento más pertinente y significativo para atender los efectos de los desastres naturales y, por ende, probar la validez de esta propuesta.

Una vez que se ha repasado de qué manera se fue construyendo el problema de investigación, a continuación, se finaliza con la declaración de éste.

Figura 1.20 Definición del problema de investigación



Formular un modelo de localización de almacenes incorporando la propiedad de diversidad como criterio de localización para aumentar la capacidad de resiliencia en la cadena de suministro.

Figura 1.20 Elaboración propia.



A través de la definición del problema de investigación se puede formular una pregunta de investigación que el desarrollo de este trabajo responderá; de acuerdo con los factores que componen el objeto de estudio de este documento, se puede definir la pregunta de investigación como:

¿considerar a la diversidad en las características de sitios posibles para localizar almacenes aumentará la resiliencia en una cadena de suministro establecida en México?

Con el problema y las preguntas de investigación acotados, el siguiente paso dentro de esta investigación consiste en explorar qué se ha hecho para resolver dicho problema. Diferenciando que la valía de cada trabajo de investigación se basa en la propuesta de un nuevo problema o la identificación de una brecha no abordada en otros trabajos, no se encontrarán investigaciones que resuelvan exactamente el mismo problema de investigación. Sin embargo, lo que se puede realizar es una búsqueda y revisión de literatura cercana a los elementos de estudio que conforman el problema de investigación. Estas fuentes de información servirán como referencias de metodologías, modelos y definiciones que han estudiado, en el caso de este trabajo, el tema de resiliencia en la cadena de suministro, las propuestas de indicadores o mediciones de la resiliencia, la localización de almacenes y la definición de diversidad en problemas de localización; esto permitirá desarrollar una propuesta de solución. El siguiente capítulo presenta la revisión de literatura descrita, la cual constituye el marco teórico de esta investigación.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

Con el problema de investigación definido, el siguiente paso es averiguar cómo se puede solucionar. Puede ser que el investigador cuente con ciertos conocimientos que le permitan acercarse a una solución, sin embargo, se debe tener en cuenta que la información disponible para cualquier campo de conocimiento es amplia. Pueden presentarse casos en que otros investigadores ya hayan abordado problemas similares al propio y dentro de sus trabajos se encuentren recomendaciones o trabajo futuro que permitan guiar el trabajo propuesto.

Debido a que se requieren hallar investigaciones que proponen formulaciones matemáticas, métodos o criterios que se han empleado en investigaciones afines a este trabajo, el marco teórico de esta investigación se ha dividido en cuatro temas principales.

En el capítulo anterior se enfatizó la importancia de la capacidad de resiliencia de la cadena de suministro. A pesar de que ya se ha explicado previamente, este tema se vuelve a abordar, pero con el enfoque de identificar criterios propuestos, formulaciones matemáticas o metodologías que puedan aportar a la propuesta de solución. Por ejemplo, recordando que los fenómenos naturales son la causa de interrupción a considerar, la identificación de factores de riesgo que favorecen los efectos de esta causa de interrupción será de gran ayuda para construir criterios adecuados dentro de la solución.

Posteriormente, se hace necesario conocer de qué forma se mide la resiliencia en la cadena de suministro, por lo que el segundo tema aborda diferentes investigaciones que proporcionan diversos enfoques que intentan determinar la forma en que se puede establecer que una cadena de suministro está mejorando su resiliencia.

El tercer tema estudiado en la literatura es el problema de la localización de almacenes. Al ser el objeto de estudio que definirá la construcción del modelo matemático que solucione el problema, es prioritario conocer qué se ha hecho hasta ahora en esta materia. Desde formulaciones clásicas hasta aquellas que se acerquen a la resiliencia, es necesario concertar la literatura acerca de los diferentes aspectos que conforman los modelos que resuelven este problema.

Finalmente, se expone literatura relacionada con el método de solución que se emplea en este trabajo de investigación, la formulación del Problema de Diversidad Máxima. Al encontrar que este modelo matemático reúne características que se apegan al problema dado, se analiza de qué forma se ha aplicado para resolver los problemas de localización.



Este capítulo concentra la información relevante que permitió la identificación de un método de solución, así como las consideraciones que se deben tener presentes mientras se construye la formulación que solucionará el problema de investigación.

2.2. LA EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EN RESILIENCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

En el capítulo anterior se abordó de manera concreta el significado, las implicaciones y factores (determinantes) que pueden definir la resiliencia de una cadena de suministro ya que este concepto forma parte del problema de investigación. Debido a que se requiere asegurar la continuidad de las operaciones de las empresas para que se concrete la estrategia comercial de la Secretaría de Economía y ProMéxico y así fortalecer el crecimiento económico, la resiliencia es el criterio adecuado dada la constante presencia de causas de disrupción, específicamente para evitar o disminuir los efectos que pueden ocasionar los fenómenos naturales.

Sin embargo, resulta necesario explorar con mayor profundidad este tema en particular, con el fin de discernir las tendencias metodológicas y las líneas de pensamiento que están abordando este problema y, así, la propuesta resultante de este trabajo se construya bajo fundamentos teóricos y prácticos bien establecidos. La revisión de la literatura de este tema también representa una validación conceptual del problema de investigación, de tal forma que se pueda asegurar que este trabajo robustece el cuerpo de conocimiento. La información que se presenta a continuación conforma un marco teórico referente a las implicaciones de considerar o no la resiliencia como un criterio preponderante en la gestión de la cadena de suministro.

Abe y Ye (2013), como miembros de la Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas, subrayan la importancia de construir cadenas de suministro resilientes que puedan combatir los efectos de los desastres naturales. La consideración de los desastres naturales como una causa mayor de disrupción en las cadenas de suministro globales es ejemplificada a través de los casos del terremoto ocurrido en Japón el 11 de marzo de 2011, que conllevó a un posterior tsunami y a la fusión en los reactores nucleares en Fukushima, y las inundaciones ocurridas en Tailandia en el mismo año. Al igual que Ramírez Estrada *et al.* (2016), Abe y Ye (2013) enfocan el problema hacia cadenas de suministro globales, ya que identifican que las empresas buscan aprovechar las ventajas de la globalización, es decir, consideran ubicar algunas funciones operativas dentro de la economía de otro país con el fin de encontrar un beneficio económico, intelectual o estratégico. Con el fin de visualizar el significado de las cadenas de suministro globales, en la Figura 2.1 se muestra un ejemplo para diferenciar una cadena de suministro que



mantiene todas sus operaciones dentro de un solo país y las cadenas de suministro globales que cuentan con instalaciones y redes de distribución ubicadas en diferentes países.

Figura 2.1 Comparación de las cadenas de suministro nacionales y globales

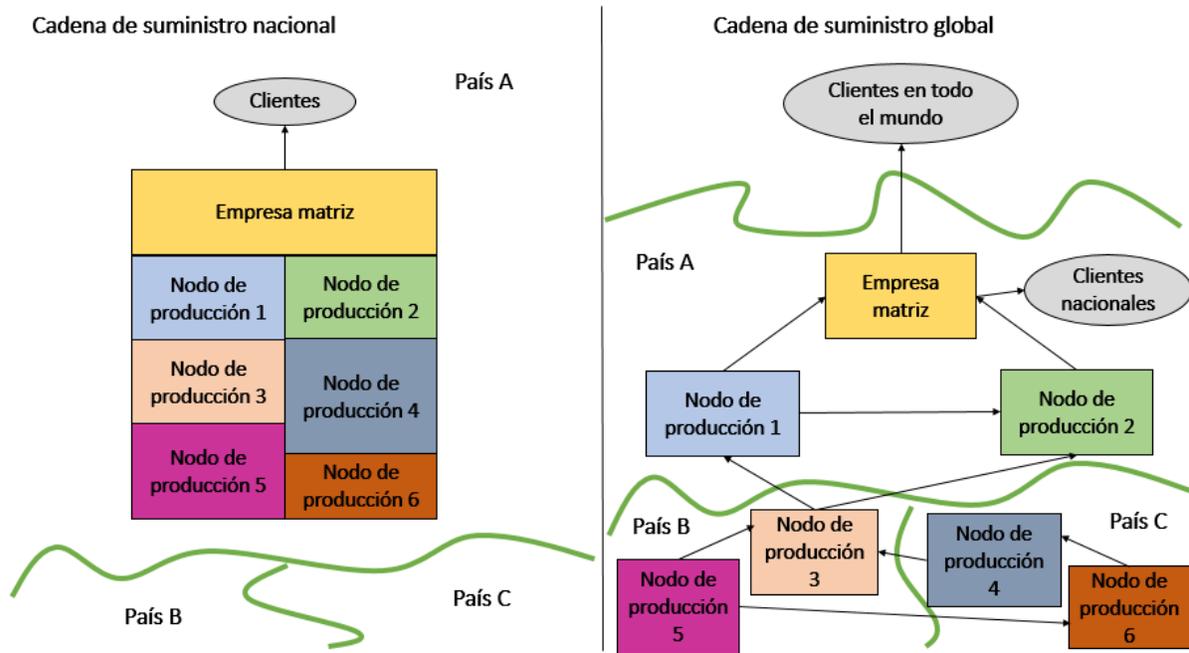


Figura 2.1 Adaptado de Abe & Ye (2013).

Las empresas pretenden tomar ventaja de las diferencias en las tecnologías, el talento y los precios de componentes a través de las características de ciertas ubicaciones, donde sus operaciones se ejecutarán con menores costos de producción, con mejoras en la calidad y estableciendo una expansión de la influencia de la empresa.

¿Por qué es importante tener presente que se están estudiando cadenas de suministro globales? Abe y Ye (2013) establecen que la tendencia de las organizaciones a expandir sus operaciones en diferentes países provoca que éstas incurran en el aumento de los riesgos ya que resulta más difícil que la empresa matriz identifique los riesgos al deslindarse físicamente de ciertas actividades. Ejemplifican que cuando un desastre natural logra impactar directa o indirectamente a un nodo de la cadena de suministro de una empresa, los efectos no se limitarán al país donde se presenta dicho fenómeno, debido al funcionamiento del sistema de la cadena de suministro. Es por ello por lo que concluyen que mejorar la resiliencia considerando los desastres naturales mantendrá la competitividad de las empresas al no interrumpir el cubrimiento de la demanda, además de que su salud y fortaleza económica permanecerán al no interrumpir sus labores. También destacan la importancia de la cooperación y comunicación entre los gobiernos y las empresas para que la gestión de las



cadenas de suministro pueda evitar los efectos negativos de los fenómenos naturales, al igual que lo mencionado en Bhatia *et al.* (2013). A pesar de que los desastres naturales no se presentan todos los días en cada lugar, la gravedad de los daños cuando ocurren puede provocar que se requieran meses y hasta años para la recuperación.

Al considerarse una cadena de suministro, siempre se debe tener en cuenta que existe interdependencia entre los nodos y los arcos que la conforman y aumenta cuando se depende de terceros o cuando se cuentan con sistemas productivos basados en eficiencia como *just-in-time* o *lean-manufacturing*. Cuando una cadena de suministro sufre un daño, los proveedores y los clientes también se verán afectados, por lo que se puede decir que las pérdidas son sistémicas. Los desastres naturales ocurridos en Japón y Tailandia muestran el poder devastador que esta causa de interrupción puede tener con respecto a una cadena de suministro, por lo que los investigadores de la ONU concluyen que es esencial mejorar la resiliencia considerando este riesgo.

Abe y Ye (2013) también aportan conocimiento con respecto a la localización de almacenes y la consideración de la diversidad como una propiedad de resiliencia. Establecen que los almacenes son elementos con mayor tendencia a localizarse en países extranjeros o, en su defecto, las empresas contratan proveedores foráneos que realicen gestiones de inventario. Bajo esta idea, se puede indicar que los almacenes son elementos que se encontrarán bajo el riesgo de los desastres naturales. Por otro lado, también mencionan que algunas empresas deciden concentrar sus instalaciones en una sola región con el fin de disminuir tiempos de entrega y costos, incluso localizándose en costas o zonas cercanas a ríos. Este tipo de casos refieren a un determinante de la resiliencia descrito en el capítulo anterior, *la densidad dentro una cadena de suministro*. Lo ocurrido en Japón prueba que es un gran riesgo mantener instalaciones tan cercanas entre sí. Al ocurrir el terremoto, el tsunami y la fusión de los reactores nucleares en Fukushima, cadenas de suministro enteras quedaron devastadas. Es en este tipo de casos donde lo recomendado por Kleindorfer y Saad (2005), *diversificar la localización de instalaciones*, puede ser aplicado.

Prasad, Su, Altay y Tata (2014) también estudian las interrupciones provocadas por los desastres naturales en las cadenas de suministro, aunque enfocan su estudio en los efectos hacia las microempresas. Este enfoque complementa las indicaciones de Abe y Ye (2013) ya que también exponen una preocupación particular por este estrato de empresas, identificándolas como empresas altamente vulnerables y con una gran probabilidad de resultar afectadas si un desastre natural las afecta, hasta el punto de la bancarrota debido a sus recursos limitados. Prasad *et al.* (2014) indican que la importancia de las microempresas radica en su papel como fuentes importantes de suministros para empresas pequeñas, medianas y transnacionales y viceversa. Las microempresas dependen de las operaciones de empresas más grandes para sobrevivir, por lo que deben considerarse al estudiar cómo mejorar la resiliencia.



Además de los recursos limitados que poseen las microempresas, Prasad *et al.* (2014) destacan otras causas que definen su vulnerabilidad: la falta de capacidad para adquirir un seguro formal en el momento de requerirlo, la negación de cuentas de crédito, la imposibilidad de que los socios de la microempresa puedan implementar cualquier estrategia para afrontar los riesgos ya que cuando ocurre un desastre natural generalmente también se ven afectados, la venta obligada de todos los bienes productivos para recuperarse tras las pérdidas ocasionadas por los desastres naturales, así como la negación de las ayudas gubernamentales puesto que las microempresas carecen de la documentación necesaria para solicitarla, recordando que la mayoría de ellas se desarrollan en la informalidad. Los investigadores exponen que estas circunstancias han sido identificadas en el acontecimiento de varios desastres naturales como el tsunami en el Océano Índico en diciembre del 2004, el huracán Katrina en agosto del 2005 y el terremoto de Haití en enero del 2010; en todos estos casos, el apoyo gubernamental fue mínimo o inexistente. La situación es aún más crítica ya que las microempresas representan, en su mayoría, los suministros de las poblaciones con menores recursos económicos.

Prasad, Su, Altay y Tata (2014) sugieren tres medidas para solucionar el problema de las microempresas: construir conciencia y desarrollar la atención requerida ante la ocurrencia de desastres, aprender de la experiencia de manejar los desastres y explotar formas diferentes del capital social. Basan estas medidas en sus estudios realizados en India, sin embargo, extienden sus recomendaciones hacia los países en desarrollo, ya que son vulnerables a los desastres naturales y repetidamente sufren de inundaciones, deslizamientos de tierra, tormentas y otros eventos. En el caso de India, a pesar de sufrir de diversos desastres naturales, ha mejorado la resiliencia de algunas microempresas siguiendo las acciones propuestas. Aunque este trabajo de investigación propone otro tipo de solución, el caso de India puede tomarse en cuenta para México, ya que ambos son países que son afectados por diversos desastres naturales. Una estrategia de resiliencia brinda mejoras en el apoyo a microempresas, organizaciones que requieren de ayuda si se considera que representan el 95.7% de las empresas en el país.

A pesar de los buenos resultados obtenidos en India, Prasad *et al.* (2014) reconocen la necesidad de complementar su propuesta con modelos cuantitativos para medir la resiliencia. Recordando otro determinante de la resiliencia en la cadena de suministro, la complejidad, se considera que en ocasiones resulta ventajoso crear una mayor cantidad de enlaces entre los nodos de manera que, a pesar de la ocurrencia de un desastre, se pueda asegurar que los flujos de información y recursos permanezcan, lo cual puede aumentar la resiliencia de la cadena de suministro de una microempresa.

Ahora, teniendo en cuenta que esta investigación trata de las cadenas de suministro que localicen alguna actividad en el país, o bien que la cadena entera esté ubicada en México, se retoma la investigación realizada por Cedillo Campos (2011). El investigador realiza un reporte acerca de la evaluación de los riesgos en las cadenas de suministro en México, una encuesta



pionera en este tema dentro del país. Esto se requiere destacar ya que el país comienza a considerar a la evaluación de los riesgos como una necesidad prioritaria y un asunto vital para que una empresa mantenga su competitividad. Este hecho alienta que, al igual que este trabajo, comiencen estudios e investigaciones enfocadas en la evaluación de riesgos dentro del país, con el fin de sugerir metodologías que permitan desarrollar estrategias que mejoren la resiliencia.

Considerando que la inseguridad ha sido el problema social más importante durante los últimos 15 años, Cedillo Campos (2011) enfoca la evaluación a esta problemática, aunque reconoce que no es el único riesgo presente en el país. Identifica que la inseguridad ha sido la causa de disrupción que ha motivado que las empresas comiencen a implementar gestiones del riesgo. Esto se refleja en las pérdidas económicas que este problema social representa, equivalentes al 15% del Producto Interno Bruto (PIB); además, se ha registrado que alrededor de 10,000 camiones han sufrido asaltados anualmente, por lo que los costos de servicios se han incrementado en 40%. México atraviesa un problema profundo de inseguridad y se ha convertido en un problema de gran magnitud debido a que el narcotráfico se ha constituido como la causa principal de esto, consentida por la corrupción e impunidad que presumen los narcotraficantes, así como con los funcionarios públicos involucrados. Por ello, Cedillo Campos (2011) expone algunos factores que han ocasionado el aumento en el nivel de riesgo en la seguridad de las cadenas de suministro, con base en la revisión de literatura, los cuales se presentan en la Figura 2.2.

Figura 2.2 Factores más importantes que incrementan el riesgo de disrupción de las cadenas de suministro hacia la inseguridad

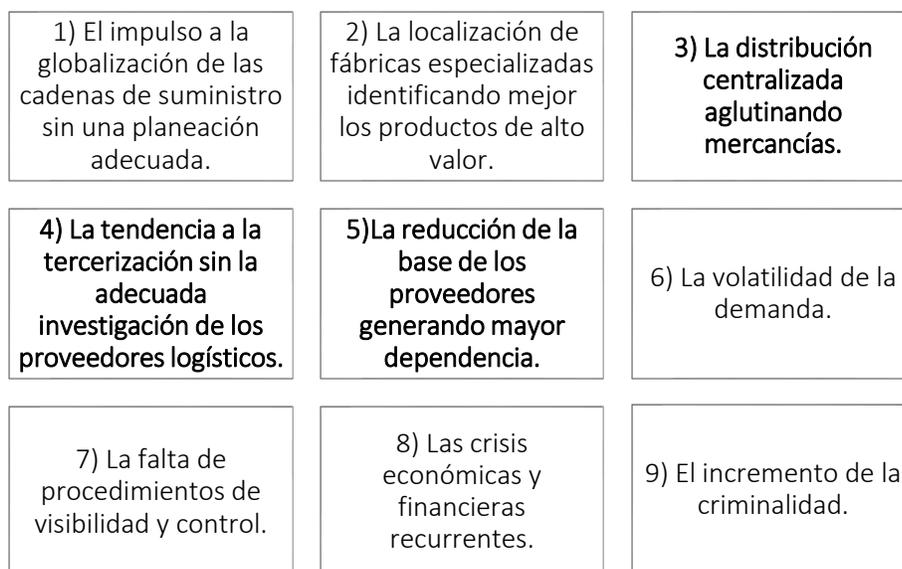


Figura 2.2 Adaptado de Cedillo Campos (2011).



A pesar de que el análisis de estos factores se orienta estrictamente al riesgo en la seguridad, se puede identificar que varios factores pueden ser considerados como causas de los riesgos de cualquier interrupción. Además, el factor 3: “La distribución centralizada aglutinando mercancías” se puede relacionar con el determinante de *densidad*, el factor 4: “La tendencia de tercerización sin la adecuada investigación de los proveedores logísticos” repercute en la *densidad, complejidad y en la criticidad de los nodos*, y el factor 5: “La reducción de la base de los proveedores generando mayor dependencia” se refiere al determinante de la *criticidad de los nodos*. En concreto, se muestra que la relevancia de la resiliencia en la cadena de suministro es innegable y prioritaria, no importando la causa de interrupción que se esté estudiando.

Para esta investigación resulta relevante retomar la información proporcionada por Cedillo Campos (2011), ya que a pesar de que la causa de interrupción abordada en esta investigación es la ocurrencia de los desastres naturales, es necesario conocer las prioridades que están guiando las investigaciones en México. Resulta sorprendente que, a pesar de que el tema de inseguridad es una causa muy importante en México, de acuerdo con los resultados de la evaluación llevada a cabo, la mayoría de los encuestados mencionó no considerar a la inseguridad como la causa de interrupción más importante.

Regresando al tema general, Sheffi y Rice Jr. (2005) recomiendan la creación de redundancia en la cadena de suministro (apertura de un mayor número de instalaciones) y el incremento de la flexibilidad como medidas para aumentar la resiliencia. Estas estrategias corresponden con los determinantes de la resiliencia expuestos por Craighead *et al.* (2007), además de que se adaptan al problema de localización de almacenes bajo los efectos de los desastres naturales ya que ubicar un número de almacenes que permita contemplar demanda no planeada, como lo sugiere Miguel Llovera (2017), o interrupciones conlleva a considerar a la redundancia y a la flexibilidad como estrategias que pueden coexistir con gestiones que tengan como objetivo ser eficientes; contar con materiales extra que permitan responder ante variantes de demanda o como *stock* de seguridad si alguna interrupción ocurre puede representar un planteamiento que permita formar un inventario estratégico que considere los peores escenarios. Esto explica el planteamiento de la solución que esta investigación propone, la localización de varios almacenes de manera que, ante la presencia de un desastre natural, existan diferentes almacenes que logren cubrir el faltante en el que se encontrará la instalación afectada. Sin embargo, la localización debe considerar criterios que no permitan que varios almacenes en un mismo instante se vean afectadas por el mismo desastre natural. Estas características pueden evaluarse de acuerdo con la propiedad de la diversidad.

Kleindorfer y Saad (2005) desarrollan un marco conceptual acerca de los riesgos que afectan el diseño y la gestión de la cadena de suministro. El trabajo realizado por estos autores representa uno de los principales ejes que sustentan la propuesta de esta investigación, es por ello por lo que se profundizará en las recomendaciones recuperadas del mismo. En primera instancia,



Kleindorfer y Saad (2005) establecen una clasificación con respecto a los riesgos de la cadena de suministro, la cual se muestra en la Figura 2.3 y se puede entender como complemento de la información mostrada por Mensah *et al.* (2015) en la Figura 1.2.

Figura 2.3 Clasificación propuesta por Kleindorfer y Saad (2005) acerca de los tipos y las causas de riesgos que afectan a la cadena de suministro.

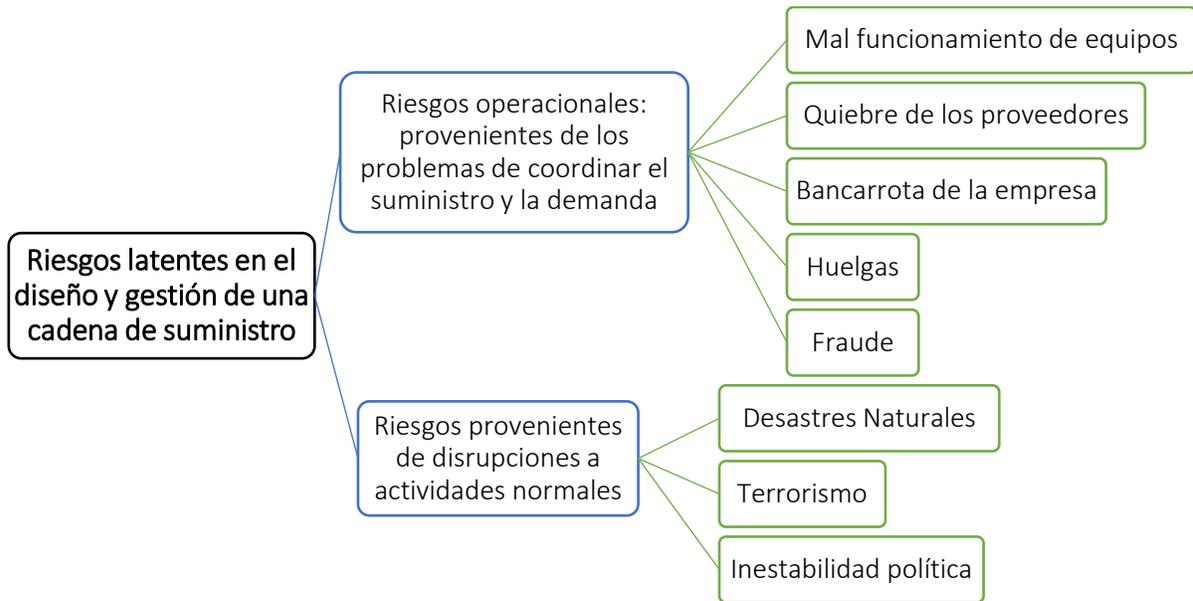


Figura 2.3 Adaptado de Kleindorfer y Saad (2005).

La clasificación mostrada en la Figura 2.3 se presenta ya que, al diferenciar el origen de cada tipo de riesgos, Kleindorfer y Saad (2005) estipulan que sus estudios se orientan en los riesgos provenientes de interrupciones que están fuera de las actividades normales, es decir, que no se encuentran dentro del control que puede ejercer una organización en su cadena de suministro; esto coincide con el enfoque de esta investigación: concentrar las acciones de prevención con respecto a los desastres naturales.

A pesar de que los autores guían su investigación con base en la información proporcionada por la Industria Química de los Estados Unidos en el periodo comprendido de 1995 a 2000, periodo con una fuerte tendencia hacia los riesgos relacionados con el terrorismo o la acción de agentes con el propósito de dañar algún elemento o la cadena de suministro total de alguna organización, los académicos no pasan por alto destacar los efectos provocados por terremotos, huracanes y tormentas sufridos en Estados Unidos, Japón y Taiwán. Esto reivindica la importancia que conlleva considerar los desastres naturales para la preservación de la cadena de suministro. Los autores reconocen que esta problemática necesita el desarrollo de



alternativas en el diseño de la cadena de suministro, estableciendo que es un área de conocimiento emergente que requiere ser profundizada.

Kleindorfer y Saad (2005) también puntualizan que, debido a los requerimientos del mercado, las empresas se han visto obligadas a recorrer caminos cada más largos y cumplir con tiempos de entrega cada vez más cortos. Estas condiciones propician que la probabilidad de que algún evento disruptivo interrumpa o impida que una actividad se lleve a cabo aumente. Por esto, proponen tres tareas para establecer una mejor gestión del riesgo, denominadas SAM por sus siglas en inglés:

S: *Specifying sources of risk and vulnerabilities* (especificar fuentes de riesgo y vulnerabilidades);

A: *Assessment* (evaluación);

M: *Mitigation* (mitigación).

Sin embargo, antes de poner en práctica estas tareas, recomiendan diez principios que los directivos de las organizaciones deberían de considerar al diseñar y gestionar su respectiva cadena de suministro. En la Figura 2.4 se presentan los principios formulados por estos investigadores. Se puede notar que algunas propuestas de estos principios se han diferenciado de los demás ya que representan nociones que se relacionan con las determinantes de la resiliencia. Pero, el principio número 2 representa la aportación más importante del trabajo de Kleindorfer y Saad (2005) para este trabajo, sobre el cual se guía el método de solución. *Valerse de la premisa sostenida por la Teoría de la Cartera: La diversificación reduce el riesgo*: este principio es una extensión de la Teoría de la Cartera en el ámbito financiero. Se establece que la diversificación de portafolios reduce el riesgo al que está sujeto el inversionista. Mediante una diversificación multidimensional se puede alcanzar la minimización de riesgos.

Considerando esta idea, Kleindorfer y Saad (2005) invitan a que se extienda su aplicación en diferentes decisiones dentro de la cadena de suministro:

- *la localización de instalaciones;*
- *la oferta de un producto o de un servicio;*
- *las opciones de abastecimiento usadas;*
- *modos y procesos de operación.*

Como se ha descrito anteriormente, esta investigación aborda la localización de instalaciones debido a la estrategia comercial desarrollada por la Secretaría de Economía y ProMéxico. La continuidad de las operaciones industriales representa el objetivo a alcanzar y sobre ésta, se ha identificado que se requiere mejorar la resiliencia.



Figura 2.4 Principios basados en literatura de la gestión del riesgo industrial

- 1) Poner su propia casa en orden antes de esperar o requerir que otros involucrados en la cadena de suministro lo hagan.
- 2) Valerse de la premisa sostenida por la Teoría de la Cartera: La diversificación reduce el riesgo.
- 3) Considerar que la robustez de una cadena de suministro se define conforme al enlace más débil en ella.
- 4) Prevenir es mejor que curar.
- 5) Analizar que la esbeltez y eficiencia extrema en una cadena de suministro pueden incrementar la vulnerabilidad de la misma.
- 6) Establecer sistemas de respaldo, planes de contingencia y mantener holguras razonables como medida para incrementar el nivel de preparación en la gestión del riesgo.
- 7) Reconocer que el intercambio de información colaborativa y la cultura de mejores prácticas entre los socios de una cadena de suministro resultan esenciales en la identificación de vulnerabilidades y en la preparación y ejecución de la gestión del riesgo.
- 8) Enlazar la evaluación y la cuantificación del riesgo con opciones de gestión del riesgo *ex-ante*.
- 9) Considerar que la modularidad del proceso y de los diseños del producto, así como otros elementos que generen agilidad y flexibilidad en la cadena de suministro pueden ayudar en la reducción del riesgo.
- 10) Aplicar principios de TQM (*Total Quality Management*) como *Six Sigma*.

Figura 2.4 Adaptado de Kleindorfer y Saad (2005).

La incorporación de la diversidad en la determinación de lugares adecuados para la localización de almacenes está basada en las recomendaciones de Kleindorfer y Saad (2005). Esta idea se robustece al considerar las hipótesis que presentan los investigadores acerca del problema de localización, mostradas en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Hipótesis de Kleindorfer y Saad acerca de la localización de instalaciones considerando la resiliencia

1. Las características de una instalación tendrán un impacto importante en la frecuencia y en la severidad de las interrupciones que pueda sufrir, siendo las más importantes:

- La localización de la instalación;
- El tamaño de la instalación;
- El tipo de peligros que presenta;
- Las características de la empresa matriz o de la empresa propietaria de la instalación (estructura de capital, ventas, etc.)

2. La naturaleza de las regulaciones que una instalación enfrenta y cómo serán aplicadas repercutirán en la frecuencia y la severidad de interrupciones observadas en la instalación.

3. Las características socio-demográficas de la comunidad donde se localice la instalación afectarán el nivel de presión provocada en la instalación para operar de manera segura, así como informar a la comunidad de los peligros que puedan enfrentar. La presión se tornará negativa de acuerdo con la frecuencia y la severidad de las interrupciones en la instalación.

Figura 2.5 Adaptado de Kleindorfer y Saad (2005)

Estas hipótesis resultan de gran importancia ya que describen características que deben ser observadas en el momento de considerar la localización de una instalación. Dentro de la propuesta de incluir a la diversidad como un criterio de localización, se requerirá determinar características que representen diversas combinaciones con el fin de que la diversidad sea maximizada. Características como el tamaño de la localización, el tipo de peligros - los desastres naturales más frecuentes en ciertas regiones - y conocer las características sociodemográficas serán determinantes para que el concepto de diversidad represente incrementar la resiliencia. Con la información consultada en el tema de la resiliencia en la cadena de suministro, se han obtenido los criterios y recomendaciones suficientes para construir el modelo de localización de almacenes. A través de la Tabla 2.1 se puede observar las aportaciones más relevantes obtenidas de la revisión de la literatura referente al tema abordado en esta sección. Además de los criterios obtenidos de las referencias consultadas, en la Tabla 2.1 también se destaca información que brindó robustez y validez al problema de investigación planteado en este trabajo.

El siguiente tema abordado es la forma en que se puede medir la resiliencia en la cadena de suministro y, en específico, cómo se puede ver reflejada en el problema de localización ya que, dentro del problema de investigación descrito en el capítulo anterior, se establece que el fin es desarrollar una modelo de localización de almacenes para aumentar los niveles de resiliencia en la cadena de suministro.



Tabla 2.1 Investigaciones acerca de la importancia de la resiliencia en las cadenas de suministro

Autores	Industria estudiada	Método de solución	Principales hallazgos	Aportaciones al trabajo de investigación
Paul R. Kleindorfer y Germaine H. Saad (2005)	Industria Química (Estados Unidos)	Construcción de su propia metodología, llamada SAM (<i>Specifying sources of risk and vulnerabilities, Assessment and Mitigation</i>).	Se aconseja unir las medidas de evaluación y mitigación de riesgos en un solo ejercicio.	<p>Diversidad como criterio resiliente en la localización de instalaciones con el fin de disminuir el riesgo en la cadena de suministro.</p> <p>Características que deben ser estudiadas en los lugares en que se pretenda localizar alguna instalación: Características sociodemográficas del lugar, tamaño de la instalación, tipo de peligros presentes, características del propietario del lugar.</p>
Masato Abe y Ye Linghe (2003)	Industria Electrónica <i>Renesas Electronic Corp.</i> (Japón) y diversas industrias tailandesas	Estudio de los efectos de los desastres naturales acontecidos en 2011 en Japón y en Tailandia	Ejemplo de la importancia de considerar la resiliencia ante los desastres naturales para construir cadenas de suministro.	<p>La importancia de considerar la resiliencia ante los desastres naturales: Se ejemplifican las consecuencias de no considerar los desastres naturales como una causa mayor de disrupción de una cadena de suministro.</p>
Sameer Prasad, Hung-Chung Su, Nezh Altay y Jasmine Tata (2014)	Microempresas (India)	Tres dimensiones propuestas para aumentar la resiliencia de las microempresas: preparación ante las disrupciones, aprender de las experiencias, explotar formas diferentes de capital social.	Las microempresas pueden incrementar su resiliencia mediante la colaboración y cooperación entre ellas; ayuda de las dependencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y población.	<p>La resiliencia de microempresas ante la ocurrencia de desastres naturales.</p>
Miguel Gastón Cedillo Campos (2011)	Industria manufacturera de exportación (México)	Marco conceptual del tema de los riesgos de seguridad en las cadenas de suministro y encuestas a expertos e involucrados en el tema.	Los encuestados concluyeron que la inseguridad es un tema que considerar para mantener su competitividad; sin embargo, no comparten que sea la causa de disrupción prioritaria.	<p>Análisis de los riesgos en México. Se establece que la inseguridad es una causa de disrupción a mitigar, sin embargo, los resultados muestran que no es el riesgo más importante para las cadenas de suministro.</p>
Yossi Sheffi y James B. Rice Jr. (2005)	Diferentes tipos de industria (Estados Unidos)	El autor establece dos estrategias resilientes, la flexibilidad y la redundancia.	La investigación tiene el fin de recopilar algunas estrategias resilientes adoptadas en empresas de Estados Unidos.	<p>Estrategias resilientes: flexibilidad y redundancia, afines a la localización de almacenes. Se sugiere que una empresa cuente con diferentes ubicaciones para no ser afectada por disrupciones.</p>

Tabla 2.1 Elaboración propia basado en Abe y Ye (2013); Cedillo Campos (2011); Kleindorfer y Saad (2005); Prasad *et al.* (2014) y Sheffi y Rice Jr. (2005).

2.3 LA MEDICIÓN DE LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO

A pesar de que diversas investigaciones han establecido que la capacidad de resiliencia es un tema prioritario que se debe implementar dentro de la gestión de los riesgos de la cadena de suministro, aún existe una resistencia entre los directivos de diversas compañías en implementar estrategias que mejoren la resiliencia en su cadena de suministro. Tal como se reporta en la Iniciativa en el Manejo de los Riesgos de la Cadena de Suministro dentro del Foro Económico Mundial (Bhatia *et al.*, 2013), existe un miedo basado en la idea de que inyectar resiliencia dentro de la cadena de suministro aumentará los costos y reducirá la percepción de ganancias, sin embargo, también se apunta que la mayoría de los expertos consultados creen que la eficiencia y la resiliencia pueden coexistir sin ocasionar impactos negativos mayores, e incluso pueden resultar como estrategias complementarias.

Debido a lo anterior, esta sección explora investigaciones que proponen formas en que se puede *medir* la resiliencia y cómo se puede gestionar un balance costo-beneficio de la implementación de estrategias que mejoren la resiliencia en la cadena de suministro, con el fin de presentar ciertas bases que avalen que incorporar resiliencia no repercute de manera negativa en la gestión de la cadena de suministro.

Bhatia *et al.* (2013) indican la necesidad de cambiar de enfoque de una gestión del riesgo reactiva hacia una gestión proactiva. Entre las primeras medidas que recomiendan los académicos, empresarios y funcionarios de gobierno consultados dentro de los talleres organizados por dicha organización se destacan: la necesidad de construir un vocabulario en común en el tema de la gestión del riesgo, mejorar la compartición de datos e información a través de los actores involucrados en la cadena de suministro y construir una mayor agilidad y flexibilidad dentro de las estrategias resilientes.

De acuerdo con el Reporte de Riesgos Globales publicado por el Foro Económico Mundial, con el fin de contar con un parámetro que permita conocer las acciones que están realizando cada uno de los países, la organización desarrolla una medición de la resiliencia nacional de los países. A través de una serie de encuestas construidas alrededor del Radar de Riesgos en la Cadena de Suministro, así algunos talleres de trabajo organizados, se evalúa la resiliencia nacional general hacia riesgos globales atendiendo los siguientes subsistemas: económico, ambiental, social, gobernación e infraestructura; y a través de las siguientes métricas: recuperación, respuesta, redundancia, robustez e inventiva. Dicho estudio permite valorar las acciones que han realizado empresas en conjunto con los gobiernos para mejorar las condiciones de funcionamiento de las cadenas de suministro. A través de los resultados de la encuesta se determina que los desastres naturales y el clima extremo son las causas de disrupción más importantes en el mundo, como se indicó en la Figura 1.5.

Munoz y Dunbar (2015) también advierten que la resiliencia en la cadena de suministro es inherentemente multidimensional ya que se extiende a diferentes niveles, lo que reconocen que es difícil de cuantificar por una sola métrica. Dichos autores desarrollan una evaluación cuantitativa en la respuesta de una cadena de suministro posterior a la ocurrencia de una interrupción a través de múltiples medidas y en múltiples niveles, esto con el fin de construir una métrica de la resiliencia que capture holísticamente la respuesta hacia interrupciones. También remarcan que sin la existencia de medios holísticos que evalúen la resiliencia operacional de la cadena de suministro, los empresarios no podrán evaluar y comparar sus capacidades de recuperación existentes o sus estructuras alternativas ante las interrupciones y permanecerán renuentes en invertir en iniciativas que permitan mejorar la resiliencia.

El enfoque de Munoz y Dunbar (2015) recae en la construcción de una métrica que permita identificar el desempeño a nivel operacional de la cadena de suministro, es decir, partiendo sólo de las capacidades existentes de la empresa para recuperarse de una interrupción. Es importante resaltar esto ya que la propuesta de esta investigación se enfoca en el problema de localizar almacenes, una decisión a nivel estratégico debido a los recursos, información y tiempo necesario que se requieren invertir, así como las repercusiones que conlleva; sin embargo, la investigación de Munoz y Dunbar (2015) permite diferenciar que las métricas que se pueden desarrollar hacia la resiliencia parten desde el tipo de decisión que se requiere.

Figura 2.6 Perfil general del desempeño de una cadena de suministro afectada por una interrupción

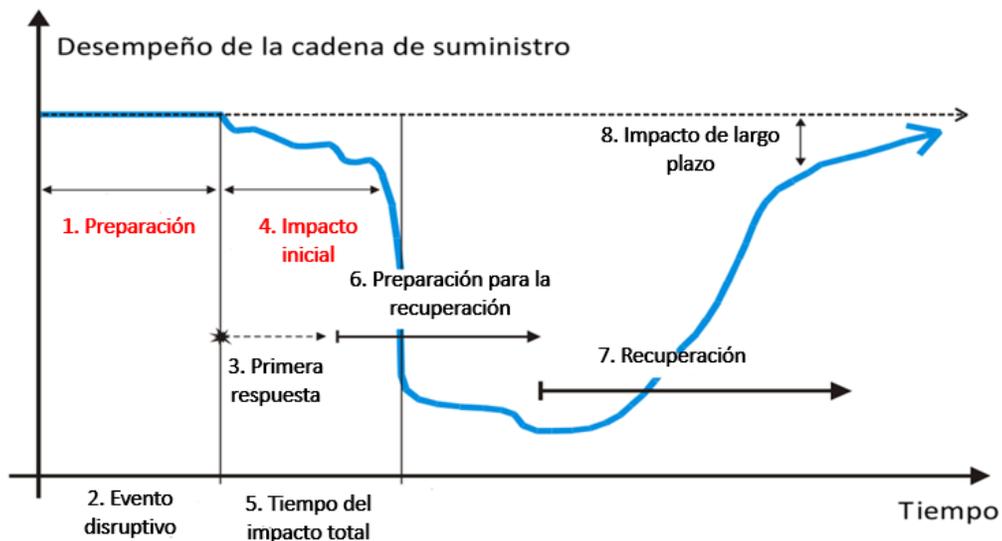


Figura 2.6 Adaptado de Sheffi y Rice Jr. (2005)

Como se muestra en la Figura 2.6, Munoz y Dunbar (2015) identifican que la medida del desempeño de la cadena de suministro por lo general inicia por un estado de equilibrio seguido



de una recuperación subsecuente ante la disrupción, representada por una serie de tiempo, sin embargo, establecen la necesidad de también considerar diferentes niveles y dimensiones que repercuten en el desempeño. A partir de la Figura 2.6, analizan el *perfil* del desempeño de la cadena a través del tiempo, donde establecen que se pueden diferenciar ciertas dimensiones que fungen como métricas de la resiliencia en la cadena de suministro. Por ello, realizan un experimento donde consideran tres niveles en la cadena de suministro: fabricante, minorista y cliente, así como cinco dimensiones: recuperación, impacto, pérdida en el desempeño, longitud del perfil y una suma ponderada de la desviación del desempeño si se simplificará a un perfil lineal, las cuales se explican en la Tabla 2.2.

A través de un modelo de simulación, Munoz y Dunbar (2015) analizan el desempeño a largo plazo de una cadena de suministro (medido por la razón de pedidos cumplidos), sujeta a disrupciones que pueden afectar tanto al fabricante como al minorista. Los resultados obtenidos de la solución son evaluados a través de las cinco dimensiones, las cuales se incluyen en un índice lineal ponderado que permita establecer la resiliencia de la cadena de suministro. Dichas ponderaciones son determinadas a través de una modelación de ecuaciones estructurales. Debido al modelo de simulación, Munoz y Dunbar (2015) experimentan con el sistema en un ambiente controlado, donde las disrupciones representan las variables de entrada y la respuesta de la cadena de suministro representa la salida. Aunque se debe tener en cuenta que trabajan con los siguientes supuestos:

- el modelo refleja una cadena de suministro de producción discreta;
- se considera sólo dos estados en cuanto las operaciones del fabricante y del minorista: completamente funcionales o no;
- el cliente satisface su demanda con otro proveedor por cada pedido no cumplido, por lo que se ignoran pedidos atrasados;
- los pedidos son fijos en cuanto a la cantidad requerida, así como, el tiempo de entrega;
- la simulación inicia con inventario cero;
- la empresa opera 18 periodos sin disrupciones, con el fin de que se pueda establecer una medida de desempeño del 100%;
- todas las disrupciones son deterministas en duración, frecuencia y magnitud, donde la estructura de la cadena de suministro permanece fija;

Si bien, el enfoque de Munoz y Dunbar (2015) invita a considerar otras métricas para definir la resiliencia de la cadena de suministro a nivel operaciones, los autores destacan que es sólo una aproximación, ya que se requieren incluir las condiciones que se limitaron debido a los supuestos. Además, mencionan que resulta complicado determinar la independencia entre las dimensiones, incluso en sus resultados indican que la dimensión *pérdida en el desempeño*



cuenta con una alta correlación con las demás dimensiones, por lo que en su índice de resiliencia omiten esta dimensión.

Tabla 2.2 Dimensiones de la resiliencia en la cadena de suministro consideradas en la investigación de Munoz y Dunbar

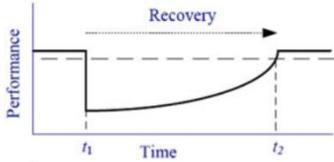
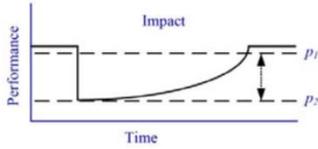
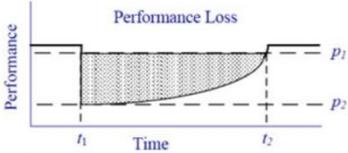
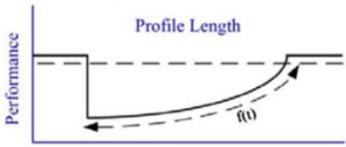
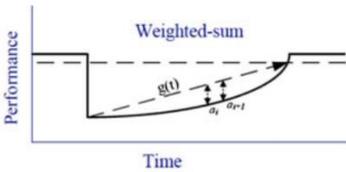
Dimensión de resiliencia	Significado	Ecuación
<p>Recuperación:</p> 	Captura el tiempo requerido para regresar al rango de desempeño aceptable	$t_2 - t_1$
<p>Impacto:</p> 	Captura la severidad del impacto en el desempeño	$p_2 - p_1$
<p>Pérdida en el desempeño:</p> 	Calcula la pérdida de desempeño total como el área por encima de la curva $p(t)$, entre t_1 y t_2	$(t_2 - t_1) \times p_1 - \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$
<p>Longitud del perfil:</p> 	Captura la longitud del perfil hasta que se alcanza el nivel de desempeño aceptable	$\int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dp}{dt}\right)^2} dt$
<p>Suma ponderada:</p> 	Una suma ponderada por desviación dependiente del tiempo que captura la velocidad y la forma de la respuesta post-disrupción, donde: $t_1 = a_1, a_2, \dots, a_n = t_2$	$\sum_{i=1}^n a_i [g(a_i) - p(a_i)]$

Tabla 2.2 Adaptado de Munoz y Dunbar (2015).



Gracias a la diferenciación que se realiza en la investigación de Munoz y Dunbar (2015), se debe tener en cuenta que las métricas de la resiliencia en la cadena de suministro pueden estar enfocadas a un nivel operacional, táctico o estratégico. De manera que, ante el problema de localizar almacenes, se requiere considerar una métrica de la resiliencia a nivel estratégico. Por ello, y retomando lo indicado por Kleindorfer y Saad (2005): *“Las características socio-demográficas de la comunidad donde se localice la instalación afectarán el nivel de presión provocada en la instalación para operar de manera segura, así como informar a la comunidad de los peligros que puedan enfrentar. La presión se tornará negativa de acuerdo con la frecuencia y la severidad de las interrupciones en la instalación”*, se considera tomar en cuenta un índice que permita evaluar las características sociodemográficas de los sitios donde se planea localizar un almacén.

Es por eso que se considera el índice de resiliencia a nivel municipal desarrollado por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED en el 2015, además de que está enfocado hacia la prevención de los efectos de los desastres de origen natural. El CENAPRED evalúa indicadores que sirvan como parámetros para establecer la capacidad de los municipios de mantener su capacidad de funcionamiento. Dicho indicador es desarrollado a través de la técnica estadística de Análisis de Componentes Principales, empleando la propuesta metodológica de Twigg para discernir los indicadores que deben conformar a la métrica de resiliencia, basado en las prioridades del Marco de Acción de Hyogo, marco que define la estrategia de reducción de los riesgos de desastres naturales a nivel mundial establecido por la Oficina de la Organización de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés) y el Banco Mundial.

Se reconoce que, si bien la resiliencia de una comunidad puede ser marcada por su capacidad económica de su población, no se determina tan sólo con este factor. El contexto cultural, político, legal y social son factores que también inciden de manera importante en la capacidad de resiliencia de cierta localidad. Por estas circunstancias, la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos (2015) opta por utilizar un enfoque de variable latente ya que se inspeccionan varias categorías que componen la resiliencia de un municipio de una manera general. Dicho organismo considera que un municipio es resiliente cuando cuenta con ciertas características que le brindan mayor capacidad de adaptación, por ejemplo: el contexto cultural de la comunidad, el conocimiento histórico de su entorno, las fortalezas y áreas de oportunidad en calidad y diseño de sus estructuras, la identificación y reducción de la vulnerabilidad en su población, la elaboración de planes para afrontar una contingencia, etc. De acuerdo con la metodología de Twigg (2012), la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED define las siguientes dimensiones que conforman la medición de la resiliencia municipal en México, las cuales están conformadas por diferentes indicadores, como se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Indicadores considerados en el índice de resiliencia a nivel municipal desarrollado por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED

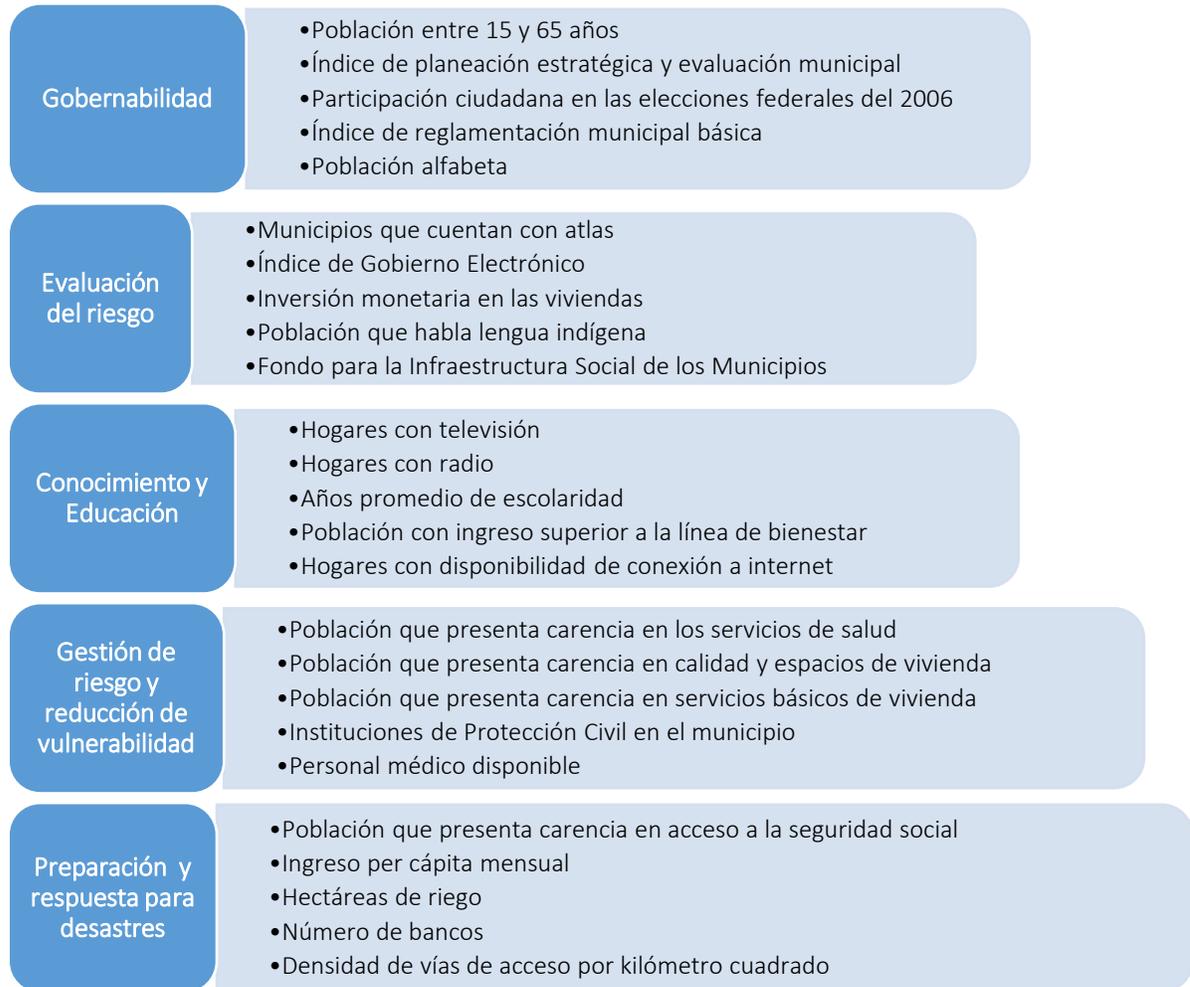


Figura 2.7 Adaptado de Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos (2015).

Retomando la propuesta de Falasca *et al.* (2008), al considerar los determinantes o características definidas por Craighead *et al.* (2007) expuesta en el capítulo anterior, establecen una forma de medir la resiliencia de la cadena de suministro de acuerdo con estos determinantes:

$$Densidad = \frac{\text{Número de nodos de la cadena de suministro}}{\text{Distancia promedio entre los nodos}}$$

$$Complejidad = f(t): \text{Número total de nodos} + \text{Número total de flujos en avance (hacia adelante)} \\ + \text{Número total de flujos en retroceso (hacia atrás)} \\ + \text{Número total de flujos entre los niveles de la cadena de suministro}$$



Criticidad de un nodo

= (Importancia relativa del nodo)(el número de flujos entrantes + el número de flujos salientes)

A pesar de que no ejecutan el modelo, *Falasca et al.* (2008) sugieren la utilización de un modelo de simulación que permita conocer la variación del “triángulo de la resiliencia” (término expuesto en la Figura 2.6 y en la investigación de Munoz y Dunbar), considerando como indicadores las medidas de *densidad, complejidad y criticidad de los nodos* a cadenas de suministro, explorando la efectividad de estas iniciativas de preparación en las dimensiones de impacto y recuperación de manera independiente. *Falasca et al.* (2008) establecen que se requieren modelos que permitan conocer “el precio de la resiliencia”, específicamente en las siguientes compensaciones (*tradeoffs*):

- considerar una estrategia que determine los menores costos en la red de suministro vs. red de suministro resiliente;
- una estrategia de centralización (alta densidad) vs. una estrategia de dispersión (baja densidad);
- flexibilidad y redundancia (nodos extras y arcos redundantes) vs. eficiencia.

Sin embargo, dichos autores se inclinan a que se experimente la idea de establecer componentes redundantes en la cadena de suministro, esto en orden de respaldar una posible falla en el suministro de partes críticas. Este tipo de estrategias se relaciona con la propuesta de esta investigación: considerar la localización de un número de almacenes que permita responder inventario estratégico excedente, con el fin de contar con capacidad de respuesta frente a la interrupción de alguno de los almacenes. En otro caso, reiterando lo sugerido por Miguel Llovera (2017), considerar inventario excedente ya que en situaciones de desastre natural, la demanda de ciertos productos rebasa lo planeado.

Debido a que el índice de resiliencia municipal considera las potenciales interrupciones provocadas por los desastres naturales, además, de que se construye específicamente para México considerando las características ambientales, sociales, económicas y políticas de todos los municipios que conforman al país, tal como lo establecen Kleindorfer y Saad (2005), el índice desarrollado por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED representa el mejor acercamiento hacia una métrica que se pueda considerar para mejorar la resiliencia en la decisión de localizar almacenes. Por ello, dicho índice se explicará a detalle en el siguiente capítulo.

Tomando en cuenta el trabajo realizado por el CENAPRED, institución dedicada al estudio de los efectos de desastres naturales en México y en el desarrollo de estrategias que midan la



vulnerabilidad de los municipios hacia estas interrupciones y cómo desarrollar programas de prevención, respuesta y mitigación, se considera el Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado por la misma institución, mostrado en la Figura 2.8.

Figura 2.8 Sistema de Información Geográfica de los Indicadores Municipales de Peligro, Exposición y Vulnerabilidad frente a los desastres naturales



Figura 2.8 Tomado del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Mediante dicho SIG, el CENAPRED concentra información histórica acerca de los desastres naturales que han impactado en cada municipio, la frecuencia con la que los municipios sufren las repercusiones y el número de declaratorias de contingencias climatológicas y emergencias. Concentrando estos datos, el CENAPRED califica la vulnerabilidad de cada municipio frente a cada uno de los desastres naturales, como se puede notar en la Figura 2.8. A través de una escala de colores califica la vulnerabilidad, como se muestra en la Figura 2.9. Ya que la causa de interrupción que se está atendiendo en esta investigación es la presencia de desastres naturales, se considera preponderante incluir la evaluación de la vulnerabilidad de los sitios considerados para localizar un conjunto de almacenes, ya que se parte del supuesto de que no importando donde se localice un almacén, éste se encontrará en riesgo de por lo menos un desastre natural. Por ello, también el SIG desarrollado por el CENAPRED será tomado en cuenta en el desarrollo del modelo de localización diversa de almacenes con el fin de mejorar la resiliencia de la cadena de suministro frente al peligro que representan los fenómenos naturales.



Figura 2.9 Clasificación del indicador de vulnerabilidad de los municipios en México frente a los efectos de los desastres naturales



Figura 2.9 Tomado de Centro Nacional de Prevención de Desastres.

A través de esta sección se ha explorado de qué manera diversos investigadores han propuesto medir la resiliencia. Una vez que se cuenta con una métrica que se adecua al problema de localización, es pertinente presentar de qué forma se ha propuesto que se realice la localización de almacenes. La siguiente sección presenta la revisión de la literatura que permitirá identificar el modelo que se acerque o que se adapte de mejor manera ante las consideraciones que se han presentado hasta ahora.



Tabla 2.3 Investigaciones acerca de la medición de la resiliencia en la cadena de suministro

Autores	Herramienta de medición	Métodos utilizados	Principales hallazgos	Aportaciones al trabajo de investigación
Gurpriya Bhatia, Charles Lane y Adrian Wain (2013)	Radar de Riesgos en la Cadena de Suministro	Encuestas y talleres organizados por el Foro Económico Mundial	Considerar demoras menores con el fin de mejorar la capacidad de resiliencia. Los desastres naturales representan la causa de disrupción número uno	Consideración de aspectos económicos, ambientales, sociales, de gobernanación e infraestructura para definir un índice de resiliencia: precisan que se requiere tomar en cuenta indicadores cualitativos y cuantitativos para evaluar la resiliencia nacional general hacia riesgos globales; sugiere la inclusión de las siguientes métricas: recuperación, respuesta, redundancia, robustez e inventiva.
Albert Munoz y Michelle Dunbar (2012)	Modelación de ecuaciones estructurales para crear un índice de resiliencia	Simulación del desempeño de la cadena de suministro	Construcción de un índice a nivel operacional de la resiliencia en el desempeño post-disrupción de la cadena de suministro	Considerar la multidimensional que requiere la medición de la resiliencia: Se consideran cinco dimensiones: recuperación, impacto, pérdida en el desempeño, alcance del perfil y la suma ponderada del perfil. Índice de resiliencia de la cadena de suministro a nivel operacional que considera diferentes dimensiones.
Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2012)	Índice de resiliencia municipal en México	Análisis de Componentes Principales. Método de Twijig	Construcción de un índice de resiliencia municipal que considere los aspectos sociodemográficos que pueden repercutir en la respuesta hacia los desastres naturales.	Índice de resiliencia a nivel municipal en México que considera las características sociodemográficas de los sitios donde se planea localizar los almacenes.

<p>Mauro Falasca, Christopher W. Zobel y Deborah Cook (2008)</p>	<p>Triángulo de la resiliencia</p>	<p>Simulación del desempeño de la cadena de suministro</p>	<p>Se sugiere la medición de la resiliencia a partir de la densidad, complejidad y los nodos críticos de la cadena de suministro reflejado en el triángulo de la resiliencia.</p>	<p>Medición de la resiliencia a través de la densidad, complejidad y criticidad de los nodos.</p>
<p>Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)</p>	<p>Indicador municipal de peligro, exposición y vulnerabilidad</p>	<p>Sistema de Información Geográfica</p>	<p>Construcción de un índice de vulnerabilidad hacia los desastres naturales.</p>	<p>Determinación de niveles de vulnerabilidad de cada municipio hacia los diferentes desastres naturales. Presenta de manera sencilla, los grados y/o índices de peligro y vulnerabilidad calculados por el CENAPRED a nivel municipal. Estos valores, son el resultado de la simplificación del análisis sobre diferentes amenazas, así como de la caracterización de algunos fenómenos sociales, que contribuyen a evaluar el proceso de construcción social del riesgo.</p>

Tabla 2.3 Adaptado de Bhatia *et al.* (2013), Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos (2015) y Munoz y Dunbar (2015).



2.4 EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE ALMACENES

El problema de localización de almacenes ha sido abordado desde diferentes enfoques, motivando el desarrollo de diversas formulaciones matemáticas. A pesar de esto, si se consideran los riesgos de disrupción como criterios dentro de la localización se encontrará que es un enfoque que no ha sido profundizado. A pesar de estas condiciones, es necesario buscar formulaciones que puedan aproximarse a los requerimientos del problema de investigación de este trabajo.

En esta sección se describe la revisión de literatura relacionado con el tema de localización de almacenes orientado a un enfoque resiliente o que cuente con criterios que consideren la gestión del riesgo. Mediante este marco teórico se identificará la formulación más apropiada para la solución del problema de investigación.

Partiendo de las aportaciones del trabajo de Kleindorfer y Saad (2005), Sandoya Sánchez (2013) presenta la formulación del *problema de diversidad máxima*, la cual está basada en la teoría de la cartera. Como se mencionó anteriormente, la teoría de la cartera precisa que un inversionista optará por diversificar sus inversiones considerando la idea de que podrá maximizar sus rendimientos basado en la evasión del riesgo que conlleva invertir en actividades similares, bajo el supuesto de que en un momento determinado ciertas actividades puedan ser afectadas por alguna crisis que perjudique al sector económico en el que se ha invertido. Sandoya Sánchez (2013) menciona las aplicaciones del modelo de diversidad máxima en diferentes campos de conocimiento, sin embargo, se destacan dos casos relacionados con el problema de esta investigación:

- localizar unidades logísticas que son mutuamente competitivas, como almacenes, plantas, centrales de transporte de carga, etc., con el fin de que sus actividades no sean redundantes entre sí, es decir, en casos donde la localización de una sola instalación permite cumplir con algún objetivo determinado;
- ubicar instalaciones peligrosas, contaminantes, indeseables, o de tipo estratégico para evitar que la cercanía entre ellas genere vulnerabilidad, peligros o accidentes.

En una perspectiva más cercana a la preocupación por los desastres naturales, Ye, Zhao, Xi y Dessouky (2015) presentan la problemática de localizar almacenes de emergencia en China para atender las zonas afectadas debido a esta causa de disrupción. Los investigadores exponen que la presencia de los desastres naturales en el país es constante, por lo que se requirió ubicar 10 almacenes con recursos necesarios para atender las emergencias. Sin embargo, después de un terremoto sufrido en el 2008, el gobierno decidió incrementar el número de almacenes de

10 a 24. El enfoque de su investigación cuestiona esta decisión ya que consideran que la determinación de aumentar los almacenes se realizó de manera abrupta y sin analizar las condiciones de emergencia. Tomar decisiones de esta manera conlleva a incurrir en costos elevados, además de considerar que en estas circunstancias no se puede pensar en la generación de ganancias. Otra condición especial de este tipo de localización es la consideración del suministro de perecederos, lo que significa contar con un límite de tiempo en la entrega y en el consumo.

Ye *et al.* (2015) desarrollan un modelo de localización de almacenes de emergencia con base en el problema de p – *centros*, el cual consiste en minimizar el número de almacenes a localizar partiendo de un conjunto de ubicaciones potenciales y cumpliendo con demandas diferentes. De acuerdo con el análisis del sistema, determinan que existen zonas de alto riesgo donde se requiere más de un almacén; considerando una gran probabilidad de que un almacén sufra una interrupción, se requieren almacenes de respaldo. La restricción más importante de su formulación es la fijación de una distancia máxima entre almacén y ciudad a ser atendida, distancia que no debe ser excedida. Mediante la revisión de literatura los investigadores constatan que el problema de localización planteado es un problema NP-duro por lo que adaptan un algoritmo heurístico *Variable Neighborhood Search (VNS)* para obtener respuestas satisfactorias. Finalmente, el resultado de su formulación sugiere que sólo es necesario localizar 11 almacenes para atender las zonas de emergencia. Con esto se reducirán los costos de mantener almacenes innecesarios y tal vez emplear ese presupuesto para víveres.

Continuando con el problema de interrupciones ante los efectos de los desastres naturales, Kim (2012) informa que, debido a la interrupción sufrida en la costa noreste de Japón en 2011 como consecuencia de un terremoto, un tsunami y la fusión de reactores nucleares en Fukushima, Toyota se vio obligado a fortalecer por completo la gestión de riesgos dentro de sus plantas, además de solicitar que las plantas y almacenes de sus proveedores implementaran medidas de resiliencia.

Los acontecimientos sucedidos en Japón forzaron a varias empresas automotrices a detener o reducir la producción hasta por seis meses. Toyota estableció solicitar a sus proveedores esparcir su producción o mantener un inventario extra con el fin de protegerse contra este tipo de interrupciones, así como apoyarlos para establecer instalaciones de respaldo. Tomando el ejemplo de Japón, en México es necesario adoptar acciones ante el riesgo latente de sufrir diversas interrupciones debido a desastres naturales, tal como se explicó en el capítulo anterior. Dentro de las recomendaciones identificadas en el caso de Japón en el 2011, la flexibilidad y la redundancia son sugeridas como medidas resilientes mediante la localización de instalaciones extras para responder ante interrupciones, así como contar con inventario extra.

Complementando los enfoques mostrados hasta ahora, Medal (2012) destaca, dentro de su tesis "*Locating and Protecting Facilities subject to Random Disruptions and Attacks*", múltiples



consideraciones que las formulaciones clásicas ignoran al estudiar los efectos de interrupciones, ya que por lo general se busca minimizar los costos o maximizar la eficiencia. Incluso la localización clásica de instalaciones sugiere el empleo a máxima capacidad de las fábricas por lo que, inherentemente, se expone a que sean vulnerables a interrupciones. En la Figura 2.10 se muestran las condiciones reales que los modelos de localización habituales no consideran.

Figura 2.10 Criterios no considerados en la formulación clásica del problema de localización de instalaciones.

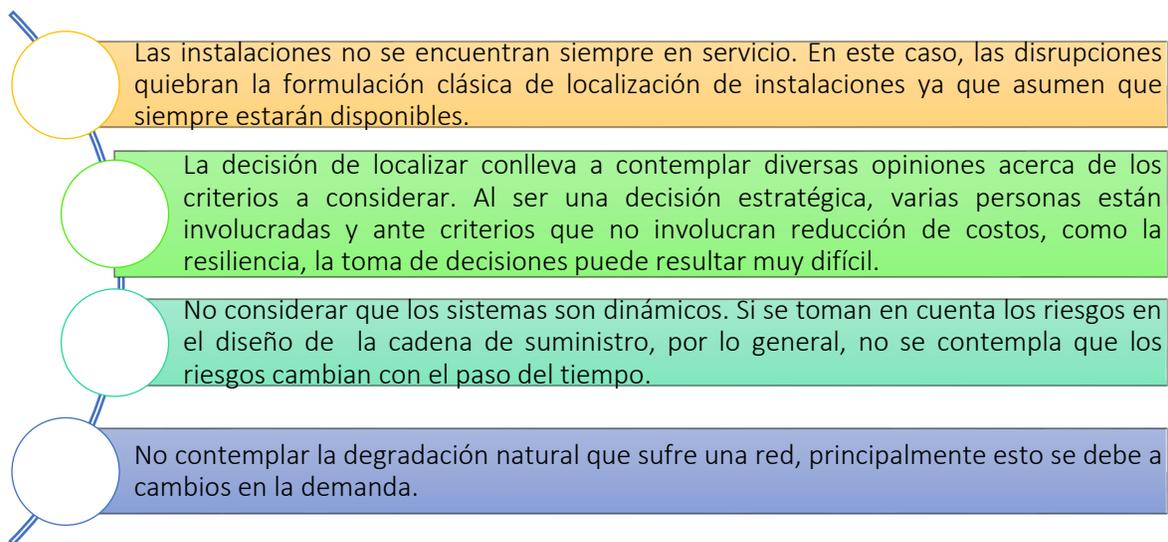


Figura 2.10 Adaptado de Medal (2012).

Considerando los supuestos mostrados en la Figura 2.10, Medal (2012) expone mediante el modelo de p – centros y el modelo de p – centros con r – todo – vecino (*r-all-neighbor p-center problem*, RANPCP de acuerdo con su abreviatura en inglés) la diferencia entre las distancias obtenidas en situaciones cuando no suceden interrupciones y las situaciones cuando las interrupciones acontecen. El autor trabaja principalmente con el modelo RANPCP ya que permite localizar una instalación extra que la formulación del modelo p -centros, un escenario deseable cuando una interrupción suceda. El problema RANPCP consiste en la localización de un conjunto de instalaciones para satisfacer un conjunto de puntos de demanda dado bajo el escenario de que las instalaciones se encontrarán sujetas a ataques de adversarios inteligentes. Medal (2012) también experimenta con el problema de localización y fortalecimiento de instalaciones mixto (*Mixed Facility Location and Hardening Problem – MFLHP* en inglés) con el fin de generar hallazgos diferentes a los obtenidos con los modelos anteriores. Finalmente, el autor obtiene las siguientes conclusiones:



- una gran reducción de riesgos puede ser obtenida por un incremento razonable en los costos;
- una reducción significativa en la vulnerabilidad puede ser obtenida permitiendo una pequeña reducción en el desempeño del sistema;
- un modelo útil para atender el problema de localización de instalaciones sujetas a interrupciones debería considerar tanto la eficiencia (por ejemplo, costo operacional) como la vulnerabilidad (por ejemplo, costo operacional después de una interrupción);
- sí sólo se considera un solo objetivo, debería ser la vulnerabilidad ya que la función objetivo de los modelos considerados incrementa mucho más que si solo se considera la eficiencia del sistema;
- asumir una protección perfecta de las instalaciones resulta en la obtención de resultados pobres, es decir, las distancias obtenidas entre los puntos de demanda y las instalaciones sobrepasan lo esperado;
- se requiere también considerar la capacidad de las instalaciones para obtener mejores resultados.

Diferenciando que el trabajo desarrollado por Medal (2012) se centra en las interrupciones ocasionadas por ataques provenientes de personas que buscan la afectación de alguna organización, así como que los modelos que emplea se basan en el enfoque clásico con respecto a las distancias físicas entre los puntos de demanda y la ubicación de las posibles instalaciones a localizar, los hallazgos del autor permiten verificar que cualquiera que sea la causa de interrupción se requiere que la empresa vislumbre localizar instalaciones adicionales, puesto que permitirán que la distancia a recorrer y el tiempo de respuesta se mantenga dentro de niveles aceptables para el cliente. Otro hallazgo importante de este trabajo radica en la identificación de que adoptar una estrategia resiliente en el problema de localización conlleva un sacrificio en los costos y en la eficiencia de la empresa. Si bien, en condiciones normales, tomar la decisión de localizar instalaciones adicionales para mejorar la resiliencia de la empresa provocará que se incurran en mayores costos de operación y en la disminución de la eficiencia; en cuanto se presente una interrupción, los sacrificios se verán justificados al no presentar pérdidas económicas tan considerables.

Sin embargo, en este trabajo de investigación no se están considerando distancias físicas ya que no se parte de la especificación de puntos de demanda de alguna cadena de suministro. En cambio, se establece que se requiere localizar almacenes con características diversas, con el fin de mejorar la resiliencia a través del conjunto de instalaciones en sí, es decir, que la diversidad evite que todos los almacenes sufran de la misma interrupción (desastre natural) en un momento determinado.



Considerando los enfoques abordados en el marco teórico con respecto a la localización de almacenes, resumidos en la Tabla 2.4, se identifica que la formulación que cuenta con características similares a las requeridas por el problema de investigación es el modelo de diversidad máxima. Con esto, se ha decidido establecer la estructura de esta formulación matemática, la cual se expondrá en el siguiente capítulo.

Como conclusión de la revisión literaria desarrollada en este trabajo de investigación, la siguiente sección muestra las aplicaciones del problema de diversidad máxima solucionando el problema de localización; de manera que se puedan identificar ciertas consideraciones que deben respetarse si se emplea esta formulación.



Tabla 2.4 Investigaciones acerca de la localización de almacenes considerando interrupciones

Autores	Herramienta de modelación	Métodos de solución	Principales hallazgos	Aportaciones al trabajo de investigación
Fernando Francisco Sandoya Sánchez (2013)	Problema de Diversidad Máxima	Método <i>MaxMean</i>	La diversidad puede representar un criterio de resiliencia para la localización de instalaciones.	Problema de Diversidad Máxima como método de solución a la propuesta de investigación de este trabajo: Ya que la diversidad provoca la mejora en resiliencia, el problema de diversidad máxima se acopla perfectamente para proporcionar soluciones a la propuesta de este trabajo de investigación.
Feng Ye, Qihong Zhao, Menghao Xi & Maged Dessousky (2012)	Problema de localización de almacenes de emergencia	Modelo de p -centros adaptado al problema	Los autores proponen disminuir el número de almacenes propuestos por el gobierno chino.	Redundancia en la localización: Debido a la posibilidad de que los almacenes también se vean afectados por los efectos de los desastres naturales, los autores permiten que existan múltiples almacenes en una sola zona. Esto se puede reproducir a grandes rasgos en esta propuesta, ya que, por lo general, la localización de almacenes se limita a una o dos opciones, sin embargo, se encuentran en una alta probabilidad de interrupción al no contar con almacenes de respaldo.
Chang-Ran Kim (2012)	No aplica	No aplica	La información reportada por el autor ejemplifica la consideración de estrategias resilientes tales como la flexibilidad y la redundancia	Ejemplo de aplicación de la propuesta de esta investigación: Toyota solicita a sus proveedores esparcir su producción o mantener inventario extra. Para ambas acciones se puede considerar la localización de almacenes que posean diferentes características diversas orientadas a la resiliencia.
Hugo Ruchard Medal (2012)	Localización y protección de instalaciones sujetas a interrupciones y ataques	Modelo de localización de p -centros. Modelo de localización de p -centros con r -todos-los-vecinos. Modelo de localización y fortalecimiento de instalaciones mixto. Métodos heurísticos glotones.	La necesidad de contar con instalaciones adicionales para poder disminuir los efectos de las interrupciones de ciertas regiones.	Problema RANPCP como otro modelo que se acerca al enfoque de enfrentar los riesgos: El modelo utilizado por el autor obedece una postura que, ante interrupciones, las empresas requieren contar con instalaciones adicionales para poder reasignar las demandas a los lugares que no fueron perjudicados. Dicho modelo está basado en la minimización de las máximas distancias entre los puntos de demanda de una empresa y la instalación más cercana a ellos.

Tabla 2.4 Adaptado de Kim (2012); Medal (2012); Sandoya (2012) y Ye *et al.* (2015).

2.5 EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA COMO MODELO DE LOCALIZACIÓN

Ya que se ha determinado la formulación del problema de diversidad máxima como modelo de solución, en esta sección se muestran algunas aplicaciones de este modelo para resolver problemas de localización, con el fin de identificar cómo ha sido desarrollado y qué criterios se tomaron en cuenta.

Saboonchi (2013) clasifica el problema de diversidad máxima como un modelo perteneciente a los problemas de localización dispersa. Además, establece que esta formulación también es conocida como el problema MaxSumSum, al maximizar la suma total de las distancias entre cada par de instalaciones localizadas. Saboonchi (2013) diferencia que este tipo de modelos se emplean cuando la diversidad entre las entidades es el objetivo que alcanzar, tal como se ha establecido en este trabajo de investigación. El autor aborda este tipo de problemas aplicándolos en la localización de franquicias, con el fin de evitar la canibalización entre ellas, mientras se maximizan los ingresos y la compartición del mercado en toda la cadena de valor.

Tabla 2.5 Investigación acerca del modelo de diversidad máxima aplicado a modelos de localización

Autor y año de la publicación	Herramienta de modelación	Métodos de solución	Aportaciones al trabajo de investigación
Behnaz Saboonchi (2013)	Problemas de localización dispersa (p-dispersión-suma), MaxMinSum (máxima diversidad) y MaxMinMin (p-dispersión)	Método Metaheurístico Búsqueda de Vecindario Variable (VNS – <i>Variable Neighborhood Search</i> por sus siglas en inglés)	Problema de Diversidad Máxima como método de solución a la propuesta de investigación de este trabajo: Ya que la diversidad provoca la mejora en resiliencia, el problema de diversidad máxima se acopla perfectamente para proporcionar soluciones a la propuesta de este trabajo de investigación

Tabla 2.5 Adaptado de Saboonchi (2013).

En el presente capítulo se presentaron diversas fuentes de información relacionadas con los objetos de estudio abordados en el problema de investigación: resiliencia en la cadena de suministro, el problema de localización de almacenes y diversidad como criterio resiliente. La importancia de consultar fuentes de información recae en el conocimiento de diferentes posturas y enfoques que han desarrollado distintos investigadores y expertos. Este tipo de información permite ampliar las posibilidades de una investigación o delimitar mejor el problema de investigación.

La división por temas mostrada en el marco teórico permitió encontrar información puntual que ha proporcionado la validez conceptual de la propuesta de este trabajo de investigación. El marco teórico con respecto a la evolución de las investigaciones acerca de la resiliencia en la cadena de suministro, además de ampliar la visión de este importante criterio en la gestión de los riesgos de disrupción, permitió identificar los criterios que ayudarán a aumentar la resiliencia de acuerdo con el peligro que representan los desastres naturales. Estos criterios, además, pueden ser adaptados a la medida de la diversidad. La información recopilada con respecto a la localización de almacenes estableció que el problema de diversidad máxima es el enfoque más apropiado para resolver el problema de investigación. Finalmente, la profundización de este modelo, llevada a cabo en el último subtema del marco teórico, funge como referencia en la construcción de la propuesta de solución, al considerar los paradigmas que se requieren establecer, así como, reconocer de qué manera se pueda construir el modelo. A partir de la revisión literatura se puede tener la certeza de que la propuesta de la localización de varios almacenes se encuentra justificada; incluso, es la primera sugerencia de otras investigaciones que trabajan bajo un enfoque resiliente, por ejemplo, en los trabajos de Medal (2012), Saboonchi (2013) y Ye *et al.* (2015) . Ante las evidencias mostradas por las investigaciones de Abe y Ye (2013) y Prasad *et al.* (2014) se reafirmó que los efectos de los desastres naturales es un enfoque apropiado que considerar para mejorar la resiliencia de la cadena de suministro y que bajo las recomendaciones de Kleindorfer y Saad (2005) se puede definir a través de la diversidad. Con esto, Sandoya Sánchez (2013) aporta el modelo de solución que se adapta mejor a las necesidades del problema de investigación.

Contando con los fundamentos teóricos, el siguiente paso consiste en construir la estrategia de solución del problema presentado. Es por esto por lo que el siguiente capítulo se centra en exponer cuáles son los pasos que se requieren para desarrollar el modelo matemático del problema de diversidad máxima, teniendo en cuenta los elementos que requiere dicha formulación.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

De acuerdo con el problema de investigación establecido en el capítulo 1 y la información encontrada en el marco teórico, se requiere adaptar el concepto de *diversidad* dentro del problema de diversidad máxima, con el fin de que las características y criterios recuperados de la revisión de la literatura sean alcanzados al resolver el problema de localización de almacenes.

En esta sección se presenta la formulación del problema de diversidad máxima con el fin de establecer una metodología que permita construir el modelo considerando los criterios que se deben alcanzar para solucionar el problema de investigación. Sin embargo, la estructura del modelo de diversidad máxima requiere el conocimiento de la modelación matemática dentro de la disciplina de la Investigación de Operaciones, del *software* que ayudará a obtener las soluciones, así como del algoritmo empleado para llegar a ellas. Por esto, también se explican las bases teóricas que componen al problema de diversidad máxima.

Además, también en esta sección se detalla de qué forma fue construido el índice de resiliencia a nivel municipal propuesto por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED, ya que esta métrica evaluará la mejora de la resiliencia de la cadena de suministro a través de la localización de los almacenes.

Al final de este capítulo, se establece el objetivo que persigue este trabajo de investigación, una vez que se conoce el modelo de solución y la forma en que será formulado y desarrollado.

3.2 MÉTODOS Y MODELOS

Para comenzar el desarrollo del modelo de solución deben tenerse en cuenta las bases teóricas de la formulación del problema de diversidad máxima, ya que éstas constituyen el paso cero de la construcción del modelo. Desarrollar el modelo sin conocer a qué tipo de problemas pertenece o cómo se ha solucionado anteriormente puede guiar a una construcción errónea. Por esto, este apartado presenta los paradigmas y características que permiten comprender y desarrollar dicho modelo. En primera instancia, se presenta la formulación del problema de diversidad máxima; una vez que se conoce la estructura del modelo de solución se entenderá la importancia de conocer las bases teóricas que involucran su construcción. El problema de diversidad máxima está basado en la conceptualización de los problemas de programación entera, por lo que resulta esencial explicar qué consideraciones deben tomarse en cuenta a raíz de ello. El siguiente paso consiste en explicar uno de los algoritmos más utilizados para resolver



problemas de programación entera, *Branch and Bound*, ya que es el algoritmo empleado por el *software* que se utilizará para formular y solucionar el problema. Con esto, se requiere explorar el *software* LINGO, ya que es el programa que se utilizará para resolver el problema de investigación.

Después se presenta la forma en que la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED construyó su índice de resiliencia en cada municipio, de manera que se entienda por qué es la métrica adecuada para evaluar si se mejora o no la resiliencia a través de una localización diversa. Finalmente, se presenta el diagrama de influencias como un método que permitió construir de mejor manera la construcción del problema de investigación en conjunto con los criterios que conformarán la diversidad que mejorará la resiliencia de la cadena de suministro.

3.2.1 Problema de Diversidad Máxima

De acuerdo con Kuo, Glover y Dhir (1993), el problema de diversidad máxima consiste en seleccionar un subconjunto de elementos a partir de un conjunto dado de tal manera que una medida de la diversidad o la dispersión presente en el subconjunto seleccionado sea maximizada. La formulación de este problema requiere tener en claro algunas definiciones. Sandoya Sánchez (2013) identifica la necesidad de esclarecer el significado de *diversidad* dentro del modelo de diversidad máxima en primer lugar. Recurre a la definición de *similitud* de acuerdo con la Real Academia Española de la Lengua, la cual establece que “la similitud es la relación de semejanza entre personas, lugares o cosas.” Además, recalca que la diversidad suele identificarse como un concepto opuesto a la similitud, sin embargo, esto no es correcto ya que la similitud se limita a la relación entre cada par de elementos, en contraste con la diversidad que se refiere a una característica asociada a todo un conjunto de elementos, esclareciendo que ésta se mide de acuerdo con la *disimilitud* entre cada par, siendo la disimilitud el concepto opuesto a la similitud.

“La diversidad de un conjunto es calculada como una función de la disimilitud entre las parejas de elementos.”

Para medir la diversidad existente en un conjunto M , la cual se puede representar como $div(M)$, se requiere tener bien definida una relación d_{ij} que describa la relación, distancia, similitud o semejanza entre cada pareja de alternativas i, j del conjunto original.

Sandoya Sánchez (2013) apunta que la estimación de la distancia depende del problema que se esté analizando. Ya que en el problema de diversidad máxima se establecen las distancias



como las relaciones de diferencia o similitud entre cada par de alternativas, se requiere conocer formas de medir la disimilitud. Dicho investigador propone la distancia Euclidiana para medir la disimilitud existente entre cada par de alternativas, teniendo en cuenta que cada elemento puede representarse mediando un conjunto de atributos (datos o características), tal que se puede definir como x_{ik} como la alternativa i con el atributo k -ésimo. Con esto se puede establecer la comparación entre alternativas mediante la distancia $d(x_i, x_j)$ representada por d_{ij} calculando la distancia Euclidiana que se define como:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_k (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (1)$$

Como establece Sandoya Sánchez (2013), al obtener las distancias Euclidianas se necesita considerar que el problema de diversidad máxima no cumple con ciertos axiomas que definen la métrica de las distancias. Esto se debe a que:

1. a pesar de que la distancia es una función no negativa: $d(x_i, x_j) \geq 0, \forall x_i, x_j$, en el problema de diversidad máxima se obtienen “distancias negativas”, ya que se debe recordar que éstas no representan la lejanía o cercanía de un objeto en comparación con otro, sino la relación de disimilitud entre dos alternativas;
2. no se cumple con la obligatoriedad de que en el caso de que una distancia sea nula, los elementos comparados representan ser el mismo: $d(x_i, x_j) = 0$, si y sólo si $x_i = x_j$; existirán casos en que la comparación entre dos alternativas resulte en una “distancia” nula, sin embargo, esto no significa que sea el mismo sitio comparado consigo mismo;
3. no se requiere considerar la propiedad de desigualdad triangular:
 $d(x_i, x_j) + d(x_j, x_k) \geq d(x_i, x_k)$ (propiedad fácil de demostrar en un plano euclidiano) ya que las “distancias” entre alternativas en el problema de diversidad máxima no se encuentran en un plano cartesiano.

El único axioma de la métrica de las distancias que se cumple dentro de la formulación del problema de diversidad máxima es la simetría, ya que $d(x_i, x_j) = d(x_j, x_i)$, resulta igual comparar la alternativa i con la alternativa j que viceversa.

Sandoya Sánchez (2013) realiza estas distinciones ya que, para formular el problema de diversidad máxima, no sólo se requiere definir el significado de las distancias, sino que también es necesario emplear una medida que compare la similitud entre dos alternativas. Esta investigación sigue la propuesta de Sandoya Sánchez (2013) al determinar como medida de



similitud la obtención del coseno para definir la similitud o disimilitud entre cada par de sitios posibles para localizar los almacenes. La medida de similitud del coseno se define:

Dados dos sitios i, j con características o atributos $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$ y $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp})$, la medida de similitud del coseno es definida por:

$$d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p x_{ik}x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p x_{ik}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^p x_{jk}^2}} \quad (2)$$

El coseno del ángulo formado por el vector de características del elemento i y el vector de características del elemento j está representado por la distancia d_{ij} . Por ser el coseno la medida que define la similitud, éste podrá adquirir valores del intervalo $[-1,1]$. Mediante las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se puede entender de manera gráfica el significado de los valores que pueden tomar las distancias entre cada par de elementos:

Figura 3.1 Elementos altamente similares



Figura 3.1 Mientras más pequeño es el ángulo, más cercano a 1 será el coseno y más grande será la similitud de los dos elementos. Tomado de Sandoya Sánchez (2013).

Figura 3.2 Elementos altamente disimilares



Figura 3.2 Si el ángulo se aproxima a π los elementos estarán en “polos opuestos”, la d_{ij} se aproximará a -1 y más grande será la disimilitud. Tomado de Sandoya Sánchez (2013).



Figura 3.3 Elementos indiferentes



Figura 3.3 Si el ángulo es igual a 0 significa que los elementos se anulan entre sí, es decir pueden poseer la misma cantidad de características similares y disimilares. Tomado de: Sandoya Sánchez (2013).

En función de mantener la coherencia del planteamiento de diversidad “máxima”, se debe tener en cuenta que la diversidad corresponde a la identificación de la disimilitud entre dos alternativas (en nuestro caso, sitios posibles para localizar un almacén). Para esto, se debe realizar un cambio de signo en la obtención de las distancias, $d'_{ij} = -d_{ij}$ para que se puede maximizar la diferencia entre elementos, como lo sugiere el nombre del problema de optimización. De ahora en adelante, se requiere entender que la distancia d_{ij} se refiere a la conversión $-d_{ij}$. Una vez que se cuentan con las definiciones apropiadas para entender cómo se mide la diversidad se puede presentar la formulación del problema de diversidad máxima adaptado al problema de investigación de este trabajo.

Sea $S = \{s_i: i \in N\}$ el conjunto de sitios considerados para localizar un almacén, donde $N = \{1, 2, \dots, n\}$ se refiere al conjunto de índices que denotan cada una de las alternativas y cada sitio s_i pueda ser representado como un vector $s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ir})$, y sea d_{ij} la distancia entre los elementos s_i y s_j , considerando que el número de almacenes a localizar, m , debe ser menor al número de sitios considerados, n , es decir $m < n$; el problema de diversidad máxima consiste en seleccionar m sitios del conjunto S con el fin de maximizar la suma de las distancias entre los elementos seleccionados. Esto se puede interpretar mediante la formulación matemática propuesta por Kuo *et al.* (1993):

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i < j} d_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

Sujeto a:



$$\sum_{i=1}^n x_i = m; \quad (4)$$

$$x_i \in \{0, 1\}; \forall i \quad (5)$$

Donde $x_i = 1$ indica que el sitio s_i ha sido seleccionado para localizar un almacén.

Sin embargo, esta formulación tiene la estructura de un modelo de programación cuadrática binario (*Mixed Integer Program with Quadratic Terms in the Constraints – MIQCP* en inglés), por lo que Kuo *et al.* (1993) sugieren una reformulación con el fin de que la función objetivo sea lineal, lo cual facilitará la solución del problema. La formulación lineal del problema de diversidad máxima se presenta a continuación:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} y_{ij} \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_i = m; \quad (4)$$

$$y_{ij} \geq x_i + x_j - 1; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (7)$$

$$y_{ij} \leq x_i; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (8)$$

$$y_{ij} \leq x_j; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (9)$$

$$x_i, y_{ij} \in \{0, 1\}; \quad 1 \leq i < j \leq n \quad (10)$$

Como se puede notar, la formulación lineal requiere de la incorporación de una variable auxiliar, y_{ij} , que sustituya el planteamiento cuadrático anterior. La variable y_{ij} denota si tanto el sitio i como el sitio j son seleccionados para localizar los almacenes. Esta conversión requiere la inclusión de tres restricciones lógicas, ecuaciones (7), (8) y (9), que aseguren que la condición que representa a y_{ij} sea cumplida.

Con base en todo lo anterior, la formulación lineal del problema de diversidad máxima representará el modelo que permita la solución del problema de investigación. Esta decisión se



basa tanto en la mayor facilidad de resolución que implica resolver un problema de programación entera binaria como en las características que brinda el *software* LINGO para resolver el problema. Además, esta formulación alternativa, al contar con un mayor número de restricciones, permitirá que la región factible se acote mucho más.

3.2.2 Programación Entera

A lo largo del desarrollo de la Investigación de Operaciones se han desarrollado diversas herramientas que se adecúan a diferentes tipos de problemas. Dentro de estas herramientas se destacan aquellas formulaciones que se concentran en la optimización de un objetivo considerando la combinación de varias condiciones, opciones y restricciones, lo que se reconoce como problemas de optimización combinatoria. La formulación más conocida dentro de este campo es la programación lineal, una de las primeras formulaciones dentro de la historia de la Investigación de Operaciones, debido a su estructura simple, como se muestra a continuación:

Función objetivo por optimizar:

$$\text{Maximizar o minimizar } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (11)$$

sujeto a restricciones del tipo:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} b_i \quad (12)$$

para $i = 1, 2, \dots, m$
para $j = 1, 2, \dots, n$

y considerando la condición de que las variables de decisión pueden adoptar valores reales positivos:

$$x_j \geq 0, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$



Sin embargo, en ocasiones, los problemas que se buscan resolver cuentan con la restricción de que los valores que solucionan el problema, es decir, los valores de las variables de decisión, deben ser números enteros. Esto acarrea especificaciones que las formulaciones de programación lineal no logran cubrir, por lo que surge el campo de la Programación Entera para atacar este tipo de problemas.

El problema de localización de almacenes considera la construcción de almacenes completos, ya que no tiene sentido localizar la mitad de un almacén o $3/7$ partes de uno, por ello se requiere que las soluciones obtenidos del modelo respeten la condición de integralidad. Con esto en mente, se requiere distinguir las especificaciones que conllevan los problemas de Programación Entera.

Dentro de los problemas de Programación Entera se identifica la siguiente clasificación:

- Programación Entera Mixta (PEM): Estos problemas requieren que sólo *algunas* variables de decisión sean enteras, por lo que también cuentan con variables de decisión que pueden tomar valores reales.
- Programación Entera Pura (PEP): Este tipo de programación se requiere cuando todas las variables de decisión deben ser enteras.
- Programación Entera Binaria (PEB): En este caso, no sólo las variables de decisión adquirirán valores enteros, sino que los problemas requieren decisiones entre decir sí o no, lo cual se traduce en que sólo pueden tomar dos valores, 0 ó 1.

Para esta investigación y de acuerdo con el modelo de diversidad máxima, se requiere de la programación entera pura ya que, como se podrá notar más adelante, la formulación requerirá de variables de decisión que adquieran valores enteros y valores binarios.

Conociendo las restricciones que debe cumplir el problema de investigación con respecto a la formulación del modelo de solución de Programación Entera, se requiere entender cómo se resuelve un problema entero. Dentro de los algoritmos de solución de este tipo de formulaciones destaca el método de Ramificación y Acotamiento (*Branch and Bound* en inglés), ya que el software que se emplea para resolver el problema de investigación, LINGO, emplea este algoritmo. A continuación, se detalla la lógica de este algoritmo.



3.2.3 Ramificación y Acotamiento (*Branch and Bound*)

Como se mencionó en el subtema anterior, la técnica de Ramificación y Acotamiento es una de las mejores herramientas prácticas en la solución de problema de programación entera. Como lo indica Hillier y Lieberman (2013), se requiere distinguir la necesidad del desarrollo de algoritmos y métodos de solución exclusivos para los problemas de programación entera, debido al esfuerzo computacional que provoca considerar variables de decisión enteras. Dichos investigadores exponen claramente que redondear soluciones de un problema de programación lineal no es una buena estrategia de solución, ya que se puede incurrir en soluciones infactibles o que no sean óptimas bajo la condición de integralidad.

Por ello, se han desarrollado diversos algoritmos que permiten llegar a soluciones óptimas basándose principalmente en el método simplex, es decir, consideran una relajación lineal (omitir la condición de integralidad de los problemas de programación entera). Entre los métodos de solución de problemas de programación entera más conocidos se encuentran los Planos de Corte (*Cutting Planes – CP*), la Relajación Lagrangeana, Ramificación y Acotamiento (*Branch and Bound – BB*), Ramificación y Corte (*Branch and Cut*). Además, bajo escenarios en que las instancias de un problema son demasiado grandes, por ejemplo: que el número de variables enteras sea considerable, o que se requiere obtener soluciones buenas en un tiempo razonable, se han desarrollado métodos metaheurísticos basados en reglas empíricas para obtener soluciones rápidas y buenas. Entre los métodos metaheurísticos más conocidos se encuentran Búsqueda Tabú (*Tabu Search*), Recocido Simulado (*Simulated Annealing*) y Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms*).

Todo lo anterior se expone, ya que como en muchas disciplinas de conocimiento, existen diferentes formas de hallar soluciones y, en el caso de la Investigación de Operaciones, se requiere justificar el empleo de uno u otro método de solución. Para este trabajo de investigación, el método de solución más apropiado es Ramificación y Acotamiento, ya que, como lo exponen Hillier y Lieberman (2013), proporciona soluciones óptimas y flexibles ante formulaciones de programación entera binaria, como es el caso del planteamiento de diversidad máxima. Además, dicho método de solución corresponde al algoritmo empleado por el *software* LINGO para obtener soluciones a problemas de programación entera.

El atractivo del método de Ramificación y Acotamiento radica en que elimina implícitamente grupos grandes de soluciones potenciales sin evaluarlos explícitamente, además de que se puede adaptar a la estructura de cada problema específico que se desea resolver para construir un algoritmo de solución adecuado. Comúnmente se reconoce que este método excluye soluciones no enteras mediante la estrategia “dividir y vencer”.

El algoritmo de este método implica dividir la región factible en segmentos de tal forma que, comenzando con una solución inicial que ignora la restricción de integralidad, se excluyan



soluciones de una región factible cada vez más acotada, pero conservando todas las posibilidades enteras del problema original. Esta división implica más problemas que deben resolverse, pero como la región factible de estos nuevos problemas es menor, se resuelven más fácilmente.

En general, el método redondea y acota variables que deben ser enteras a partir de la solución de subproblemas de programación lineal, utilizando la misma función objetivo del problema original. El proceso de dividir y subdividir continúa hasta que pueda probarse que ninguno de los subproblemas tiene una solución óptima que sea mejor que una solución entera calculada con anterioridad. Con el fin de que quede claro el funcionamiento de este algoritmo, a través de un ejemplo simple se explican cada uno de los pasos que conforman la lógica de esta técnica de solución de problemas de programación entera.

Partimos del siguiente problema de programación entera binaria:

$$\mathbf{Min Z = 5x_1 + 6x_2 + 7x_3 + 8x_4 + 9x_5}$$

sujeto a:

$$3x_1 - x_2 + x_3 + x_4 - 2x_5 \geq 2$$

$$x_1 + 3x_2 - x_3 - 2x_4 + x_5 \geq 0$$

$$-x_1 - x_2 + 3x_3 + x_4 + x_5 \geq 1$$

x_j binaria; $\forall j$

El paso inicial establece que la solución actual en cada iteración se denotará como Z^* y obtendrá el valor de $-\infty$ si se trata de un problema de maximización o ∞ si se trata de un problema de minimización. De acuerdo con el ejemplo, se trata de un problema de minimización por lo que $Z^* = \infty$.

A partir de esta solución inicial, se requiere resolver el problema, pero se debe ignorar la condición de integralidad (a esto se le llama relajación del problema de programación entera), este paso se ejemplifica en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Solución de la relajación del problema de programación entera.

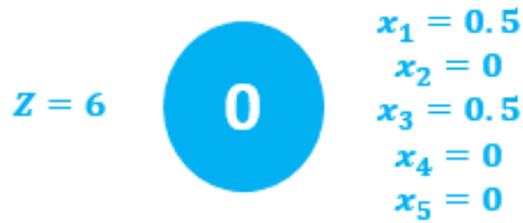


Figura 3.4 Elaboración propia.

Si la solución del Problema Entero relajado no satisface las restricciones de integralidad, la solución obtenida es considerada como la óptima. Debe tenerse en cuenta que, si el problema de programación lineal es infactible, también lo será el problema de programación entera. Sin embargo, si al menos una de las variables requeridas enteras es fraccional en la solución del problema lineal, comienza el algoritmo de ramificación y acotamiento.

En la Figura 3.4 se puede observar que dos variables de decisión cuentan con valores fraccionales, $x_1 = 0.5$ y $x_3 = 0.5$. Esto significa que se ha obtenido la solución óptima del problema lineal, sin embargo, se requiere ramificar y acotar para obtener la solución óptima del problema entero.

A partir de esta instancia, los siguientes pasos se realizarán en cada iteración hasta que se resuelva el problema entero.

La ramificación comienza eligiendo el problema de programación entera de más reciente creación de los problemas restantes (no sondeados) - de aquellas soluciones que cuenten con un mismo valor en la solución de la función objetivo, se elegirá la solución que cuente con mejor cota -. A partir del problema seleccionado, se requiere escoger una o más de las variables fraccionales, de las cuales se realizará la *ramificación* para crear dos o más subproblemas, los cuales excluyen la solución previa pero no eliminan ninguna solución entera factible.

Retomando el ejemplo dado, se parte del nodo 0 marcado en azul y se toma una de las dos variables que cuentan con valores fraccionarios; se opta por tomar primero x_1 , el cual se ramifica como se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Primera iteración del algoritmo de ramificación y acotamiento

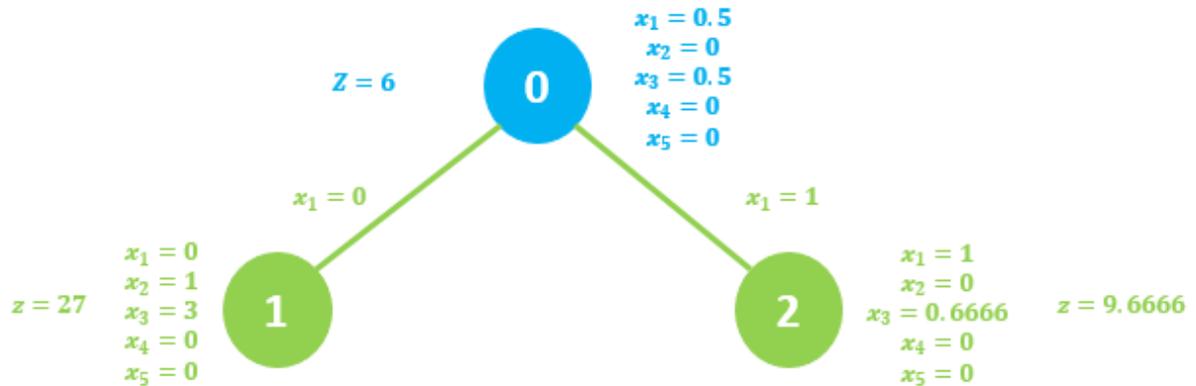


Figura 3.5 Elaboración propia.

La acotación consiste en la resolución de los problemas lineales resultantes del proceso de ramificación. En cada ocasión en que se realiza una acotación, se realiza también un sondeo. El sondeo consiste en el descarte de subproblemas, los cuales deben contar con una de las siguientes condiciones:

- El subproblema cuenta con un valor en la función objetivo igual o menor que una solución entera conocida;
- o la solución del subproblema es infactible;
- o si el subproblema satisface todas las restricciones de integralidad. Si el subproblema posee un mejor valor en la función objetivo que la solución actual, se convierte en la nueva solución actual y se realiza de nuevo el paso de ramificación a todos los problemas no sondeados, considerando la nueva Z^* .

El algoritmo de ramificación y acotamiento finaliza cuando todos los subproblemas están sondeados (a esto se le conoce como prueba de optimalidad), por lo que la solución actual se determinará como la óptima. En otro caso, se realiza otra iteración.

Como se muestra en la Figura 3.5, ninguno de los subproblemas satisface las restricciones de integralidad, considerando que se trata de un problema entero binario, por eso el nodo 1 en color verde no cumple con las condiciones que demanda el problema; así que se requiere una nueva ramificación. Se elige la ramificación 2 ya que ofrece la mejor cota (el valor menor, ya que se busca el valor mínimo). Se elige la variable $x_3 = 0.6666$ ya que es la única variable con valor fraccionario.



Figura 3.6 Segunda iteración del algoritmo de ramificación y acotamiento

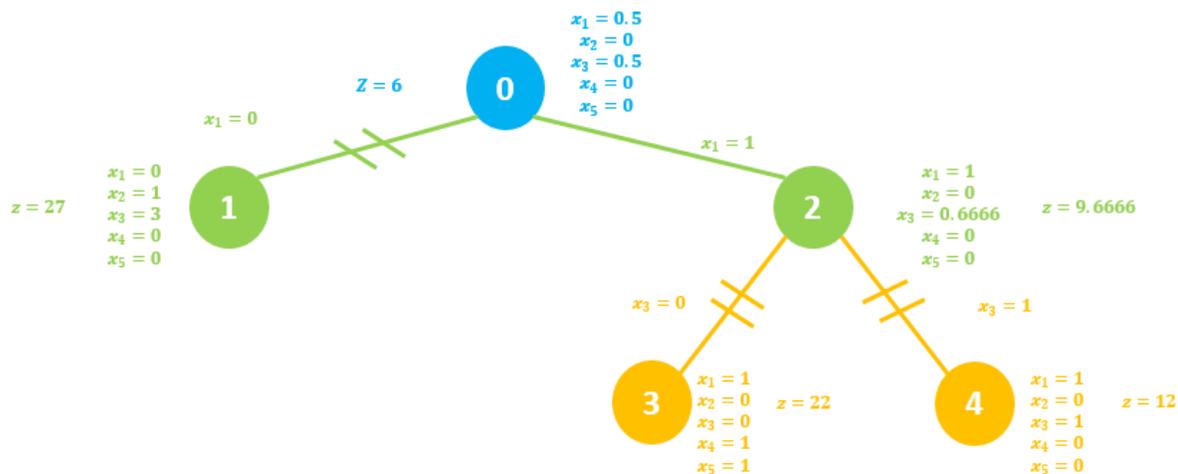


Figura 3.6 Elaboración propia.

De acuerdo con lo observado en la Figura 3.6, a partir de las nuevas soluciones obtenidas del nodo 2, los nodos resultantes de la ramificación proporcionan soluciones que satisfacen las restricciones de integralidad. El nodo 3 proporciona un nuevo valor Z^* ya que las variables tienen valores binarios, $Z^* = 22$. Con esto el nodo 3 se sondea y se aplican las pruebas de sondeo para los subproblemas no sondeados con la nueva Z^* . El nodo 1 se sondea al proporcionar un valor peor que la nueva Z^* . El Nodo 4 proporciona un mejor valor que el actual valor de Z^* , por lo que se convierte en el nuevo valor óptimo. Al no haber más subproblemas sin sondear, el algoritmo *Branch and Bound* termina, determinando como la solución óptima:

$$x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 1, x_4 = 0, x_5 = 0$$

Con un valor mínimo, $Z^* = 12$.

Partiendo de la formulación de un problema de Programación Entera, es pertinente establecer que, si bien el ejemplo anterior puede resolverse manualmente, con lápiz y papel, los problemas con mayor complejidad, es decir, con un mayor número de variables, restricciones y parámetros provocan que se requiera de programas especializados que cuentan dentro de su librería de *solvers* con el algoritmo de Ramificación y Acotamiento. LINGO es uno de estos programas, por lo que a continuación se presenta una breve introducción a su funcionamiento.



3.2.4 LINGO

LINGO (*LINear Generalize Optimizer*) es una herramienta versátil para la formulación, resolución y análisis de problemas de programación lineal y no lineal. Este programa permite resolver sistemas de ecuaciones con una o varias variables independientes (modelos directos) o bien una o varias variables interdependientes (optimización multiobjetivo) ingresando solo algunas líneas de código (*LINGO: The Modeling Language and Optimizer*, 2016; Noh de la Cruz Elizondo Cortés, 2017).

Uno de los rasgos más atractivos de LINGO es su lenguaje de modelado, ya que permite expresar un problema de programación de manera muy similar a la notación matemática normal. Además, es posible expresar sumatorias mediante expresiones iterativas, lo cual permite formular modelos más compactos y fáciles de corregir.

Otro aspecto para destacar de su lenguaje de modelado es la sección de datos que permite aislar los datos de la formulación del modelo. Por esto LINGO puede leer datos incluso de una hoja de cálculo separada, base de datos, o archivo de texto. Con la sección de datos independiente del modelo, resulta más sencillo realizar cambios, reduciendo las posibilidades de errores al plantear el modelo. Todos estos factores resultan atractivos para modeladores que no cuentan con conocimientos especializados en lenguajes de programación.

Debido a las ventajas que proporciona el lenguaje de modelación de LINGO, los detalles y los comandos que conforman su estructura se explicarán dentro del desarrollo del modelo matemático en el siguiente capítulo. De esta forma, se podrá entender de mejor manera por qué LINGO es una herramienta adecuada para solución del problema de diversidad máxima.

3.2.5 Índice de resiliencia a nivel municipal del CENAPRED

Tomando en cuenta la propuesta de Kleindorfer y Saad (2005), en esta investigación se propone que contar con una localización de almacenes que considere la diversidad de características entre los sitios considerados permitirá mejorar la resiliencia de su cadena de suministro, sin embargo, los mismos autores recomiendan la consideración de factores que definan la resiliencia de las localidades donde se planea localizar los almacenes. El modelo del Problema de Diversidad Máxima evaluará características específicas acerca de la infraestructura de los almacenes, por lo que se requiere un indicador que permita describir de mejor manera el entorno donde se localizarán los almacenes. En esta sección se describirá el indicador que se acopla de mejor manera a la formulación del modelo de diversidad máxima.

El índice de resiliencia a nivel municipal desarrollado por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED en 2015 analiza diferentes indicadores sociales, económicos y políticos



que permiten una definición acerca de la capacidad de resiliencia que podrán efectuar ante el efecto de los desastres naturales.

Para el cálculo del índice se utilizó la metodología de Análisis de Componentes Principales, técnica de estadística de análisis multivariado que se centra en reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos en el que hay una gran cantidad de variables interrelacionadas. Una de las aplicaciones y ventajas que ofrece esta técnica estadística es la extracción de la “componente principal”, es decir, la obtención de una única medida escalar que resume el comportamiento de un gran número de variables.

A partir de la metodología de Twigg empleada, la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED consideró un conjunto de 50 variables que pueden explicar en alguna medida el nivel de resiliencia de los municipios en México, utilizando indicadores del año 2010. Una vez que se obtuvieron todas las variables se analizaron dentro de una matriz de correlaciones y se descartaron aquellas que presentaron correlaciones sistemáticamente muy altas (≥ 0.80) o muy bajas (≤ 0.20) con lo que, finalmente, se seleccionaron 25 variables.

Las variables fueron clasificadas en 5 dimensiones que representan la capacidad de resiliencia de una comunidad desde diferentes aspectos y, a partir de las 25 variables seleccionadas, se obtuvo la componente principal, “el índice de resiliencia a nivel municipal”.

A continuación, se muestran en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 la descripción de los indicadores (variables) considerados en la construcción del índice de resiliencia municipal, además de la justificación de considerar cada indicador como relevante en la medición de la capacidad de resiliencia en las comunidades.

A partir de la obtención del “componente principal”, es decir, el índice de resiliencia, la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED construye un escalamiento del índice de resiliencia con el fin de contar una métrica que pueda arrojar valores entre 0 y 100. La fórmula se muestra a continuación:

$$IR_{0-100} = \frac{IR - (-3.20981)}{2.2903 - (-3,20981)} \quad (14)$$

Se señala que esta métrica es positiva, por lo que el número 100 indica que el municipio cuenta con el mejor índice de resiliencia.



Tabla 3.1 Indicadores que conforman la dimensión de Gobernabilidad

1ra. Dimensión: Gobernabilidad		
Esta dimensión representa la participación del gobierno municipal en la Gestión Integral de Riesgos, así como intenta medir el nivel de conocimiento y ejercicio de obligaciones y derechos de la población ante sus instituciones de gobierno		
Indicador	Medición	Justificación
Población entre 15 y 65 años	$\frac{\text{Población entre 15 y 65 años}}{\text{Población total}} * 100$	<ul style="list-style-type: none"> - Representa el segmento de la población considerado como altamente resistente. - Representa una gran proporción de la Población Económicamente Activa - Población que puede participar en actividades de reconstrucción y recuperación económica.
Ponderación de los siguientes elementos que representan una planeación estratégica, de acuerdo con su importancia relativa:		
Índice de Planeación estratégica y evaluación municipal	<p>25.00 = Misión, visión, objetivos y metas</p> <p>21.43 = Programa estratégico y operativo</p> <p>17.86 = Indicadores de gestión y/o resultados definidos</p> <p>14.49 = Panel de control y seguimiento de objetivos, metas, indicadores y/o resultados</p> <p>10.71 = Sistema de captación de quejas, sugerencias y/o reconocimientos de los trámites y/o servicios</p> <p>7.14 = Mecanismos para medir la satisfacción de los usuarios</p> <p>3.57 = Manual y/o estándares de calidad para la atención de trámites y servicios</p> <p>1.00 = Otros</p>	Estos elementos permiten medir el grado en que las administraciones públicas municipales han incorporado elementos de planeación estratégica y evaluación en su funcionamiento. Esto puede significar una apertura hacia una Gestión Integral de Riesgos.

$$PE = \left(\frac{Suf}{Lnom} \right) * 100$$

Participación
ciudadana en las
elecciones del
2006

Donde:

PE: participación ciudadana en las elecciones de 2006

Suf: número de ciudadanos del municipio que sufragaron el día de la jornada electoral

Lnom: lista nominal, número de ciudadanos del municipio que cuentan con su credencial para votar vigente

Medición de la participación de la comunidad y concientización de sus derechos y obligaciones políticas y cívicas

$$IRM = \left(\frac{Regla_total}{Regla_bc} \right) * 100$$

Reglamentación
municipal básica

Donde:

IRM: índice de reglamentación municipal

Regla_total: total de reglamentos existentes en el municipio

Regla_bc: número de reglamentos básicos

Medición del marco legal y regulatorio.

$$ALF = \left(\frac{p_alf}{p_total} \right) * 100$$

Población
alfabeta

Donde:

ALF: proporción de la población alfabetada

p_alf: población del municipio mayor a 15 años que sabe leer y escribir

p_total: población total del municipio

Requerimiento mínimo necesario para medir la efectividad de la divulgación de información y la eficacia de la implementación de acciones de evacuación en caso de ser necesario

Tabla 3.1 Adaptado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2015).



Tabla 3.2 Indicadores que conforman la dimensión de Evaluación del riesgo

2da. Dimensión: Evaluación del riesgo		
Medición del estado que guarda la generación de información que una comunidad realiza frente a sus posiciones de vulnerabilidad ante un desastre natural. Intenta recuperar el desarrollo que tiene la generación, análisis, discusión y monitoreo de la información relevante sobre los mayores riesgos que enfrenta una comunidad desde una perspectiva incluyente para todos los agentes que participan en la evaluación		
Indicador	Medición	Justificación
Municipios que cuentan con un Atlas	$ATL = \begin{cases} 0 & \text{si no tiene atlas de riesgo} \\ 1 & \text{si tiene atlas de riesgo} \end{cases}$	Representa la información que debe incorporarse a los programas de desarrollo urbano y reordenamiento territorial con el fin de disminuir los riesgos, reducción potencial de pérdidas y daños económicos y la protección de la población. Podría brindar certidumbre a los programas de inversión física y expansión urbana.
	$IGE = i_{computadoras} + i_{líneas} + i_{conexión} + i_{infoweb} + i_{funweb}$	
	Donde:	
Índice de Gobierno Electrónico	<p><i>IGE</i>: índice de gobierno electrónico</p> <p><i>i_{computadoras}</i>: valor ponderado en el intervalo [0,1] sobre el número de computadoras en oficinas de gobierno</p> <p><i>i_{líneas}</i>: valor ponderado en el intervalo [0,1] sobre el número de líneas telefónicas en oficinas de gobierno</p> <p><i>i_{conexión}</i>: valor ponderado en el intervalo [0,1] que determina si el municipio tiene acceso a internet</p> <p><i>i_{infoweb}</i>: valor ponderado en el intervalo [0,1] que determina si el municipio sube información sobre las instituciones de gobierno a un portal de internet</p> <p><i>i_{funweb}</i>: valor ponderado en el intervalo [0,1] que determina el grado de funcionalidad del portal de internet del gobierno</p>	Indica la utilización de las herramientas de la información de la manera más eficaz posible para aumentar los canales y la velocidad de la comunicación de información entre los diversos niveles de gobierno y entre el gobierno y los ciudadanos. El nivel de comunicación por medios tradicionales o digitales por parte de los gobiernos se vuelve un elemento crucial para poder medir y entender su capacidad resiliente.



Inversión monetaria en viviendas	<p>Donde:</p> <p><i>IV</i>: inversión en vivienda</p> <p><i>in_viv</i>: inversión en vivienda ejercida por el municipio en millones de pesos</p> <p><i>1000_viv</i>: viviendas expresadas en cada mil construcciones</p>	$IV = \frac{in_viv}{1000_viv}$	<p>Indica el nivel de reforzamiento físico que el gobierno otorga a los hogares de los ciudadanos. La inversión encaminada a la protección y mejoramiento en las viviendas de la población supone un gran componente para el aumento de la resiliencia de la población. La pérdida total o parcial de la vivienda de una familia puede vulnerar en gran medida su capacidad de recuperación social y económica.</p>
Población que habla lengua indígena	<p>Donde:</p> <p><i>PLI</i>: proporción de la población mayor de 5 años que habla al menos una lengua indígena</p> <p><i>pob_lind</i>: población mayor de 5 años que habla al menos una lengua indígena</p> <p><i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	$PLI = \frac{pob_lind}{pob_tot}$	<p>Indica los problemas de comunicación que pueden presentarse con la población que habla alguna lengua indígena, sobre todo en el momento de comunicar situaciones de riesgo en las zonas donde habitan. Además, existe la posibilidad de dicha población se encuentre aislada (marginada) de las vías de comunicación principales. La población indígena es vulnerable ante los desastres naturales, por lo que se requieren tener medidas y atenciones especiales para garantizar su protección humana, social y económica.</p>
Fondo para la Infraestructura Social de los Municipios	<p>Donde:</p> <p><i>FISM</i>: Fondo para la Infraestructura Social de los Municipios</p> <p><i>par</i>: partida otorgada a cada municipio</p> <p><i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	$FISM = \frac{par}{pob_tot}$	<p>Fondo otorgado por el gobierno federal a los municipios de todo el país para que inviertan en proyectos que contribuyan específicamente a mejorar la infraestructura física social de sus demarcaciones. El uso potencial de este fondo para mejorar la infraestructura física es un indicador de la capacidad y voluntad que el gobierno tiene para disminuir la vulnerabilidad de su población.</p>

Tabla 3.2 Adaptado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2015).



Tabla 3.3 Indicadores que conforman la dimensión de Conocimiento y Educación

3ra. Dimensión: Conocimiento y educación		
Analiza el nivel y la capacidad de acceder a información relevante para saber qué hacer antes, durante y después de un desastre por parte de la población. Además, intenta medir la profundidad de la concientización que un municipio tiene sobre su vulnerabilidad ante los efectos de los desastres naturales.		
Indicador	Medición	Justificación
	$HTV = \left(\frac{h_{tv}}{h_{total}} \right) * 100$	
Hogares con televisión	<p>Donde:</p> <p><i>HTV</i>: proporción de hogares con televisión</p> <p><i>h_tv</i>: hogares o viviendas particulares en el municipio con disponibilidad de televisión</p> <p><i>h_total</i>: total de viviendas en el municipio</p>	Al ser parte de los principales medios de comunicación, se considera que mientras una familia disponga de uno es más probable que obtenga más información tanto de las amenazas que pudiera estar expuesto como a las alertas que pudieran darse por parte de las autoridades ante la eventualidad de una contingencia, además del conocimiento de las medidas a seguir en caso de un desastre.
	$HR = \left(\frac{h_{radio}}{h_{total}} \right) * 100$	
Hogares con radio	<p>Donde:</p> <p><i>HTV</i>: proporción de hogares con radio</p> <p><i>h_radio</i>: hogares o viviendas particulares en el municipio con disponibilidad de radio</p> <p><i>h_total</i>: total de viviendas en el municipio</p>	
	$APE = \frac{\sum_{i=0}^n est_a}{pop_{tot}}$	
Años promedio de escolaridad	<p>Donde:</p>	El nivel de educación promedio de la población puede determinar la capacidad de obtener y atender información relevante para la atención o evacuación oportuna de desastres naturales.



	<p><i>APE</i>: años promedio de escolaridad de la población</p> <p>$\sum_{i=0}^n est_a$: Suma de años de escolaridad de la población del municipio</p> <p><i>pop_tot</i>: población total del municipio</p>	<p>Además, puede considerarse como un indicativo del nivel de capital humano prevaleciente en un municipio. Mientras mayor sea el nivel educativo, aumenta la posibilidad de encontrar mejores condiciones económicas y reactivar la economía rápidamente.</p>
<p>Población con ingreso superior a la línea de bienestar</p>	<p style="text-align: center;">$PLB = \frac{p_nbien}{pob_tot}$</p> <p>Donde:</p> <p><i>PLB</i>: proporción de la población con ingresos por encima de la línea de bienestar</p> <p><i>p_nbien</i>: población con ingreso por encima de la línea de bienestar</p> <p><i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	<p>En caso de un desastre, la población con ingreso superior a la línea de bienestar cuenta con una capacidad de respuesta y de recuperación. De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), la línea de bienestar mínimo equivale al valor total de la canasta alimentaria y no alimentaria por persona al mes.</p>
<p>Hogares con disponibilidad de conexión a internet</p>	<p style="text-align: center;">$HAI = \frac{h_int}{h_tot}$</p> <p>Donde:</p> <p><i>HAI</i>: Proporción de hogares con acceso a internet</p> <p><i>h_int</i>: hogares o viviendas particulares en el municipio con conexión a internet</p> <p><i>h_tot</i>: total de viviendas en el municipio</p>	<p>Principal medio de comunicación y de obtención de información en la actualidad. Al igual que la televisión y la radio se considera que mientras una familia disponga de conexión a internet es más probable que obtenga más información tanto de las amenazas que pudiera estar expuesto como a las alertas que pudieran darse por parte de las autoridades ante la eventualidad de una contingencia, además del conocimiento de las medidas a seguir en caso de un desastre.</p>

Tabla 3.3 Adaptado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2015).



Tabla 3.4 Indicadores que conforman la dimensión de Gestión del riesgo y reducción de vulnerabilidad

4ta. Dimensión: Gestión de riesgo y reducción de vulnerabilidad

Mide la vulnerabilidad de la población por varios factores que resultan relevantes cuando se analiza su capacidad de resiliencia ante desastres de origen natural. Identificar a la población con carencias al acceso a seguridad social, médica, calidad y servicios básicos en la vivienda, ingreso mínimo necesario para garantizar un desarrollo personal, etc., son fundamentales para enfocar acciones y políticas que mitiguen el riesgo de la comunidad. El conocimiento del grado de vulnerabilidad y las acciones específicas para reducirla muestran las áreas críticas y el posible impacto social y económico que un desastre que se pueda presentar en una comunidad.

Indicador	Medición	Justificación
<p>Población que presenta carencia por acceso a los servicios de salud</p> <p>Donde:</p> <p><i>CSS</i>: carencia en servicio de salud</p> <p><i>pob_css</i>: población con carencia de servicio de salud</p> <p><i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	$CSS = \frac{pob_css}{pob_tot}$	<p>Una comunidad resiliente tiene como característica mantener una condición física normal y la oportunidad de acceder a un nivel de salud óptimo que le permitan a la población desarrollarse en todos los sentidos posibles. Una comunidad sana tiene mayor posibilidad de enfrentar situaciones naturales extremas de forma adecuada, así como contribuir en las tareas de rescate, reconstrucción y reactivación económica de la manera más rápida posible.</p>
<p>Población que presenta carencia en calidad y espacios de vivienda</p> <p>Donde:</p> <p><i>CCV</i>: carencia en calidad de espacios de vivienda</p> <p><i>pob_ccv</i>: población con carencia en calidad de espacios de vivienda en el municipio</p> <p><i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	$CCV = \frac{pob_ccv}{pob_tot}$	<p>El acceso a la vivienda de calidad no únicamente contribuye al desarrollo de la población en todos aspectos, también aumenta la resistencia física ante desastres de origen natural.</p>



Población que presenta carencia en servicios básicos de vivienda	<p>Donde:</p> <p><i>CSV</i>: carencia en servicios básicos de vivienda</p> <p><i>pob_css</i>: población con carencia en servicios básicos de vivienda en el municipio</p> <p><i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	$CSV = \frac{pob_csv}{pob_tot}$	El acceso a todos los servicios básicos contribuye al desarrollo de la población en diversos aspectos. Además, es muy probable que una vivienda cuente con servicios básicos disponibles, se encuentre en asentamientos regulados y avalados por las autoridades correspondientes
Instituciones de protección civil en el municipio	<p>Donde:</p> <p><i>IPC</i>: instituciones de protección civil</p>	$IPC = \begin{cases} 1 & \text{si existe una institución de protección civil} \\ 0 & \text{si no existe una institución de protección civil} \end{cases}$	La capacidad institucional a nivel municipal de evaluación, análisis, difusión y reacción ante la ocurrencia de posibles fenómenos naturales que se puedan convertir en desastres dependerá de la existencia de una institución de protección civil en el municipio
Personal médico disponible	<p>Donde:</p> <p>PMD: médicos disponibles por cada mil personas</p> <p><i>med</i>: número de personal médico a nivel municipal</p> <p><i>10,000_hab</i>: población municipal expresada por cada 10,000 habitantes</p>	$PMD = \frac{md}{10,000_hab}$	La Secretaría de Salud indica que es aceptable que exista un médico por cada 10,000 habitantes, por lo que el indicador reporta la disponibilidad de médicos para atender a la población por cada 10,000 habitantes en un periodo determinado. La baja proporción de médicos se reflejará en las condiciones de salud de la población, lo que agudiza las condiciones de vulnerabilidad, situación que se podría acentuar en caso de emergencia o desastres.

Tabla 3.4 Adaptado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2015).



Tabla 3.5 Indicadores que conforman la dimensión de Preparación y respuesta hacia los desastres

5ta. Dimensión: Preparación y respuesta hacia los desastres

Mide la capacidad que tiene una comunidad de recuperarse de la manera más rápida posible ante un desastre de origen natural mediante los niveles de funcionamiento social, político y económico anteriores a la ocurrencia de un evento natural extremo. Son condiciones que facilitan la adaptabilidad y recuperación de los habitantes.

Indicador	Medición	Justificación
Población que presenta carencia por acceso a la seguridad social	$CPS = \frac{pob_cps}{pob_tot}$ <p>Donde: <i>CPS</i>: carencia en seguridad social <i>pob_cps</i>: población que no tiene seguridad social en el municipio <i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	Una comunidad resiliente tiene como característica la estabilidad ante situaciones contingentes. Si la entidad es capaz de garantizar un mecanismo que ayude a las personas que han sido víctimas de una situación contingente o que son socialmente vulnerables, estas personas disminuyen también su vulnerabilidad ante la ocurrencia de fenómenos naturales extremos.
Ingreso per cápita mensual	$Ipcap = \frac{\sum_{i=0}^n ing}{pob_tot}$ <p>Donde: <i>Ipcap</i>: ingreso per cápita mensual a precios constantes de 2010 $\sum_{i=0}^n ing$: suma de los ingresos de las personas que viven en un municipio <i>pob_tot</i>: población total del municipio</p>	El nivel de ingreso per cápita debe ser considerado, no como el único, pero sí como el factor más importante que determina el nivel económico de la población. A mayor nivel de ingreso las condiciones materiales y aptitudes de la población tienen la probabilidad de acercarse a su nivel potencial. Además, la capacidad económica brinda la oportunidad de reaccionar de manera oportuna ante situaciones contingentes originadas por desastres de origen natural.
Hectáreas de riego	$HR = \frac{hr_riego}{hr_total}$	Una hectárea de cultivo que tiene una estructura de riego, en promedio, es más resistente a una hectárea de temporal. Su capacidad de soportar eventos extremos como sequías es considerablemente mayor. Además, una estructura de riego



	<p>Donde:</p> <p><i>HR</i>: proporción de hectáreas cultivables totales que son de riego</p> <p><i>hr_riesgo</i>: hectáreas cultivables con sistema de riesgo del municipio</p> <p><i>hr_total</i>: hectáreas cultivables totales del municipio</p>	<p>señaliza no sólo una política económica activa para la protección de cosechas, sino que también es producto de un proceso de concientización ambiental y nivel de desarrollo económico que permite la construcción de infraestructura que toma en cuenta la situación climatológica del municipio.</p>
<p>Número de bancos</p>	$BAN = \left(\frac{bn}{1000_{hab}} \right) * 100$ <p>Donde:</p> <p><i>BAN</i>: número de bancos por cada 1,000 habitantes</p> <p><i>bn</i>: número de bancos a nivel municipal</p> <p><i>1000_hab</i>: población municipal expresada en miles de habitantes</p>	<p>El número de bancos a nivel municipal es una variable que intenta aproximar el nivel de penetración financiera en una comunidad. El uso de servicios financieros es importante no sólo porque indica ingresos mayores y un dinamismo económico mayor en las zonas donde proliferan, además garantizan un patrón de consumo con mayor estabilidad. La capacidad de acceder a préstamos bancarios o servicios financieros son factores relevantes que pueden amortiguar de manera considerable los efectos a corto y a mediano plazo de un siniestro y ayudar a una recuperación más veloz.</p>
<p>Densidad de vías de acceso por kilómetro cuadrado</p>	$DC = \left(\frac{km_c}{sp_{km^2}} \right) * 100$ <p>Donde:</p> <p><i>DC</i>: densidad de carreteras con respecto al área del municipio</p> <p><i>km_c</i>: kilómetros construidos de carreteras federales, estatales, municipales y caminos rurales que pasan por un municipio</p> <p><i>sp_km^2</i>: superficie en kilómetros cuadrados de un municipio</p>	<p>La densidad de vías de comunicación es directamente proporcional a la capacidad de desplazar bienes intermedios, finales y personas dentro de un municipio, además, la densidad de carreteras también se encuentra directamente correlacionada con el nivel de dinámica económica.</p> <p>Por otro lado, refleja la capacidad de los equipos de rescate y ayuda nacional e internacional para atender en el menor tiempo posible a la población más necesitada.</p>

Tabla 3.5 Adaptado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2015).



Posteriormente, dicho organismo utiliza el método de Estratificación de Optimización de Jenkins para generar *clusters* que permitan agrupar a los municipios de acuerdo con su grado de resiliencia, como se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Estratificación del índice de resiliencia municipal

Nivel de resiliencia	Índice de resiliencia municipal en escala de 0 a 100		Municipios	
	Límite inferior	Límite superior	Número	Porcentaje (%)
Muy bajo	0	27.14883	262	10.67
Bajo	27.14884	38.12637	446	18.16
Medio	38.12638	48.38701	568	23.13
Alto	48.38702	61.44915	715	29.11
Muy Alto	61.44916	100	465	18.93

Tabla 3.6 Tomado de Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2015).

Con base en el índice de resiliencia obtenido para cada sitio considerado en el problema de localización a través del problema de diversidad máxima y con la estratificación sugerida por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED se medirá la resiliencia de los sitios seleccionados al localizar almacenes, de modo que se pueda determinar si se está mejorando. En el capítulo anterior, también se destacó el trabajo de CENAPRED en cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad de los municipios frente a los desastres naturales, mediante un Sistema de Información Geográfica. Dicho indicador también será utilizado en el modelo de diversidad máxima; sin embargo, se retomará de qué forma se consideró la evaluación de la vulnerabilidad en los parámetros que admite el problema de diversidad máxima en el siguiente capítulo, específicamente en la sección de recolección de datos e información.

3.2.6 Diagrama de influencia

Dentro del desarrollo de este trabajo también se han requerido métodos de análisis que permiten construir modelos conceptuales para la toma de decisiones. Uno de los métodos empleados para discernir los datos que se requieren recolectar acerca de los sitios considerados en la localización es el diagrama de influencia (subtema 4.3). Por esta razón, en este apartado se explica en qué consiste este método de análisis para que se pueda entender de qué forma fue utilizado dentro de la metodología de trabajo.

El diagrama de influencia es una representación visual en forma de grafo de un problema de decisión. Permite identificar y representar los elementos más importantes del problema bajo análisis, incluyendo decisiones, objetivos y elementos de azar, así como las relaciones entre ellos. Lezama-Leguizamón (2008) indica que el diagrama de influencia modela la realidad a través de nodos y arcos. Los arcos dirigidos representan el sentido de las relaciones que existen entre los nodos, mostrando las dependencias entre ellos. La complejidad de este método recae en que existen diferentes tipos de nodos y arcos, por lo que se requiere que los modeladores conozcan exactamente qué significa cada uno de ellos (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Simbología del diagrama de influencia.

Representación gráfica	Tipo	Significado
	Elemento principal de análisis	Representa el objetivo a optimizar
	Nodo de valor	Representa objetivos secundarios
	Nodo de decisión	Variables de decisión que representan acciones que se encuentran bajo el control del decisor.
	Nodo de azar	Variables que representan eventos que no están bajo el control del decisor.
	Arco condicional	Si el arco se encuentra dirigido a un nodo de azar o nodo de valor
	Arco informativo	Si el arco se dirige a un nodo de decisión

Tabla 3.7 Adaptado de Lezama-Leguizamón (2008).

Finalmente, con el modelo de diversidad máxima bien definido y comprendido se puede iniciar la construcción del modelo adaptado completamente al problema de investigación. Por esto, a continuación, se presenta la metodología que se seguirá para alcanzar la solución y las recomendaciones de la propuesta de este trabajo.



3.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

De acuerdo con el problema de investigación y con el modelo de solución elegido para resolverlo (recordando que el modelo de diversidad máxima consta de la estructura de un problema de programación entera), la metodología que se emplea en este trabajo toma como referencia el enfoque de modelación en investigación de operaciones mostrado en el libro desarrollado por Hillier y Lieberman (2013).

En la Figura 3.7 se muestra la metodología requerida para construir el modelo de solución del problema de investigación de este trabajo; a continuación, se explica en qué consiste cada uno de los pasos presentados con el fin de comprender la importancia de cada uno.

3.3.1 Descripción del sistema bajo estudio

Landry, Malouin y Oral (1983) establecen que un problema puede ser creado por la presencia de una situación no satisfecha o la identificación de alguna oportunidad de mejora. Dicho problema se encuentra inmerso en una “situación problema” y se conforma de algunos elementos del mundo real. A partir de esto, la situación problema se definirá y se determinará por las percepciones y el comportamiento de los actores involucrados.

De acuerdo con lo comentado por Landry *et al.* (1983), el primer paso dentro de la metodología de investigación de operaciones es el conocimiento del sistema que involucra la situación problema. Conocer cuáles son los elementos involucrados, así como el ambiente que lo influye representan el primer acercamiento para comprender de una mejor manera las causas y relaciones que originan el problema que se encontrará en investigación.

En el siguiente capítulo se detallará el desarrollo de la metodología de investigación acoplado al problema de investigación definido, sin embargo, el primer acercamiento para conocer al sistema involucrado en la situación problema se pudo mostrar en el desarrollo del primer capítulo de este trabajo. El planteamiento del problema parte del análisis de los múltiples elementos, relaciones y condiciones que han derivado a la presencia de una situación problema. El conocimiento del sistema que involucra la situación problema permite que se pueda reconocer y definir el problema de investigación. A pesar de que es importante conocer los detalles de la situación problema que se esté analizando, resulta necesario construir un modelo conceptual que permita condensar los factores más relevantes del sistema, con el fin de que cualquier persona pueda comprender fácilmente los elementos que conforman el problema. El modelo conceptual permite conocer la forma en que un modelador y un decisor perciben la situación problema, aunque debe ser lo suficientemente robusto para que la situación problema pueda ser comprendida por sí mismo.



Figura 3.7 Metodología seguida en este trabajo de investigación

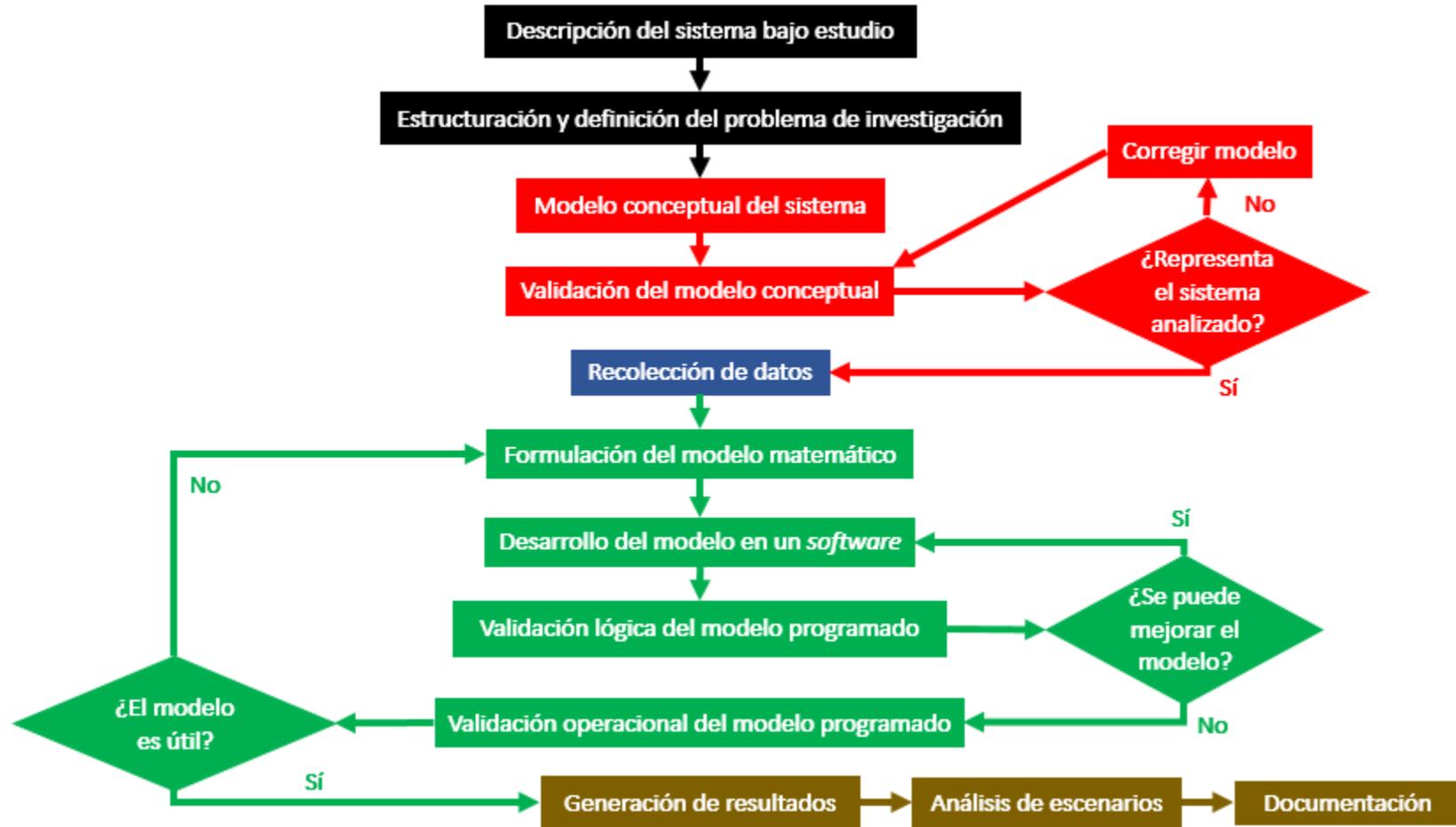


Figura 3.7 Adaptado de Hillier y Lieberman (2013).

3.3.2 Estructuración y definición del problema de interés

Como apuntan Hillier y Lieberman (2013), a pesar de que la Investigación de Operaciones se centra en el desarrollo de métodos matemáticos para solucionar problemas, frecuentemente el análisis matemático sólo representa una pequeña parte del trabajo de investigación que en realidad se debe realizar. Reconocer con precisión cuál es el problema que se debe resolver, en la mayoría de los casos, es una tarea compleja que requiere un gran esfuerzo intelectual del modelador, así como de las personas involucradas en el sistema que se está analizando.

Este proceso de definición del problema es crucial, pues afectará en gran medida el curso de la investigación, ya que, como lo ejemplifican Hillier y Lieberman (2013), el trabajo podría recaer en una solución correcta a partir de un problema enfocado de manera equivocada. Por estas razones, la definición del problema no debe considerarse una tarea trivial o sin importancia.

Al estructurar y definir el problema, el modelo conceptual producto de estos procesos se traducirá en el modelo que se elija emplear. A pesar de que la realidad sea compleja, imprecisa y subjetiva, trasladar todos los factores involucrados hacia un modelo conceptual con el fin de entender el problema representa un ejercicio necesario, por más desafiante que parezca.

Concretamente, esta etapa consiste en el estudio del sistema ya definido en el paso anterior, con el fin de desarrollar un resumen concreto que permita entender el problema (Hillier y Lieberman, 2013). Inclusive desde esta actividad se pueden establecer ciertos objetivos, algunas restricciones, determinar ciertas relaciones entre los elementos, límites de tiempo, entre otros. Con el fin de que el modelo conceptual represente lo mejor posible la realidad, se recomienda que los decisores y actores estén involucrados en el análisis y construcción del problema. Junto con ellos será más fácil definir qué supuestos se pueden considerar dentro de la formulación del problema, o pueden establecerse parámetros fundamentales para la formulación del modelo formal.

Durante el proceso de modelación, continuamente se presentará la necesidad de validar lo que se está haciendo. El proceso de validación significa cerciorarse, en cada paso que se da, si lo que se está haciendo representa el problema que en realidad se busca solucionar. Este proceso subjetivo puede resultar ser una de las tareas más complejas, incluso a veces ignorada, pero se requiere realizar con el fin de tener la certeza de que los resultados serán significantes y que ayudarán a solucionar el problema, ya sea en forma de recomendación o que realmente se logre que el modelo sea implementado.

La primera validación que se necesita realizar es la validación del modelo conceptual. Dependiendo del problema a solucionar o la cooperación de los decisores y actores involucrados, la técnica de validación puede variar. Frecuentemente, en la validación del modelo conceptual se opta por cuestionar a los decisores si el modelo conceptual construido representa en realidad el problema que se solicita resolver. Otras técnicas de validación del

modelo conceptual son la revisión en la literatura - de manera que se pueda encontrar trabajos que sean similares al que se busca desarrollar, con el fin de establecer que la visión adoptada es correcta – y la consulta directa de expertos en el tema de investigación. Se requiere validar el modelo conceptual para continuar con el proceso de modelación, en caso contrario se deberán realizar tantas revisiones como sean requeridas hasta que el modelo conceptual defina el problema correctamente.

3.3.3 Recolección y procesamiento de datos

Después de realizar la conceptualización del sistema, así como la definición del problema de investigación, el modelador explorará ciertas formulaciones matemáticas que permitan resolver la situación. A través de la revisión de la literatura y la experiencia del modelador, se podrá discernir las formulaciones de modelos matemáticos que más se acerquen al problema de investigación. Eligiendo los métodos matemáticos más adecuados para la solución del problema, se podrán determinar los datos requeridos para desarrollar los modelos.

Dependiendo del tipo de problema que se busque solucionar o la dimensión del mismo, la recolección de datos relevantes puede resultar ser un paso que demande una gran cantidad de tiempo o ser la actividad más costosa dentro de la investigación. Sin embargo, la recolección de datos no resulta ser suficiente dentro de este paso, ya que también se requiere validar la precisión y coherencia de los datos obtenidos. Frecuentemente los datos que los propietarios del sistema proporcionan están incompletos o alterados, por lo que es necesario que se tomen en cuenta métodos estadísticos para su validación. Otra situación que puede presentarse es contar con demasiada información, por lo que es difícil determinar si se pueden utilizar todos o qué tipo de datos considerar.

3.3.4 Formulación de un modelo matemático que represente el problema

Con el problema definido y los datos procesados, el siguiente paso es reformular el modelo conceptual del problema hacia un modelo matemático que permita resolverlo. Este proceso puede entenderse como la translación del modelo conceptual hacia símbolos matemáticos (Landry *et al.*, 1983), la cual puede no ser exacta, aunque se debe conservar la esencia del modelo conceptual que representa al problema. El propósito de realizar esta traducción de un modelo conceptual a un modelo formal consiste en contar con la posibilidad de estudiar el problema mediante la manipulación que permite un modelo matemático, con el fin de obtener soluciones que permitan formular recomendaciones.



De acuerdo con el enfoque de modelación de la Investigación de Operaciones (Hillier y Lieberman, 2013) , el modelo matemático empleado para resolver el problema cuenta con la siguiente estructura:

- Variables de decisión: Definen la cantidad de decisiones cuantificables relacionadas entre sí, las cuales mediante iteraciones se obtendrán sus valores respectivos. Las variables de decisión suelen denotarse como x_1, x_2, \dots, x_n ;
- Función objetivo: Es la medida de desempeño que representa, en cierta forma, el objetivo de la investigación. Es representada por una función matemática que incluye la combinación matemática de las variables de decisión.
- Restricciones: Son las limitaciones abstraídas del sistema de los valores que pueden obtener cada una de las variables de decisión representadas por ecuaciones o desigualdades.
- Parámetros: Representa los valores constantes dentro del modelo matemático. Los parámetros son obtenidos de la recolección y procesamiento de los datos.

El modelo matemático consiste en elegir los valores de las variables de decisión de manera que se optimice una función objetivo, sujeta a restricciones.

Una de las cuestiones que Hillier y Lieberman (2013) recomiendan tener en cuenta es que un modelo matemático representa una idealización abstracta del problema. Esto es importante destacarlo, ya que la complejidad de la realidad no permite que un modelo conceptual o matemática capturen todos los elementos involucrados en un problema. Estas condiciones conllevan a realizar aproximaciones y supuestos que permiten simplificar la realidad y poder desarrollar un modelo que sea manejable (susceptible de ser resuelto).

Durante el desarrollo del modelo matemático se recomienda comenzar con una versión muy sencilla y avanzar de manera evolutiva hacia paradigmas más elaborados que reflejen mejor la complejidad del problema real, a esto se le conoce como el principio de parsimonia. Este proceso de enriquecimiento del modelo continúa sólo mientras sea manejable. La decisión básica que debe tomarse oscila entre la precisión y el manejo del modelo.

3.3.5 Desarrollo del modelo matemático mediante un programa de computadora

Una vez formulado el modelo matemático del problema en estudio, el modelador requiere analizar el tamaño o la complejidad de la formulación desarrollada. Este paso es esencial, ya que, a partir de este paso, se definirá la manera en que se resolverá el problema. Debido al tamaño y complejidad de los modelos que solucionan problemas reales, resulta casi siempre



necesario emplear un *software* que ayude a resolver el problema. Por lo general, el algoritmo que se emplea para encontrar soluciones de los problemas de Investigación de Operaciones es el procedimiento iterativo de solución. Depende de la complejidad del problema el tipo de programa o *software* que se requiere para alcanzar una solución. En la formulación del problema de diversidad máxima desarrollado en este trabajo, basta con la programación del modelo mediante el *software* LINGO para poder obtener diferentes soluciones; sin embargo, si el problema a resolver tuviera una mayor cantidad de elementos, se requeriría aplicar un método metaheurístico para obtener soluciones.

3.3.6 Validación lógica (verificación) del modelo programado

El desarrollo de un modelo matemático a través de un software puede conllevar a caer en fallas. Por lo general, entre más grande sea el modelo, será mayor el riesgo de incurrir en errores. Por esta razón es que se debe verificar tanto la formulación del modelo matemático, así como su adecuación a un programa de computadora. El modelo debe ser probado de manera exhaustiva para tratar de encontrar y corregir tantas fallas como sea posible. Además, a través de la revisión exhaustiva se pueden identificar mejoras tanto en la formulación, así como en la traducción al modelo programado.

Una de las recomendaciones que se pueden realizar en el proceso de verificación es la revisión de que todas las expresiones matemáticas y las dimensiones de las unidades que se emplearon en el modelo sean congruentes. Otra medida para verificar si el modelo es correcto requiere de la modificación de los valores de los parámetros o cambios en las variables de decisión, de esta manera se puede comprobar si los resultados del modelo se comportan de una manera plausible. Frecuentemente estas medidas resultan ser muy efectivas, sobre todo cuando se asignan valores extremos en los parámetros o variables de decisión.

Después de ejecutar varios programas mejorados, se podrá concluir que el programa actual proporciona resultados razonablemente correctos. Es posible que el modelo aún pueda presentar algunas fallas, sin embargo, la verificación habrá eliminado la cantidad suficiente de errores mayores, con lo que se puede declarar que la utilización del modelo será confiable (Hillier & Lieberman, 2013).

3.3.7 Validación operacional del modelo programado

Durante el proceso de verificación del modelo, se llevan a cabo comparaciones entre los resultados obtenidos del modelo programado y el comportamiento que se espera que tenga el modelo. Estas comparaciones representan una de las formas de validar el modelo programado.



La validación del modelo programado se define como la comprobación de que el modelo programado representa la realidad que presenta el problema de investigación. El proceso de validación del modelo programado varía de acuerdo con el problema bajo estudio, el modelo elaborado, la información con la que se cuenta y las personas involucradas en la modelación.

Por ejemplo, una de las técnicas de validación del modelo programado es la prueba retrospectiva, la cual consiste en la utilización de datos históricos para reproducir resultados del pasado mediante el modelo programado. Si los resultados obtenidos por el modelo coinciden o se asemejan a los resultados reales, se habrá validado el modelo. No obstante, la prueba retrospectiva posee la desventaja de basarse en los mismos datos que sirvieron para formular el modelo, lo cual permite el cuestionamiento acerca de si el pasado puede representar el futuro.

Hillier y Lieberman (2013) recomiendan que un criterio adecuado para juzgar la validez de un modelo es si se predice o no con suficiente exactitud los efectos relacionados con el desarrollo de diferentes escenarios, con el fin de tomar decisiones que tengan sentido. Por lo tanto, establecen que todo lo que se requiere es que exista una alta correlación entre la predicción del modelo y lo que ocurre en la vida real. Por ello, se requiere realizar un número considerable de pruebas del modelo y sus modificaciones consecuentes.

Landry *et al.* (1983) reconocen que gran parte de la validación del modelo se lleva a cabo durante el proceso de construcción, por lo que constituyen que realmente se realiza un proceso de modelación-validación.

3.3.8 Generación de resultados

Uno de los temas que cuestionan Hillier y Lieberman (2013) es la obsesión de varios investigadores por obtener soluciones óptimas. Una vez que se cuenta con el modelo programado verificado y validado, se cuenta con la confianza de generar resultados que ayudarán a tomar decisiones que permitan solucionar el problema estudiado. Sin embargo, como se apunta al principio, la obtención de soluciones óptimas es cuestionable ya que éstas son producto de un modelo idealizado y simplificado de la realidad. Si bien, se busca la validación del modelo en cada proceso que conforma la metodología, no se puede ignorar que las soluciones deben someterse a interpretación y análisis que servirán como recomendaciones para resolver la situación problema. A pesar de obtener soluciones óptimas, debe recordarse que éstas representan aproximaciones para desarrollar soluciones reales. Hillier y Lieberman (2013) definen que la prueba del éxito de un estudio de Investigación de Operaciones recae en proporcionar una guía para la toma de decisiones.



3.3.9 Análisis de escenarios

Una de las fortalezas que puede brindar un modelo matemático es la flexibilidad para proporcionar diferentes soluciones de acuerdo con diferentes escenarios. Este análisis también se puede entender como el análisis de ¿qué pasa sí?, puesto que involucra algunas preguntas acerca de qué pasaría con la solución óptima si se hubieran considerado diferentes supuestos, diferentes métricas o diferentes parámetros.

Hillier y Lieberman (2013) destacan que incluso el proceso de experimentar cambios en el modelo programado brinda la oportunidad de comprender mejor el comportamiento del modelo, así como también robustecer la validez del modelo empleado.

3.3.10 Documentación

Finalmente, después de realizar todo el proceso de modelación, es importante documentar toda la información obtenida durante el desarrollo de toda la metodología. Considerando el caso de este trabajo de investigación al desarrollar un modelo matemático con el fin de brindar aportaciones teóricas, la documentación del proceso de investigación y modelación puede proporcionar las bases teóricas para investigaciones subsecuentes. Otro motivo que destaca la importancia de la documentación se representa al permanecer como un diagnóstico de errores de otras formulaciones o propuestas, o bien la posibilidad de que investigaciones futuras corrijan o actualicen criterios de evaluación. La documentación también funge como apoyo o evidencia en el caso de que otros investigadores requieran reproducir la investigación para probar su validación.

3.4 OBJETIVO GENERAL

Como desenlace de la construcción de la metodología que ayudará a desarrollar el modelo matemático que permita brindar soluciones ante el problema de la localización de almacenes considerando el aumento de la resiliencia en la cadena de suministro, al contar con todos los elementos, definiciones, paradigmas y métodos necesarios para la realización del modelo de diversidad máxima, se puede establecer el objetivo que busca cumplir este trabajo de investigación. El objetivo general de este documento se presenta a continuación:



- Proponer una estrategia de localización de almacenes considerando la formulación del Problema de Diversidad Máxima como un enfoque resiliente de la gestión de la cadena de suministro ante la ocurrencia de desastres naturales en México.

Con el objetivo de investigación y la metodología de solución establecidos, en el siguiente capítulo finalmente se presenta el desarrollo del modelo de diversidad máxima, obedeciendo paso por paso el proceso de modelación descrito anteriormente.



CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

4.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

Durante la documentación de los capítulos anteriores, se ha logrado determinar el proceso de modelación que permite el desarrollo del problema de diversidad máxima. A través de la revisión de literatura presente durante toda la investigación, se ha estudiado y determinado los criterios necesarios para la definición de la diversidad que determina el funcionamiento de la propuesta de esta investigación.

Con todo lo anterior, en este capítulo se presenta paso a paso la construcción del modelo de solución, así como la especificación de cada detalle que conforma la formulación del problema de diversidad máxima.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO

Como se mencionó anteriormente durante la presentación de la metodología de investigación que se sigue en este documento, la descripción del sistema que se encuentra bajo estudio se llevó a cabo durante el desarrollo del planteamiento del problema, en el primer capítulo. A través de la exploración de los factores que están involucrados en el problema de estudio, inherentemente se realizó la descripción del mismo. Por ello, se puede establecer que la conclusión del primer capítulo representa la descripción escrita del sistema bajo estudio, la cual se retoma en los siguientes párrafos:

Considerando la problemática que conlleva el desarrollo económico del país, la cual se puede asumir que depende en gran medida del funcionamiento continuo de las cadenas de suministro de las empresas localizadas dentro de su territorio, la Secretaría de Economía en conjunto con el fideicomiso ProMéxico han desarrollado una estrategia comercial que busca atraer la inversión extranjera mediante el fortalecimiento de las relaciones empresariales entre compañías transnacionales y proveedores mexicanos. Una de las metas consecuentes de esta medida es provocar la localización de instalaciones extranjeras y mexicanas. A partir de esta estrategia comercial, se destaca que uno de los criterios que permitirá que la meta se pueda alcanzar es asegurar lo más posible la continuidad de las actividades productivas. La continuidad de las operaciones es una de las facetas consideradas en la resiliencia, por lo que se requiere atender las causas de interrupción que puedan afectar a las cadenas de suministro.

Dentro de las causas de interrupción, los desastres naturales destacan por su poder destructivo, además de que son eventos que las personas no pueden controlar y que son imposibles de



impedir. Establecida la resiliencia como el criterio a atender, se determinaron las características que lo definen – densidad, complejidad y nodos críticos - y la propiedad que permite que pueda aumentar, la diversidad.

Siendo la localización de instalaciones una de las metas perseguidas en la estrategia comercial, es necesario proporcionar soluciones para el problema de localización, pero considerando la resiliencia. La tendencia de globalización de las cadenas de suministro, sugieren que las actividades productivas se descentralizan, localizándose en diferentes ubicaciones y dentro de los elementos de la cadena de suministro que suelen localizarse fuera de la planta matriz de una empresa se encuentran los almacenes. Estos elementos logísticos además de enfrentarse al peligro de los desastres naturales, también se enfrentan a la pérdida de control de su planta central, ya que al no encontrarse en las oficinas centrales de las empresas se pierde de vista el funcionamiento y las interrupciones que lo puedan atacar. Los almacenes constituyen elementos con gran propensión a encontrarse en interrupción. Además, bajo el escenario de la ocurrencia de desastres naturales, los almacenes desempeñan un papel clave dentro del suministro de productos básicos para satisfacer la demanda de las personas afectadas, por lo que la localización de almacenes adicionales, es decir inventario extra, representa una decisión clave para que el país pueda mejorar su resiliencia y disminuir los impactos socioeconómicos.

A partir de la comprensión de la situación problema presente en el sistema que se está estudiando, se requiere construir un modelo conceptual que permita recuperar los elementos más relevantes que definen el problema de investigación, de modo que a través de una herramienta visual se logre explicar por sí mismo el sistema bajo estudio. En la Figura 4.1 se muestra el modelo conceptual construido mediante la información presentada en el planteamiento del problema; con el sistema de la situación problema bien definido, el siguiente paso es la estructuración y definición del problema de investigación.

4.3 ESTRUCTURACIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Al reconocer que es inevitable sufrir las consecuencias de los fenómenos naturales en cualquier ubicación geográfica debido a que nuestro país cuenta con la mayoría de las regiones naturales, el enfoque de este trabajo de investigación se centra en la decisión de localizar cada uno de los almacenes contemplando que se ubiquen en sitios con características diferentes, esto provocará que sean afectados por distintos fenómenos naturales, pero en distintos momentos o circunstancias disimilares, así no se encontrarán expuestos todos los almacenes al mismo tiempo si se localizarán todos en una misma región evitando paralizar las actividades de una organización.



Figura 4.1 Modelo conceptual del sistema involucrado en el problema de investigación

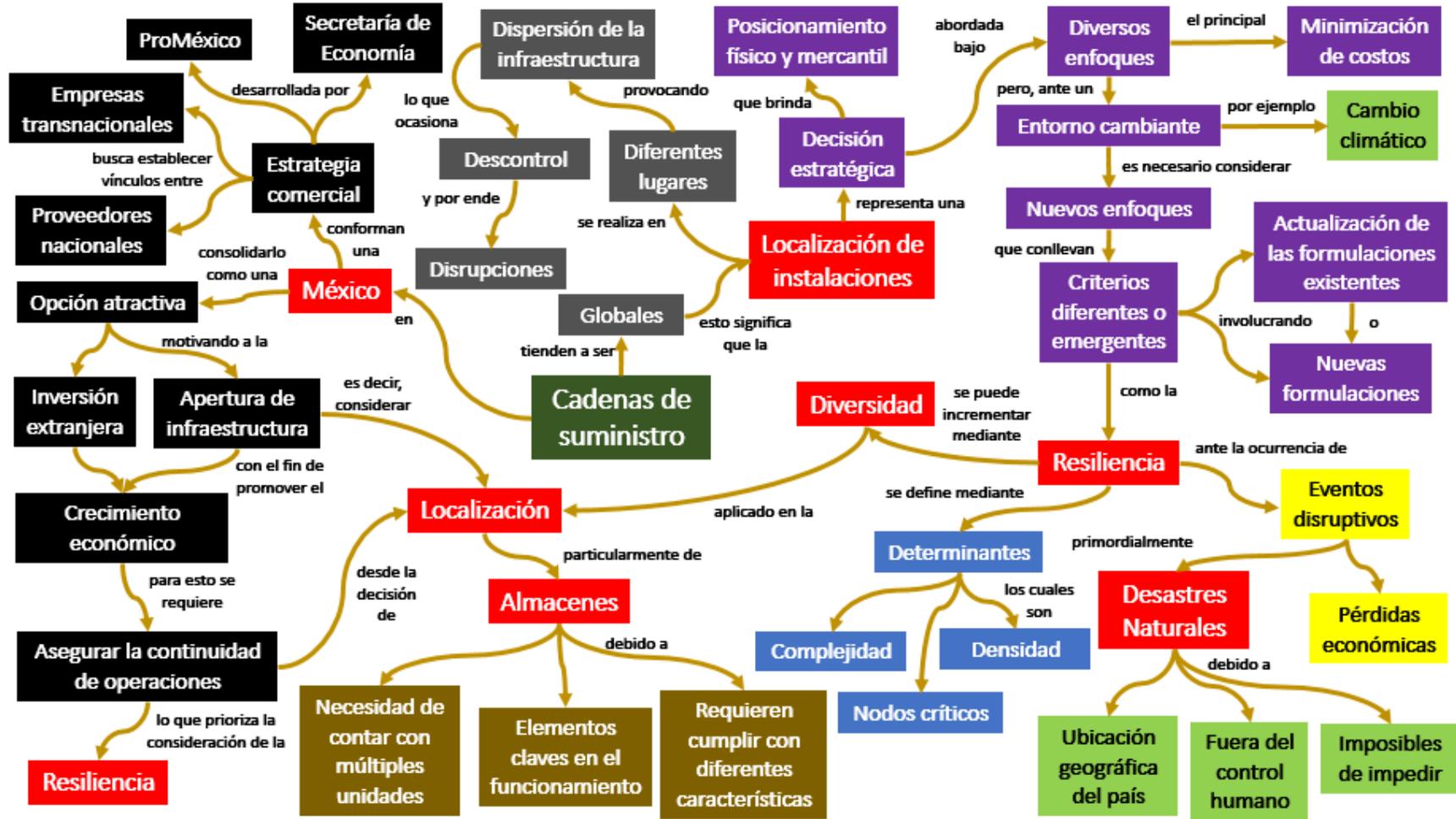


Figura 4.1 Elaboración propia.

Si cada uno de los almacenes posee una localización con características diferentes al del resto y en dado caso de presentarse un desastre natural, los demás almacenes serán capaces de responder a las necesidades de la organización e inclusive auxiliar al almacén que se vea más afectado, esto es resiliencia en la cadena de suministro. Localizar almacenes donde la “diversidad” proporcionada por las características de cada una de las ubicaciones geográficas permite que los almacenes provean de resiliencia a la cadena de suministro.

Estas consideraciones están reflejadas en el problema de investigación definido en el primer capítulo:

- Formular un modelo de localización de almacenes incorporando la característica de la diversidad como criterio de localización para aumentar los niveles de resiliencia en la cadena de suministro.

Teniendo claro cuál es el problema de investigación, se requiere establecer cuáles son los criterios que definen la diversidad para poder localizar almacenes de manera resiliente. A través del marco teórico se han logrado identificar cinco criterios primordiales que permitirán definir la diversidad de características que deben tener los almacenes.

Figura 4.2 Diagrama de influencias acerca del problema de investigación

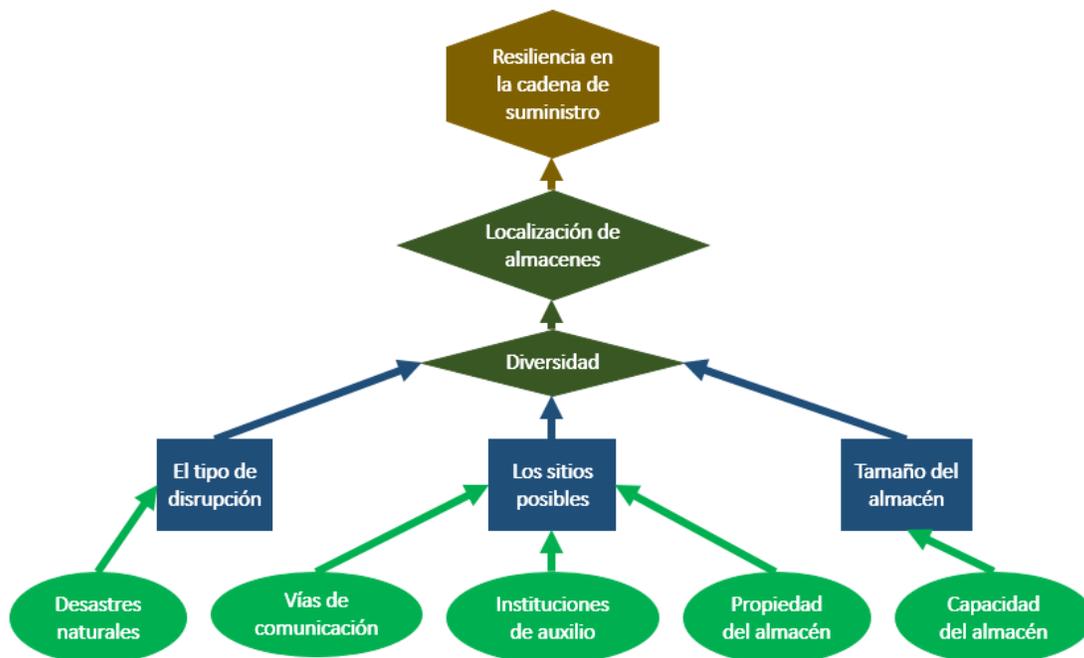


Figura 4.2 Elaboración propia con base en información de Abe y Ye (2013); Craighead *et al.* (2007); Kim (2012); Kleindorfer y Saad (2005); Korpela y Tuominen (1996) y Sheffi y Rice Jr. (2005).

En la Figura 4.2 se muestra un diagrama de influencias donde se muestran los criterios que se consideraron para construir el problema de diversidad máxima, así como las relaciones que denotan cuál es la información que está aportando para mejorar la resiliencia de los almacenes. Como se mencionó en la metodología de investigación, la definición del problema es clave en la solución del problema, ya que permite identificar los datos que deben recolectarse de las ubicaciones que se consideren para la localización de almacenes.

Con el fin de esclarecer cómo se establecieron los nodos, los arcos y las relaciones entre ellos, a continuación, se desglosa la construcción del diagrama de influencia de la Figura 4.2 a través de la Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Explicación del diagrama de influencia que define el problema de investigación

Representación gráfica	Concepto	Significado
	Resiliencia en la cadena de suministro	Como se explicó en la Tabla 3.1, el rombo representa el objetivo. La resiliencia forma parte del objetivo general de este trabajo, ya que es capacidad de resiliencia la que definirá la localización de almacenes; es por eso por lo que el arco que se dirige a este nodo denota a la localización de almacenes.
	Localización de almacenes	En este caso, la localización de almacenes es el enfoque que guía la investigación de este trabajo y que definirá la resiliencia en la cadena de suministro. El arco que se dirige a este elemento representa una relación condicional, lo que denota que la decisión de localizar los almacenes dependerá de la diversidad.
	Diversidad	La diversidad es el tercer componente del objetivo general, además esta propiedad definirá la localización de almacenes con un enfoque resiliente. Los arcos que se dirigen a este nodo plantean que la diversidad se verá definida por el desastre natural que ocasiona mayores efectos en los sitios considerados, las características de los sitios en cuanto a su infraestructura y el tamaño de los almacenes.
	El tipo de disrupción	Este nodo de decisión representa la consideración de los desastres naturales bajo los cuales se encuentran expuestos cada uno de los sitios considerados. El arco informativo establece que la disrupción a considerar es el efecto de los desastres naturales.



	Los sitios posibles	Las características de los sitios considerados definirán la diversidad en el problema de localización, los nodos que definen las características que el marco teórico sugiere son: las vías de comunicación del sitio, las instituciones de auxilio cercanas y la propiedad del sitio.
	Tamaño del almacén	El tamaño del almacén es otra característica importante que definirá la diversidad. La capacidad del almacén es un criterio bajo el cual se puede experimentar en cuando a contar o no con capacidad extra.
	Desastres naturales	Nodo de azar que define el enfoque de esta investigación, ya que se identifica la incapacidad de impedir que sucedan y que rebasan el control de las personas (Abe y Ye, 2013; García Arróliga <i>et al.</i> , 2016).
	Vías de comunicación	Este nodo de azar se considera debido a la sugerencia de Goble, Fields y Cocciara (2002) para determinar diferentes vías de transporte que conecten con los sitios a localizar.
	Instituciones de auxilio	Este nodo de azar se considera bajo la idea de la logística humanitaria, ya que como se pudo experimentar en el año 2017, las instituciones de auxilio resultaron clave en la pronta respuesta ante situaciones de riesgo.
	Propiedad del almacén	Este nodo de azar es considerado de acuerdo con las sugerencias de Korpela y Tuominen (1996) de considerar si el sitio considerado sería propiedad de la empresa o si se contrataría un proveedor que maneje el inventario.
	Capacidad del almacén	Este nodo de azar es definido por apuntes de Korpela y Tuominen (1996) y Miguel Llovera (2017) ante la importancia de que se cuente con inventario extra que pueda soportar las afectaciones de los desastres naturales.

Tabla 4.1 Elaboración propia.



4.4 DEFINICIÓN DE DIVERSIDAD

Una vez que se tienen identificados los criterios que componen la diversidad para la localización de los almacenes, se requiere exponer de qué manera se “mide” la diversidad, es por esto por lo que en esta sección se destacará el significado de la diversidad para el modelo de diversidad máxima.

Para que la propuesta del modelo de localización de almacenes mediante la diversidad máxima quede clara, se ejemplificará con un caso de aplicación. Se han considerado 32 locaciones importantes en el área de logística en el país, todas ellas de diferente naturaleza. Las características por evaluar de cada una de las posibles ubicaciones geográficas están relacionadas con la consideración, prevención y enfrentamiento de desastres naturales. De acuerdo con Goble, Fields y Cocciara (2002), la distribución física de recursos e implementación de vías de comunicación diversas disminuye la probabilidad de que un solo desastre incapacite a la empresa; considerando que la meta es crear una infraestructura operacional físicamente distribuida pero capaz de ser manejada como una sola entidad. La idea de la diversidad es “no poner todos los huevos en una sola canasta”. De esta forma es que se concreta que buscando la mayor diversidad será mayor la probabilidad de que la cadena de suministro sea resiliente.

Con esto en mente, se consideraron cinco criterios principales que proporcionaron características de cada uno de los posibles sitios y que, al considerarse que los almacenes a localizar funcionen como una sola unidad, adquirirán resiliencia ante fenómenos naturales; de manera que estos criterios fueron tomados en cuenta de acuerdo con la prevención, manejo y recuperación en caso de que se presente dicho acontecimiento.

Los criterios abordados en este trabajo son:

- 1) Desastre natural característico de la región;
- 2) Propiedad del almacén;
- 3) Vías de acceso;
- 4) Instituciones que brindan auxilio y;
- 5) Capacidad del almacén.

De acuerdo con la medida de disimilitud del coseno, mostradas en las Figuras 3.1, 3.2, 3.3, las valoraciones asignadas estarán determinados en el intervalo de -1 hasta +1, dependiendo del número de opciones que proporcione cada uno de los criterios. Las valoraciones no representan algún orden o jerarquía entre las opciones ya que el interés es que sean distintas



entre sí. A continuación, se describen los criterios que se han establecido para definir la resiliencia con base en la diversidad.

4.4.1 Desastre natural

Esta categoría representa al desastre natural que se presenta con mayor frecuencia en cada una de las localidades consideradas. Cabe reconocer la ocurrencia de más de un desastre natural en cada localidad, sin embargo, para la demostración de la diversidad y cómo la diversidad proporciona resiliencia, se ha considerado el desastre natural que ha afectado en una escala mayor a cada ubicación. Se han valorado los desastres naturales con mayor frecuencia y que pueden representar una afectación en la operación de un almacén.

Tabla 4.2 Valoraciones para el criterio de desastres naturales

Valor	Desastre natural
-1	Sequías
-0.6	Sismos
-0.2	Nevadas
0.2	Laderas
0.6	Ciclones tropicales
1	Inundaciones

Tabla 4.2 Elaboración propia con base en la información desarrollada por Mota Palomino *et al.* (1992).

4.4.2 La propiedad del almacén

Tabla 4.3 Valoraciones para el criterio de propiedad del almacén

Valor	Condición de la propiedad	Interpretación
-1	Renta del almacén	El hecho de que el proveedor asegure el control y manejo de las instalaciones proporciona una recuperación más rápida en caso de siniestro, ya que el mismo proveedor coordinará la reubicación o salvaguarda de los productos del cliente.
1	Propio	Considerar que la compañía decida adquirir el terreno y construir de acuerdo con sus requerimientos proporcionará resiliencia en el momento de que el desastre natural ocurra. El aprendizaje de los errores cometidos también se considera resiliencia.

Tabla 4.3 Elaboración propia con base en información presentada por Korpela y Tuominen (1996).



En los últimos años, los proveedores que proporcionan el servicio y manejo total de las operaciones de los almacenes e inventarios es una oferta atractiva para varias compañías. Considerando las recomendaciones de Korpela y Tuominen (1996), este criterio describe si la ubicación sugerida pertenece a un proveedor o si la empresa decide comprar la propiedad y construir por su cuenta.

4.4.3 Vías de acceso

Ante la ocurrencia de un desastre natural, es importante considerar cuáles son las vías de comunicación que sirven al almacén. Se ha establecido la vía de comunicación más cercana e importante a la ubicación geográfica de cada una de las alternativas. Goble *et al.* (2002) indica que se debe considerar la diversificación de las vías de comunicación, con el fin de que no todos los sitios dependen del mismo tipo de transporte.

Tabla 4.4 Valoraciones para el criterio de vías de acceso

Valor	Vía de comunicación principal
-1	Marítima
-0.33	Terrestre
0.33	Férrea
1	Aérea

Tabla 4.4 Elaboración propia con base en información presentada por Goble *et al.* (2002).

4.4.4 Instituciones que brindan auxilio

Tabla 4.5 Valoraciones para el Criterio de Instituciones de Auxilio

Valor	Institución de auxilio
-1	Cuartel
-0.33	Estación de Policía
0.33	Estación de bomberos
1	Hospital

Tabla 4.5 Elaboración propia.



Este criterio es una propuesta propia de este trabajo de investigación. Se establece que, a pesar de que la localización diversa de almacenes aumentará la resiliencia en la cadena de suministro, es necesario tener en cuenta cuál es la institución de socorro a menor distancia del posible sitio de localización, con la idea de poder ser auxiliados por diferentes organizaciones. Por ejemplo, en el año 2017 diferentes desastres naturales afectaron diferentes regiones del país, la consideración de diferentes instituciones de auxilio evitará que se carezca de ayuda si en algún momento se satura el servicio de alguno de los organismos.

4.4.5 Capacidad del almacén

Se ha considerado que es necesario conocer si el almacén cuenta con capacidad extra para poder fungir como refugio o centro de acopio para la población afectada en los alrededores. Este criterio ha sido considerado de acuerdo con la gran importancia que representa que las organizaciones consideren su Responsabilidad Social, de manera que sea posible que brinden apoyo a las comunidades más cercanas ante este tipo de siniestros. Además, Miguel Llovera (2017) indicó la necesidad de esta propiedad durante los sismos ocurridos el 7 y el 19 de septiembre, debido a que la demanda de productos básicos incrementó al requerirse para atender a las personas afectadas por los siniestros.

Tabla 4.6 Valoraciones para el Criterio de Capacidad del Almacén

Valor	Capacidad del almacén
-1	No se cuenta con capacidad extra
1	Se cuenta con capacidad extra

Tabla 4.6 Elaboración propia basado en la información mostrada por Kim (2012) y Sheffi y Rice Jr. (2005).

Otro planteamiento que se puede trabajar dentro del problema de diversidad máxima es sólo considerar la vulnerabilidad hacia cada uno de los desastres naturales de cada uno de los sitios que se consideren en el problema de localización de almacenes. Esta propuesta se basa en el Sistema de Información Geográfico desarrollado por el CENAPRED descrito en el marco teórico. Como se ejemplificó en la Figura 2.9, a través de datos históricos, el CENAPRED determinó el nivel de vulnerabilidad de los municipios en una clasificación *Muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo*. Considerando esta estratificación, se considera un segundo modelo de diversidad máxima que asigne un valor a cada una de las clasificaciones, como se muestra en la Tabla 4.7.



Tabla 4.7 Valoraciones de la vulnerabilidad de los municipios hacia los desastres naturales

Valor	Capacidad del almacén
-1	Muy alto
-0.33	Alto
0	Medio
0.33	Bajo
1	Muy Bajo

Tabla 4.7 Elaboración propia basado en la información mostrada en el Sistema de Información Geográfica del Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Se reitera que el problema de diversidad máxima no prioriza ni jerarquiza los criterios considerados, sino simplemente trabaja sobre el paradigma que se requiere maximizar la diferencia entre los elementos. A pesar de que por sentido común, se favorecerían ubicaciones que tengan la menor vulnerabilidad posible frente a los desastres naturales, a partir de la información mostrada por Mota Palomino *et al.* (1992) se parte del supuesto en que todos los municipios cuentan con una valoración alta o muy alta en por lo menos uno de los desastres naturales, como se pudo verificar en la información del SIG del CENAPRED. Debido a este hecho, se considera que una localización que maneje la diferenciación de los niveles de vulnerabilidad de los sitios considerados obtendrá resultados que sugieren sitios dispersos y con la máxima diferencia en sus afectaciones por los desastres naturales, por lo que se asegura que los almacenes no sufran disrupciones en un mismo momento.

4.5 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN Y DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El caso de aplicación a resolver consiste en seleccionar la ubicación de 4 almacenes entre un conjunto de 32 alternativas que brinden la mayor diversidad.

Mediante la investigación de cada uno de los sitios propuestos se determinaron las características predominantes de acuerdo con cada uno de los criterios. Por ejemplo, en Tijuana el desastre natural que se presenta con mayor frecuencia es el sismo debido a que este sitio se ubica dentro de la falla de San Andrés por ello se le asigna el valor de -0.5 que representa Sismo. De acuerdo con el Parque Industrial Pacífico II, sitio considerado en el municipio de Tijuana, las instalaciones para localizar el almacén son rentadas por lo que un proveedor asegurará el servicio completo, así se le otorga un valor de -1 de acuerdo con el criterio Propiedad de la infraestructura. Respecto a las Vías de acceso, en Tijuana se consideró al transporte aéreo como



la principal vía de comunicación, esto a pesar de que cuenta con carreteras, sin embargo, la vía de conexión más importante es el Aeropuerto Internacional de Tijuana. Considerando la Institución más cercana que brinda auxilio se encontró que el 28 Batallón de Infantería es lo más próximo al Parque Industrial Pacífico II por lo que se determinó el valor -1 que corresponde a la opción Cuartel. Finalmente, de acuerdo con las características del almacén ofrecido por el proveedor, éste no cuenta con capacidad extra por lo que se califica con el valor de -1. Estas valoraciones se repitieron investigando las características de cada uno de los sitios considerador en el caso de aplicación. En la Tabla 4.8 se presentan las calificaciones obtenidas para cada locación con respecto a cada criterio. En las últimas cuatro columnas se registran si cuentan con vías de comunicación terrestres, marítimas, aéreas o férreas mediante un 1 si es que poseen esa característica o un -1 si no es así. También debe notarse que se resalta aquella vía de comunicación más cercana o más usada en cada parque industrial. En la Tabla 4.7 se muestra la tabla de datos definitiva considerada para solución del problema de máxima diversidad.



Tabla 4.8 Valoraciones de los criterios para cada sitio considerado en el problema de diversidad máxima

Número	Ubicación	Parque Industrial considerado	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
1	Aguascalientes, Aguascalientes	FINSA Aguascalientes	0.2	-1	-0.33	-0.33	1
2	Altamira, Tamaulipas	Administración Portuaria Integral de Altamira	1	1	-1	0.33	-1
3	Cancún, Quintana Roo	Cancun Logistics Park	0.6	1	1	-0.33	-1
4	Chihuahua, Chihuahua	FINSA El Saucito	-0.2	1	0.33	0.33	-1
5	Azcapotzalco, Ciudad de México	Vallejo	1	1	-0.33	1	-1
6	Ciudad Juárez, Chihuahua	Parque Industrial Aero Juárez	-0.2	1	1	1	-1
7	Ciudad Victoria, Tamaulipas	Tecnotam, Sección I y II	0.2	-1	0.33	1	-1
8	Coatzacoalcos	-	1	-1	-1	1	-1
9	El Salto, Jalisco	Prologis Park Arbolada	-0.6	1	-0.33	-0.33	-1
10	Guadalajara, Jalisco	Guadalajara Technology Park	1	-1	-0.33	-0.33	-1
11	Guaymas, Sonora	Industria Pesquera Heras	0.2	-1	-1	-1	-1
12	Hermosillo, Sonora	Vie Verte BuSiness Center Hermosillo	-1	-1	0.33	-0.33	1
13	Irapuato, Guanajuato	Parque Tecnoindustrial Castro del Río	1	-1	-0.33	-0.33	-1
14	Lázaro Cárdenas, Michoacán	Parque Industrial Lázaro Cárdenas	0.6	1	-1	0.33	-1
15	León, Guanajuato	Parque Industrial León-Bajío	-1	-1	-0.33	0.33	-1
16	Manzanillo, Colima	Fondeport	0.6	-1	-1	-1	-1
17	Mexicali, Baja California	Centinel Industrial Park	0.2	-1	1	1	1
18	Monterrey, Nuevo León	Interpuerto Monterrey	0.2	1	1	0.33	1
19	Nogales, Sonora	Zona Industrial	-0.2	-1	0.33	1	1

20	Nuevo Laredo, Tamaulipas	Pyme Technologis	-1	1	0.33	1	1
21	Pachuca, Hidalgo	Industrial La Paz	0.2	-1	-0.33	0.33	-1
22	Progreso, Yucatán	Yucatán Industrial Park	0.6	1	-1	-0.33	-1
23	Puebla, Puebla	Parque Industrial Puebla 2000	0.2	1	-0.33	0.33	1
24	Querétaro, Querétaro	Parque Industrial Querétaro	0.2	-1	-0.33	1	-1
25	Ramos Arizpe, Coahuila	Parque Industrial Amistad Ramos Arizpe	0.2	-1	0.33	0.33	1
26	San Luis Potosí, San Luis Potosí	Parque Industrial Millenium	0.2	-1	0.33	1	1
27	Tampico, Tamaulipas	Zona Industrial Miramar	1	1	0.33	-0.33	1
28	Tijuana, Baja California	Prologis Pacifico Park	0.2	-1	1	-1	-1
29	Toluca, Estado de México	O'Donnell Logistics Center Toluca	-0.2	1	1	0.33	1
30	Topolobampo, Sonora	Administración Portuaria Integral de Topolobampo	1	1	-1	0.33	-1
31	Torreón, Coahuila	Parque Industrial Las Américas	1	1	1	-1	1
32	Zacatecas, Zacatecas	Parque Industrial Guadalupe	1	1	-0.33	-1	1

Tabla 4.8 Elaboración propia basado en la información encontrada de las páginas de internet del Centro Nacional de Prevención de Desastres y el Mapa de Parques industriales en México de ProMéxico.



Por otro lado, en la Tabla 4.9 se muestran los índices de resiliencia de cada uno de los sitios posibles considerados en el ejemplo de aplicación, recordando que esta métrica se utilizará para evaluar si mediante la localización de los almacenes mejora la resiliencia.

Tabla 4.9 Índice de resiliencia de los sitios considerados en el ejemplo de aplicación

Ubicación	Índice de Resiliencia	Ubicación	Índice de Resiliencia
Aguascalientes	82.32362625	Mexicali	86.00464354
Altamira	75.18649627	Monterrey	68.39026856
Cancún	78.63206372	Nogales	87.09207634
Chihuahua	83.07361126	Nuevo Laredo	80.01839963
Ciudad de México	97.89822385	Pachuca	83.86923171
Ciudad Juárez	80.54693452	Progreso	76.26502015
Ciudad Victoria	82.3741707	Puebla	68.81662367
Coahuila	77.18191091	Querétaro	81.29528319
El Salto	78.0042581	Ramos Arizpe	84.65103425
Guadalajara	63.32873343	San Luis Potosí	81.05183351
Guaymas	84.85721195	Tampico	84.55503617
Hermosillo	86.40845365	Tijuana	77.95662269
Irapuato	82.13472094	Toluca	75.64648707
Lázaro Cárdenas	74.33778597	Topolobampo	82.47398688
León	70.92530877	Torreón	85.65119607
Manzanillo	82.01690512	Zacatecas	87.95860446

Tabla 4.9 Fuente: Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos.

Tomando en cuenta el segundo planteamiento del modelo de diversidad máxima, donde sólo se considere la vulnerabilidad de los sitios considerados hacia cada uno de los desastres naturales, en la Tabla 4.10 se muestran los datos recolectados del Sistema de Información Geográfica del CENAPRED.

Tabla 4.10 Niveles de vulnerabilidad de los sitios considerados hacia cada uno de los desastres naturales

Ubicación	Inundaciones	Sequías	Tormentas eléctricas	Granizo	Ondas Cálidas	Ciclones Tropicales	Bajas Temperaturas	Nevadas	Sismos	Laderas
Aguascalientes	0	0	0.33	0.33	0.33	1	0.33	1	0	-1
Altamira	-1	-0.33	-0.33	1	0	0	0.33	1	0.33	-1
Cancún	-0.33	-0.33	0.33	1	0	-1	1	1	0.33	0
Chihuahua	-0.33	0	0.33	0	0	1	-1	-0.33	0	-1
Ciudad de México	-1	0.33	-0.33	-0.33	1	1	0	1	-0.33	-0.33
Ciudad Juárez	-0.33	-0.33	0.33	0	0	1	-1	-1	0	-1
Ciudad Victoria	-0.33	0	-0.33	0.33	0	0	0.33	0.33	0.33	-1
Coatzacoalcos	-1	0.33	0	0.33	0	1	1	1	-0.33	-1
El Salto	-1	0	-0.33	-0.33	0.33	1	0.33	1	-0.33	-0.33
Guadalajara	-1	0.33	-1	0	0.33	1	0.33	0.33	-0.33	-1
Guaymas	0	-0.33	0.33	0	-0.33	0	0.33	1	-0.33	-1
Hermosillo	0	-0.33	0.33	0	-1	0	0.33	0.33	-0.33	-1
Irapuato	-1	-0.33	-1	0	0.33	1	0.33	1	0	-1
Lázaro Cárdenas	-0.33	-0.33	0.33	0.33	-0.33	-1	1	1	-1	-1
León	-0.33	-1	-1	0	0.33	1	0.33	0.33	0	-1
Manzanillo	-1	0	0.33	0.33	0	-1	1	1	-1	-1
Mexicali	-1	-0.33	1	0.33	0	0.33	-0.33	0	-1	-1
Monterrey	0	-0.33	0	0.33	0	1	0.33	0.33	0.33	-1
Nogales	1	-0.33	0.33	0.33	-0.33	1	-1	0	0	-1
Nuevo Laredo	-0.33	-0.33	0	0.33	0	0.33	0.33	0.33	0.33	-1
Pachuca	0	0	-0.33	0.33	1	1	0	0.33	0	-1
Progreso	1	0	0.33	1	-0.33	-0.33	1	1	0.33	0
Puebla	-0.33	0.33	-0.33	-0.33	1	1	0	1	-0.33	-1
Querétaro	-0.33	0	-0.33	0	0.33	1	0.33	0	0	-1
Ramos Arizpe	1	-0.33	0.33	0.33	0	1	0	0.33	0.33	-1
San Luis Potosí	-0.33	-0.33	-0.33	0.33	0.33	1	0	0.33	0.33	-1
Tampico	-1	-0.33	-0.33	1	0	0	0.33	1	0.33	-1
Tijuana	0	-0.33	1	0.33	1	1	0.33	-0.33	-0.33	-1
Toluca	0	0.33	-1	-1	0.33	1	-0.33	-1	-0.33	-1
Topolobampo	-1	-0.33	0.33	0.33	-0.33	-0.33	0.33	1	-0.33	-1
Torreón	0.33	-0.33	0.33	0.33	0	1	0	0	0.33	-1
Zacatecas	0.33	-0.33	0.33	0.33	0.33	1	0.33	0	0.33	-1

Tabla 4.10 Elaboración propia basado en la información proporcionada por el Sistema de Información Geográfica del Centro Nacional de Prevención de Desastres.

4.6 FORMULACIÓN DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA

Como se expuso en el capítulo anterior, el problema de diversidad máxima consiste en seleccionar un subconjunto de elementos a partir de un conjunto dado de tal manera que una medida de la diversidad o la dispersión presente en el subconjunto seleccionado sea maximizada. Para medir la diversidad existente en un conjunto denominado M , $div(M)$, es necesario primero declarar cuáles son las variables de decisión para poder definir la relación d_{ij} que describe la disimilitud entre cada pareja de alternativas i, j del conjunto dado.

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} y_{ij} \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_i = m; \quad (4)$$

$$y_{ij} \geq x_i + x_j - 1; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (7)$$

$$y_{ij} \leq x_i; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (8)$$

$$y_{ij} \leq x_j; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (9)$$

$$x_i, y_{ij} \in \{0, 1\}; \quad 1 \leq i < j \leq n \quad (10)$$

4.6.1 Las variables de decisión

Sea $S = \{s_i: i \in N\}$ el conjunto de sitios considerados para localizar un almacén, donde $N = \{\text{Tijuana, Mexicali, } \dots, \text{Progreso}\}$ es el conjunto de subíndices que denota la ubicación y cada elemento s_i pueda ser representado como un vector $s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ir})$. Sea d_{ij} la distancia entre los elementos s_i y s_j , y $m < n$ el tamaño deseado para el conjunto diverso; el problema consiste en seleccionar m elementos en S con el fin de maximizar la suma de las distancias entre los elementos seleccionados.

$$x_i: \begin{cases} 1 & \text{si se localiza el almacén } i \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}; \quad i = Tijuana, Mexicali, \dots, Progreso$$

y la variable auxiliar

$$y_{ij}: \begin{cases} 1 & \text{si se localiza el almacén } i \text{ y el almacén } j \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}; \\ i = Tijuana, Mexicali, \dots, Progreso, \quad j = Tijuana, Mexicali, \dots, Progreso$$

La declaración de las variables permite diferenciar que la formulación del problema de diversidad máxima que se está empleando corresponde al modelo lineal, tal como lo sugieren Glover, Kuo y Dhir (1998). Debido a la limitación del programa de solución, LINGO, sólo se pueden procesar hasta 800 variables enteras en la versión utilizada del *software*.

4.6.2 Parámetros

Esta formulación sólo requiere de un parámetro, las distancias (diferencias) entre cada par de elementos. Como se mencionó en el capítulo anterior, dentro de la explicación de los modelos a emplear en esta formulación, se sigue la propuesta de Sandoya Sánchez (2013) de determinar las disimilitudes entre cada par de alternativas mediante la distancia euclidiana. Debe tenerse en cuenta que cada alternativa puede representarse mediante un conjunto de atributos (datos o características), x_{ik} , como la alternativa i con el tributo k -ésimo; con esto se puede establecer la comparación entre alternativas mediante la distancia $d(x_i, x_j)$ representada por d_{ij} , finalmente se podrá calcular la medida de disimilitud del coseno.

Dados dos individuos i, j con características o atributos $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$, $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp})$, la medida de similitud del coseno es definida por:

$$d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p x_{ik}x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p x_{ik}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^p x_{jk}^2}} \quad (2)$$

El coseno del ángulo formado por el vector de características del elemento i y el vector de características del elemento j está representado por d_{ij} , así que éste podrá adquirir valores del intervalo $[-1,1]$. En cuanto a la medida de similitud, debe recordarse que la diversidad



corresponde a identificar la disimilitud, concepto opuesto a la similitud; por lo que para mantener el problema de “máxima” diversidad, se recurrirá a un cambio de signo en la medida de la distancia, $d'_{ij} = -d_{ij}$. Es por esto por lo que se establecerá, de ahora en adelante, d_{ij} para referirnos a $-d_{ij}$. Para ejemplificar la obtención de las distancias, se presenta el cálculo de la disimilitud entre Tijuana y Mexicali.

Tabla 4.11 Valoraciones de los criterios para Tijuana y Mexicali considerado en el problema de diversidad máxima para mostrar la obtención de las disimilitudes

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
Mexicali	-0.6	-1	1	1	1
Tijuana	0.2	-1	1	-1	-1

Tabla 4.11 Fuente: Elaboración propia.

Recordando que k denota el número de atributos considerados, en el ejemplo del caso de aplicación se consideran 5 criterios resilientes.

$$d_{Mexicali,Tijuana} = - \frac{\sum_{k=1}^5 x_{Mexicali,k} x_{Tijuana,k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^5 x_{Mexicali,k}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^5 x_{Tijuana,k}^2}}$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 4.11 correspondientes a los atributos de cada alternativa, tenemos:

$$\begin{aligned} d_{Mexicali,Tijuana} &= \\ &= - \frac{(-0.6)(0.2) + (-1)(-1) + (1)(1) + (1)(-1) + (1)(-1)}{\sqrt{(-0.6)^2 + (-1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2} \sqrt{(0.2)^2 + (-1)^2 + (1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2}} \\ &= - \frac{-0.12 + 1 + 1 - 1 - 1}{\sqrt{0.36 + 1 + 1 + 1 + 1} \sqrt{0.04 + 1 + 1 + 1 + 1}} = - \frac{-0.12}{\sqrt{4.36} \sqrt{4.04}} \\ &= - \frac{-0.12}{4.196951274} = 0.02859218327 \end{aligned}$$



Ahora, para ejemplificar la obtención de las distancias en el segundo planteamiento del modelo de diversidad máxima, se presenta el cálculo de la disimilitud entre Tijuana y Mexicali.

Tabla 4.12 Valoraciones de los criterios para Tijuana y Mexicali considerado en el problema de diversidad máxima para mostrar la obtención de las disimilitudes

Ubicación	Inundaciones	Sequías	Tormentas eléctricas	Granizo	Ondas Cálidas	Ciclones Tropicales	Bajas Temperaturas	Nevadas	Sismos	Laderas
Mexicali	-1	-0.33	1	0.33	0	0.33	-0.33	0	-1	-1
Tijuana	0	-0.33	1	0.33	1	1	0.33	-0.33	-0.33	-1

Tabla 4.12 Elaboración propia.

Recordando que k denota el número de atributos considerados, en el ejemplo del segundo caso de aplicación se consideran 10 criterios resilientes.

$$d_{Mexicali,Tijuana} = - \frac{\sum_{k=1}^{10} x_{Mexicali,k} x_{Tijuana,k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{10} x_{Mexicali,k}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^{10} x_{Tijuana,k}^2}}$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 4.12 correspondientes a los atributos de cada alternativa, tenemos:

$$\begin{aligned}
 d_{Mexicali,Tijuana} &= \\
 &= - \frac{(-1)(0) + (-0.33)(-0.33) + (1)(1) + (0.33)(0.33) + (0)(1) + (0.33)(1) + (-0.33)(0.33) + (0)(-0.33) + (-1)(-0.33) + (-1)(-1)}{\sqrt{(-1)^2 + (-0.33)^2 + (1)^2 + (0.33)^2 + (0)^2 + (0.33)^2 + (-0.33)^2 + (0)^2 + (-1)^2 + (-1)^2} \sqrt{(0)^2 + (-0.33)^2 + (1)^2 + (0.33)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (0.33)^2 + (-0.33)^2 + (-0.33)^2 + (-1)^2}} \\
 &= - \frac{0 + 0.1089 + 1 + 0.1089 + 0 + 0.33 - 0.1089 + 0 + 0.33 + 1}{\sqrt{1 + 0.1089 + 1 + 0.1089 + 0 + 0.1089 + 0.1089 + 0 + 1 + 1} \sqrt{0 + 0.1089 + 1 + 0.1089 + 1 + 1 + 0.1089 + 0.1089 + 0.1089 + 1}} = \\
 &= - \frac{2.7689}{\sqrt{4.4356} \sqrt{4.5445}} = - \frac{2.7689}{4.489719835} = -0.6167199963
 \end{aligned}$$

Este cálculo también fue realizado para cada par de alternativas, dando un total de 496 valores, tomando en cuenta que la matriz de distancias es simétrica. Los valores se podrán observar en el Anexo 2 debido a su extensión.



4.6.3 Función objetivo

Con las variables de decisión declaradas y los parámetros calculados, a continuación, se presenta la función objetivo del problema de diversidad máxima.

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} y_{ij} \quad (6)$$

El objetivo de la propuesta de este trabajo de investigación es maximizar la diferencia de características que posee cada alternativa, considerando que la diferencia o diversidad aumentan la resiliencia de los almacenes. Como se ha explicado anteriormente, los determinantes de la resiliencia de la cadena de suministro expuestos por Craighead *et al.* (2007) en conjunto con las recomendaciones revisadas en Kim (2012); Korpela y Tuominen (1996) y Sheffi y Rice Jr. (2005), son la base teórica y práctica que sustentan la validez de la formulación.

4.6.4 Restricciones

Las restricciones consideradas en la formulación lineal del problema de diversidad máxima se presentan a continuación.

1) Número de almacenes requeridos.

$$\sum_{i=1}^n x_i = m; \quad (4)$$

La primera restricción forzará a que se cumplan con el número de almacenes que se requieran. La suma representa la consideración de todas las alternativas, recordando que x_i es una variable binaria - es decir que sólo tendrán asignados valores 0 ó 1 – por tanto, el número de variables binarias con valor igual a 1 será equivalente al número de almacenes requeridos.

2) Restricciones lógicas. Las siguientes tres restricciones condicionan a que la variable auxiliar y_{ij} sólo se active cuando se seleccionan las ciudades correspondientes.



Por ejemplo, en la primera restricción la variable auxiliar y_{ij} se activará sólo cuando las ciudades específicas i y j sean seleccionadas.

$$y_{ij} \geq x_i + x_j - 1; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (7)$$

Esto se puede ejemplificar suponiendo que las ciudades Tijuana y Mexicali forman parte de la solución óptima. Con esto, las variables de decisión correspondientes deben asumir valores igual a 1 ($x_{Tijuana} = 1$ y $x_{Mexicali} = 1$), para lo cual se tiene la restricción lógica:

$$y_{ij} \geq 1 + 1 - 1$$

$$y_{ij} \geq 1$$

Resolviendo la desigualdad y_{ij} sólo puede asumir valores mayores o iguales a 1 y, al ser una variable binaria, la única condición que satisface la desigualdad se presenta cuando y_{ij} también asume el valor de 1.

Ahora, se parte de la combinación de las ciudades Tijuana y Nuevo Laredo. En este ejemplo, aún se asume que la ciudad de Tijuana forma parte de la solución óptima, pero la ciudad de Nuevo Laredo no. Con esto en mente, se establece que $x_{Tijuana} = 1$ y $x_{Nuevo Laredo} = 0$. Sustituyendo los valores en la primera restricción lógica, tenemos:

$$y_{ij} \geq 1 + 0 - 1$$

$$y_{ij} \geq 0$$

En este ejemplo, a pesar de que se conoce que la ciudad de Tijuana se encuentra en la solución óptima, la restricción lógica no establece esta certeza. Debido a que el resultado de la desigualdad es $y_{ij} \geq 0$, la variable auxiliar puede tomar tanto el valor de 0 como el valor de 1 - ambos valores satisfacen la desigualdad - por lo que la restricción por sí sola no indica que la ciudad Tijuana forma parte de la solución óptima. Por esto, es necesario desarrollar un par de restricciones más que indiquen la certeza de que una ciudad forma parte de la solución óptima, las cuales se presentan a continuación:

$$y_{ij} \leq x_i; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (8)$$

$$y_{ij} \leq x_j; \quad 1 \leq i < j \leq n; \quad (9)$$



Para demostrar la importancia de estas restricciones, se retoma el ejemplo de las ciudades de Tijuana y Nuevo Laredo, donde sólo la primera forma parte de la solución, siendo $x_i = x_{Tijuana} = 1$ y $x_j = x_{Nuevo Laredo} = 0$.

En el caso de $x_{Tijuana} = 1$

$$y_{ij} \leq x_i$$

$$y_{ij} \leq 1$$

En el caso de $x_{Nuevo Laredo} = 0$

$$y_{ij} \leq x_j$$

$$y_{ij} \leq 0$$

Las tres restricciones lógicas en conjunto representan la acotación de la región factible de este problema.

3) Restricción de integralidad. Finalmente, la última restricción establece la integralidad que deben seguir las variables de decisión. En este caso, ambas variables deben de asumir valores binarios:

$$x_i, y_{ij} \in \{0, 1\}; 1 \leq i < j \leq n \quad (10)$$

4.7 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO EN LINGO PARA OBTENER SOLUCIONES

Una vez que se cuenta con la formulación del modelo desarrollada y explicada, debido a la dimensión del problema es necesario resolver éste mediante el algoritmo de *Branch and Bound* con la ayuda de un *software* especializado. Como se expuso en el capítulo anterior, uno de los programas de computadora más utilizados en problemas de programación entera es LINGO. En esta sección, se explicará la traducción del modelo matemático de diversidad máxima al lenguaje de modelación de LINGO.



El primer paso para construir un modelo matemático dentro de la interfaz de LINGO es especificar el inicio del mismo por lo que se debe ingresar el comando “**MODEL:**”.

LINGO permite generar reportes acerca de los resultados del modelo, por esto, se puede insertar el título del mismo, de modo que se pueda identificar fácilmente. LINGO trabaja con instrucciones y comandos en inglés, por lo que se requiere ingresar el comando **TITLE**, seguido del texto que describe el trabajo y finalizando con punto y coma, como se muestra a continuación:

```
TITLE LOCALIZACIÓN DE ALMACENES MEDIANTE EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA  
PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO;
```

El lenguaje de modelación de LINGO facilita la construcción de la formulación mediante secciones separadas, con el fin de identificar cada una de las partes del modelo y así permitir su manipulación de una manera más sencilla. Es por esto, que el siguiente paso en el desarrollo del modelo es la declaración de los “objetos” que definen al modelo. La agrupación de estos objetos se conoce como **SETS** (conjuntos en inglés), los cuales serán utilizados en el desarrollo de funciones en forma de bucle para evitar la declaración de cada una de las restricciones.

En este trabajo de investigación, los objetos que se encuentran bajo estudio son los sitios posibles donde se puede localizar un almacén, así como la relación de diversidad que existe entre ellos; por esto, la sección de **SETS** se establece de la siguiente manera:

1) Se declara el inicio de la sección de objeto **SETS**.

2) Se determina los grupos de objetos relacionados en el modelo. En este caso, el primer grupo de objetos son las ciudades consideradas para localizar los almacenes. Cabe destacar que LINGO requiere de una sintaxis específica para identificar cada grupo de elementos, las cuales siguen la siguiente estructura:

el_nombre_del_conjunto [/ la_lista_de_miembros /] [: la_lista_de_atributos];

El primer conjunto de elementos que se consideran en el modelo matemático queda de la siguiente manera:



```

Ciudades / Aguascalientes
    Altamira
    Cancun
    Chihuahua
    Ciudad_de_Mexico
    Ciudad_Juarez
    Ciudad_Victoria
    Coahuila
    Coatzacoalcos
    El_Salto
    Guadalajara
    Guaymas
    Hermosillo
    Irapuato
    Lazaro_Cardenas
    Leon
    Manzanillo
    Mexicali
    Monterrey
    Nogales
    Nuevo_Laredo
    Pachuca
    Progreso
    Puebla
    Queretaro
    Ramos_Arizpe
    San_Luis_Potosi
    Tampico
    Tijuana
    Toluca
    Topolobampo
    Torreon
    Zacatecas

/: x;

```

El segundo conjunto de elementos que se debe de considerar representa al conjunto de relaciones pareadas entre las ciudades:

```

Combinaciones(Ciudades,Ciudades)|&2 #GT# &1: Distancia_i_j, y_i_j;

```

El conjunto se denota por **Combinaciones**. Este conjunto posee la característica de poder emparentar dos diferentes grupos de elementos, sin embargo, en este caso las combinaciones resultan de la comparación entre las mismas ciudades. Posterior al establecimiento del conjunto **Combinaciones** se puede notar que entre paréntesis se encuentra el conjunto **Ciudades** declarado en dos ocasiones; esto permitirá definir la variable auxiliar y_{ij} . Además, dentro de la declaración del conjunto, se agrega el operador lógico **|&2 #GT# &1** que permite establecer que los subíndices i y j no pueden representar el mismo elemento al momento de hacer la comparación. El operador lógico **|&2 #GT# &1** puede leerse como “tal que (1) el subíndice 2 (**&2**) es mayor que (**#GT#** el cual significa *greater than*) que el subíndice 1 (**&1**)”.



Los atributos del conjunto **Combinaciones** están representados por la variable auxiliar y_{ij} y por los parámetros d_{ij} que definen la relación entre cada par de ciudades. Con el fin de facilitar la identificación de cada componente del modelo, **Distancia_i_j** representa los parámetros d_{ij} y **y_i_j** representa la variable auxiliar y_{ij} .

3) De acuerdo con el modelo propuesto de diversidad máxima, no se requieren más conjuntos, por lo que se debe expresar el fin de la sección mediante **ENDSETS**.

La siguiente sección que se debe construir dentro del lenguaje de modelación de LINGO son los datos. La estructura con la que trabaja el *software* permite aislar los datos del modelo, esto permite un mejor control, de modo que se pueden modificar sin intervenir en otras secciones del modelo. Al igual que la sección de conjuntos, la sección de datos requiere que se exponga el inicio del mismo con el comando **DATA**.

Otra de las ventajas que proporciona LINGO es la importación de datos desde otros programas, es decir, LINGO reconoce archivos de Excel, bases de datos y archivos de texto, lo que permite el manejo de los datos sin la preocupación de la compatibilidad de los formatos. En este caso, los datos que se muestran en el Anexo 1 han sido trabajados en una hoja de cálculo de Excel.

Los datos requeridos en la formulación del modelo de diversidad máxima consisten en las distancias (diferencias) obtenidas de los cálculos de las medidas de similitud del coseno. Para poder importar datos debe relacionarse el atributo correspondiente, en este caso **Distancia_i_j**, con el archivo requerido. El comando queda de la siguiente forma:

```
Distancia_i_j =  
@OLE('C:\Users\Alan Monterrubio Gil\Desktop\Tesis\Database.xlsx');
```

El comando **@OLE** permite la importación de los datos especificando la ubicación del archivo requerido dentro del ordenador; sin embargo, el conjunto de datos requeridos debe contar con la misma identificación que con la que se está llamando en LINGO. La Figura 4.3 permite observar esta condición.

Como se puede notar en la Figura 4.3, tanto el atributo declarado en LINGO como en el cuadro de nombres en la hoja de cálculo de Excel se ha denominado con el mismo nombre a los datos que se requieren en el modelo. Otra condición que se debe cumplir es que el número de datos importados debe coincidir con el número de parámetros solicitados por LINGO.



Figura 4.3 Condición de exportación de datos en hojas de cálculo hacia el *software* LINGO

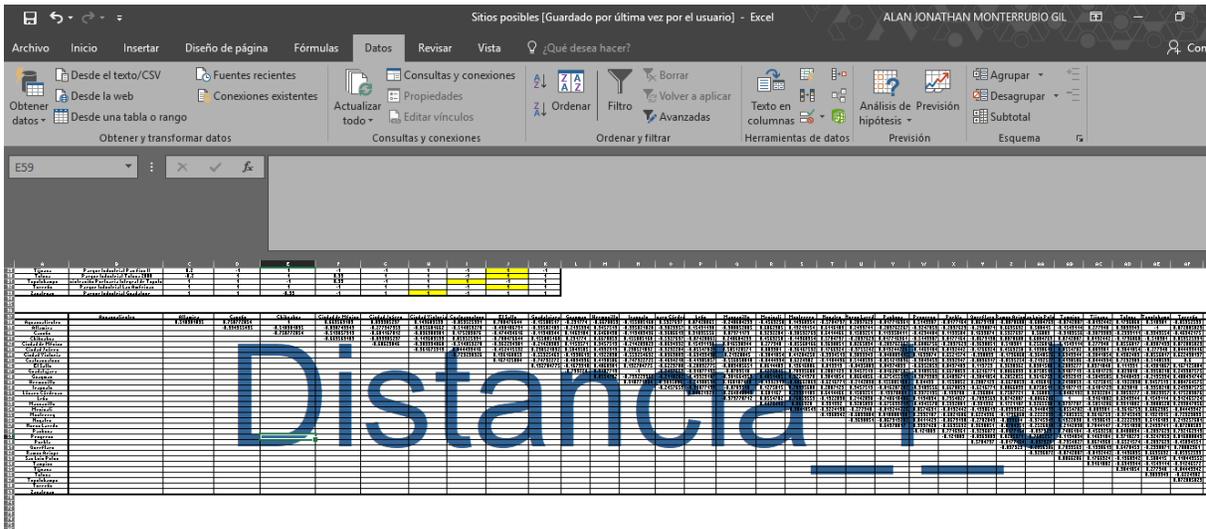


Figura 4.3 Elaboración propia.

En la sección de datos también se incluye el número de almacenes requeridos en el problema de diversidad máxima, representado por $m = 4$.

Así como en la sección de conjuntos, después de establecer todos los datos requeridos, se requiere expresar el final de la sección de datos, mediante `ENDDATA`. Una vez que se tienen establecidos las variables de decisión y los parámetros del modelo, mediante las secciones `SETS` y `DATA`, el siguiente paso es construir la función objetivo y las restricciones de acuerdo con la información incorporada.

LINGO permite diferenciar las líneas de los comandos escribiendo entre corchetes el nombre que se considere pertinente para describir la función, como se muestra a continuación:

```
[Funcion_Objetivo]
MAX = @SUM(Combinaciones(i,j): Distancia_i_j(i,j) * y_i_j(i,j));
```

Para explicar la equivalencia de la notación matemática presentada en el subtema anterior con la sintaxis de LINGO, se muestra la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Comparación entre la notación matemática y la sintaxis de LINGO en la expresión de la función objetivo

Notación matemática	Sintaxis de LINGO
Maximizar	MAX =
$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n$	@SUM(Combinaciones(i,j) :
d_{ij}	Distancia_i_j(i,j)
×	*
y_{ij}	y_i_j(i,j)

Tabla 4.13 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).

La primera restricción del modelo de diversidad máxima consiste en la delimitación del número de almacenes que se requieren, $\sum_{i=1}^n x_i = m$, la cual se expresa de la siguiente forma en LINGO:

```
[Restriccion_Almacenes_Requeridos]
@SUM(Ciudades:x) = m;
```

Las restricciones lógicas requieren de un comando que permita crear bucles, es decir, que mediante una instrucción se puedan generar varias restricciones con la misma estructura, pero variando los subíndices de cada una de las combinaciones. Para explicar la sintaxis de LINGO de cada una de las restricciones lógicas, se muestran las Tablas 4.14, 4.15 y 4.16.

```
@FOR(Combinaciones(i,j) :
    [Restriccion_Bicondicional]
    x(i) + x(j) - y_i_j <= 1);
```



Tabla 4.14 Comparación entre la notación matemática y la sintaxis de LINGO en la expresión de la primera restricción lógica

Notación matemática	Sintaxis de LINGO
$\forall i, j \mid 1 \leq i < j \leq n$	@FOR (Combinaciones (i, j) :
x_i	x (i)
+	+
x_j	x (j)
-	-
y_{ij}	y_i_j
\leq	<=
1	1

Tabla 4.14 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).

Para la segunda restricción lógica se tiene:

```
@FOR (Combinaciones (i, j) :
    [Restriccion_Ciudad_i]
    -x (i) + y_i_j <= 0);
```

Tabla 4.15 Comparación entre la notación matemática y la sintaxis de LINGO en la expresión de la segunda restricción lógica

Notación matemática	Sintaxis de LINGO
$\forall i, j \mid 1 \leq i < j \leq n$	@FOR (Combinaciones (i, j) :
$-x_i$	-x (i)
+	+
y_{ij}	y_i_j
\leq	<=
0	0

Tabla 4.15 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).

Para la última restricción lógica se tiene:



```
@FOR (Combinaciones (i, j) :
  [Restriccion_Ciudad_j]
    -x(j) + y_i_j <= 0);
```

Tabla 4.16 Comparación entre la notación matemática y la sintaxis de LINGO en la expresión de la tercera restricción lógica

Notación matemática	Sintaxis de LINGO
$\forall i, j \mid 1 \leq i < j \leq n$	@FOR (Combinaciones (i, j) :
$-x_j$	$-x(j)$
+	+
y_{ij}	y_i_j
\leq	$<=$
0	0

Tabla 4.16 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).

Finalmente, sólo resta establecer las restricciones de integralidad. En la restricción concerniente a la variable auxiliar, a pesar de que el modelo indica que es un variable binaria, debido a la capacidad de la versión de LINGO, se reformuló a una restricción de no negatividad. La restricción queda de la siguiente forma:

```
@FOR (Combinaciones (i, j) :
  [Restriccion_no_negatividad]
    y_i_j >= 0);
```

Tabla 4.17 Comparación entre la notación matemática y la sintaxis de LINGO en la expresión de la restricción de integralidad de las variables auxiliares

Notación matemática	Sintaxis de LINGO
$\forall i, j \mid 1 \leq i < j \leq n$	@FOR (Combinaciones (i, j) i #NE# j :
y_{ij}	y_i_j
\geq	$>=$
0	0

Tabla 4.17 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).



La restricción de integralidad binaria con respecto a la variable de decisión x_i queda de la siguiente manera:

```
@FOR (Ciudades :
    [Restriccion_variable_binaria]
    @BIN ( (x) ) );
```

Tabla 4.18 Comparación entre la notación matemática y la sintaxis de LINGO en la expresión de la restricción de integralidad binaria para los sitios considerados

Notación matemática	Sintaxis de LINGO
$\forall i 1 \leq i \leq n$	@FOR (Ciudades :
$x_i = \{0,1\}$	@BIN ((x))

Tabla 4.18 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).

Para que LINGO identifique que la formulación del modelo ha finalizado solo se requiere ingresar el comando **END**.

En esta sección se detalló la traducción del modelo matemático hacia el lenguaje de modelación de LINGO, debido a esto se presentó la explicación de cada elemento. Si se requiere revisar la formulación completa en LINGO, se podrá encontrar en el Anexo 3 de este trabajo.

Se debe destacar que el modelo utilizado para segundo planteamiento, donde sólo se consideran las vulnerabilidades de los municipios hacia los desastres naturales, sólo varía en la medida de la distancia considerada. El código completo del segundo planteamiento se presenta en el Anexo 4.

Con el modelo ya construido en un *software* especializado, se requiere realizar pruebas que puedan comprobar si su funcionamiento es correcto y coherente con la formulación establecida, además de cerciorarse de que el modelo programado es válido de acuerdo con el objetivo de la investigación. La obtención de resultados y el desarrollo de escenarios proporcionan estas respuestas, las cuales se exponen en el último capítulo de este trabajo.



CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN DEL MODELO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En este último capítulo se presentan los resultados obtenidos de la formulación propuesta para resolver el problema de localización de almacenes que aumente la resiliencia en la cadena de suministro, así como la construcción de experimentos que proporcionen robustez al modelo desarrollado.

5.2 VALIDACIÓN LÓGICA DEL MODELO PROGRAMADO

Como se mencionó anteriormente en la metodología de investigación de este trabajo, mostrada en el capítulo 3, la validación lógica (también se puede entender como verificación del modelo) consiste en comprobar si el modelo programado cuenta con fallas, identificando a través de pruebas en el modelo si los resultados arrojados concuerdan con las expectativas. Este tipo de validación también abarca la comprobación desde la formulación matemática, es decir, desde la construcción del modelo antes de ingresarlo en un *software* especializado.

Comenzando por la formulación matemática, se puede observar que el modelo de diversidad máxima cuenta con una estructura sencilla, fácil de entender y, por lo tanto, su verificación no representó un desafío.

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} y_{ij} \quad (6)$$

En primera instancia, la función objetivo mostrada en la ecuación (6) requiere el cálculo de las “diferencias” que existen entre cada par de ubicaciones posibles para localizar un almacén. Las “distancias” representan el primer componente que requiere de una verificación para poder asegurar que se han calculado de manera correcta, sobre todo vigilando que los signos de cada cantidad se respeten. Las distancias fueron calculadas mediante *Microsoft Excel*, sin embargo, para cerciorarse que las fórmulas utilizadas corresponden con la ecuación (6), se realizaron las comprobaciones manualmente. Para ejemplificar este paso, a continuación, se presenta el cálculo de la diferencia entre Coatzacoalcos y Manzanillo. De acuerdo con el Anexo 1, la



distancia entre estas ciudades es $d_{Coatzacoalcos,Manzanillo} = -0.556858818$. Recordando la medida de disimilitud mostrada en el capítulo 3, ecuación (2), la diferencia entre dos elementos se define como:

$$d_{ij} = -\frac{\sum_{k=1}^p x_{ik}x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p x_{ik}^2}\sqrt{\sum_{k=1}^p x_{jk}^2}} \quad (2)$$

Extrayendo la información acerca de las características de Coatzacoalcos y Manzanillo de la Tabla 4.6, se tiene la siguiente comparación mostrada en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1 Valoraciones de los criterios para Coatzacoalcos y Manzanillo considerados en el problema de diversidad máxima para mostrar la obtención de las disimilitudes

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
Coatzacoalcos	1	-1	-1	1	-1
Manzanillo	0.6	-1	-1	-1	-1

Tabla 5.1 Elaboración propia.

A continuación, se muestra la verificación del cálculo obtenido de la matriz desarrollada:

$$\begin{aligned}
 & d_{Coatzacoalcos,Manzanillo} = \\
 & -\frac{(1)(0.6) + (-1)(-1) + (-1)(-1) + (1)(-1) + (-1)(-1)}{\sqrt{(1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2 + (1)^2 + (-1)^2}\sqrt{(0.6)^2 + (-1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2}} \\
 & = -\frac{0.6 + 1 + 1 - 1 + 1}{\sqrt{1 + 1 + 1 + 1 + 1}\sqrt{0.36 + 1 + 1 + 1 + 1}} = -\frac{2.6}{\sqrt{5}\sqrt{4.36}} = -\frac{2.6}{4.669047012} = -0.5568588179
 \end{aligned}$$

Como se puede notar, las distancias coinciden.

De la misma manera, se realiza este proceso de verificación con las “distancias” consideradas en el segundo planteamiento del modelo de diversidad máxima, la vulnerabilidad de los sitios hacia los desastres naturales.



Tabla 5.2 Valoraciones de los criterios para Coatzacoalcos y Manzanillo considerados en el problema de diversidad máxima para mostrar la obtención de las disimilitudes

Ubicación	Inundación	Sequía	Tormentas eléctricas	Granizo	Ondas Cálidas	Ciclones Tropicales	Bajas Temperaturas	Nevadas	Sismo	Laderas
Coatzacoalcos	-1	0.33	0	0.33	0	1	1	1	-0.33	-1
Manzanillo	-1	0	0.33	0.33	0	-1	1	1	-1	-1

Tabla 5.2 Elaboración propia.

Sustituyendo los valores de la Tabla 5.2 tenemos:

$$\begin{aligned}
 d_{\text{Coatzacoalcos,Manzanillo}} &= \frac{(-1)(-1) + (0.33)(0) + (0)(0.33) + (0.33)(0.33) + (0)(0) + (1)(-1) + (1)(1) + (1)(1) + (-0.33)(-1) + (-1)(-1)}{\sqrt{(-1)^2 + (0.33)^2 + (0)^2 + (0.33)^2 + (0)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (-0.33)^2 + (-1)^2} \sqrt{(-1)^2 + (0)^2 + (0.33)^2 + (0.33)^2 + (0)^2 + (-1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2} \\
 &= \frac{1 + 0 + 0 + 0.1089 + 0 - 1 + 1 + 1 + 0.33 + 1}{\sqrt{1 + 0.1089 + 0 + 0.1089 + 0 + 1 + 1 + 1 + 0.1089 + 1} \sqrt{1 + 0 + 0.1089 + 0.1089 + 0 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1}} \\
 &= \frac{3.4389}{\sqrt{5.3267} \sqrt{6.2178}} = \frac{3.4389}{5.755028693} = -0.5975469773
 \end{aligned}$$

Este proceso de validación se realizó con varias distancias obtenidas dentro de ambos planteamientos, de forma que se compruebe que los cálculos son correctos.

Los siguientes elementos que requieren validarse lógicamente son las restricciones bajo las que está limitado el modelo de diversidad máxima:

$$\sum_{i=1}^n x_i = m; \tag{3}$$

$$y_{ij} \geq x_i + x_j - 1; \mathbf{1} \leq i < j \leq n; \tag{7}$$

$$y_{ij} \leq x_i; \mathbf{1} \leq i < j \leq n; \tag{8}$$

$$y_{ij} \leq x_j; \mathbf{1} \leq i < j \leq n; \tag{9}$$

$$x_i, y_{ij} \in \{0, 1\}; \mathbf{1} \leq i < j \leq n \tag{10}$$

Dentro de las restricciones no se requiere el cálculo de algún parámetro. La primera restricción, representada por la ecuación (3), sólo indica el número de almacenes que se desean localizar. Las restricciones lógicas de las expresiones (7), (8) y (9) sólo aseguran que las variables auxiliares



y_{ij} se activen si y solo si se cumple con la condición de que tanto el sitio i como el sitio j sean seleccionados. Por último, la restricción de integralidad de la ecuación (10) sólo indica que la decisión se reduce a si se localiza o no el sitio i .

Ahora, la validación lógica del modelo programado resultó más interesante, debido a la atención que se requirió para traducir de manera correcta la formulación matemática hacia el *software* LINGO. Considerando el ejemplo de aplicación desarrollado en el capítulo 4, contar con 32 posibles ubicaciones conllevó calcular 496 distancias resultantes de la comparación entre cada par de alternativas, establecer 496 variables auxiliares, 32 variables binarias, así como las 1986 restricciones requeridas para llegar a una solución. Mediante la Figura 5.1 se pueden notar estas condiciones.

Cabe mencionar que, a pesar del desarrollo del modelo programado mostrado en el capítulo 4, el proceso para llegar a la formulación definitiva requirió de varias pruebas para encontrar soluciones. Durante la construcción del modelo programado se cometieron errores de traducción del lenguaje matemático al lenguaje de programación de LINGO en la declaración de las variables y de las restricciones, así como en los signos de algunas distancias. Como se mencionó en el capítulo 3, dentro de la presentación de la metodología del trabajo, este proceso de pruebas y mejora del modelo programado también forman parte de la verificación.

Figura 5.1 Verificación del modelo mediante prueba lógica. Estado del solver de LINGO cuando se requieren 0 almacenes

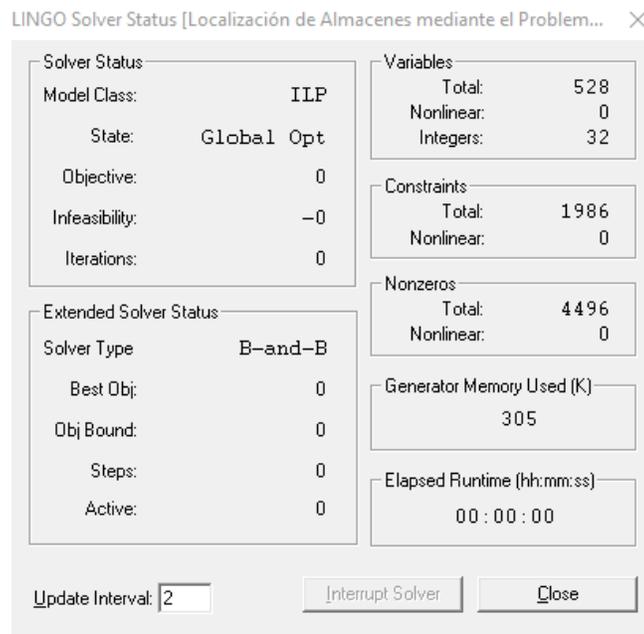


Figura 5.1 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).



Otra forma en que se verificó el modelo programado consistió en probar que el modelo encontrara la solución del problema cuando no se requerían almacenes, es decir, $m = 0$. Este caso permite comprobar que, ante un resultado que resulta trivial, el modelo funciona correctamente. En la Figura 5.1 se puede observar que el modelo proporciona una solución coherente al requerimiento de $m = 0$. Ante el requerimiento de $m = 0$, la función objetivo también registra el mismo valor, $Z = 0$. De la misma forma, ninguna variable de decisión es seleccionada, así como ninguna variable auxiliar es activada.

La siguiente verificación realizada, antes de generar los resultados, se llevó a cabo considerando el requerimiento de un solo almacén, $m = 1$.

Figura 5.2 Estado del *solver* de LINGO para el caso de verificación en que se requiere un solo almacén

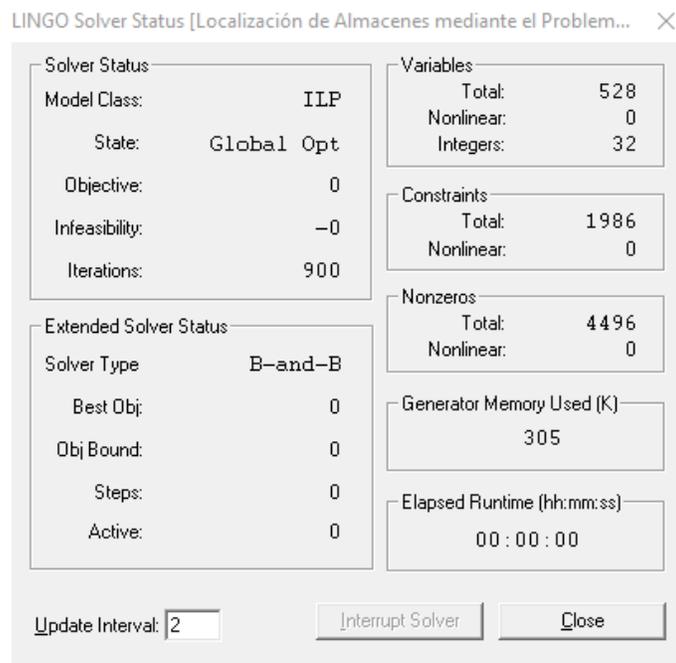


Figura 5.2 Adaptado de *LINGO: The Modeling Language and Optimizer* (2016).

En la Figura 5.2 se puede observar el estado del *solver* de LINGO para este caso. A pesar de que el resultado de este caso indica que se selecciona a Nuevo Laredo, $x_{\text{Nuevo Laredo}} = 1$, la función objetivo se mantiene nula, $Z = 0$, ya que el planteamiento del problema de diversidad máxima requiere de una comparación pareada. Al seleccionar sólo un sitio, no se puede activar ninguna variable auxiliar y_{ij} , por lo que ningún valor de diversidad se puede registrar en la función objetivo. Estas pruebas de lógica en casos extremos permiten verificar que el modelo está operando correctamente, lo que permitiría tener la confianza de obtener soluciones correctas. Con las pruebas finalizadas, se establece que la formulación mostrada en el capítulo anterior



puede ser utilizada para obtener soluciones del problema abordado en este trabajo de investigación. El siguiente paso dentro de la metodología de este trabajo es la validación operacional del modelo.

5.3 VALIDACIÓN OPERACIONAL DEL MODELO DE DIVERSIDAD MÁXIMA

Landry *et al.* (1983) reconocen que gran parte de la validación del modelo se lleva a cabo durante el proceso de construcción, definiendo que, durante el proceso de construcción del modelo y todas sus implicaciones, realmente se está realizando un proceso de modelación-validación. Siguiendo esta definición, las constantes interrogantes que ha intentado resolver este trabajo de investigación dan muestra de que la validación se encuentra presente durante el desarrollo del mismo. Además, Landry & Oral (1993) establecen que no hay un método científico universal de validación, así como tampoco se pueden establecer criterios unánimes para validar un modelo. A pesar de estas condiciones, se requiere desarrollar un acercamiento a esta condición, ya que de alguna manera se requiere demostrar que el modelo construido obedece al problema de investigación que se busca resolver, como lo menciona Miser (1993).

Dentro de las técnicas de validación mencionadas por Landry, Malouin y Oral (1983), el análisis de sensibilidad es lo que se adecua mejor ante la formulación tan peculiar del modelo de diversidad máxima. Teniendo en cuenta que el análisis de sensibilidad conlleva experimentar con el cambio de los parámetros para estudiar cómo se comporta el modelo, así como comparar los resultados con modelos similares. La formulación del problema de diversidad máxima no cuenta directamente con parámetros dentro de las restricciones para realizar dicha técnica; sin embargo, el análisis de sensibilidad dentro de este método de solución puede explorar la conceptualización de la “diversidad”, es decir, la forma en que se evalúan los criterios que conforman la disimilitud entre el conjunto de soluciones posibles.

Para demostrar la validez del modelo de diversidad máxima se construyó una variación del ejemplo de aplicación de esta investigación. Con el fin de exponer la “sensibilidad” de la formulación de dicho modelo, se estableció disminuir el número de fenómenos naturales que azotan al territorio mexicano. Originalmente, dentro del primer criterio de la Tabla 4.1, se tomaron en cuenta los fenómenos naturales estudiados por Mota Palomino *et al.* (1992), los cuales son: inundaciones, sequías, ciclones tropicales, nevadas, sismos y laderas. Bajo la propuesta de que diversidad representa un enfoque resiliente para la cadena de suministro, considerar un número reducido de desastres naturales afecta la diversidad de fenómenos que pueden afectar ciertas regiones, por lo que cualquier solución que se pueda obtener con una formulación limitada reduciría la resiliencia en la cadena de suministro; con esta idea se



desarrolla un escenario en el que sólo se consideren cuatro fenómenos naturales: sequías, nevadas, ciclones tropicales e inundaciones, como se muestra en la Tabla 5.3:

Tabla 5.3 Valoraciones para el criterio de desastres naturales

Valor	Desastre natural
-1	Sequías
-0.33	Nevadas
0.33	Ciclones tropicales
1	Inundaciones

Tabla 5.2 Adaptado de Mota Palomino *et al.* (1992)

Con esta modificación, las evaluaciones para cada sitio considerado para localizar un almacén resultan de la siguiente manera:

Tabla 5.4 Valoraciones de los criterios para el escenario de validación

Número	Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
1	Aguascalientes	-1	-1	-0.33	-0.33	1
2	Altamira	1	1	-1	0.33	-1
3	Cancún	0.33	1	1	-0.33	-1
4	Chihuahua	-0.33	1	0.33	0.33	-1
5	Ciudad de México	1	1	-0.33	1	-1
6	Ciudad Juárez	-0.33	1	1	1	-1
7	Ciudad Victoria	1	-1	0.33	1	-1
8	Coatzacoalcos	1	-1	-1	1	-1
9	El Salto	-1	1	-0.33	-0.33	-1
10	Guadalajara	1	-1	-0.33	-0.33	-1
11	Guaymas	-1	-1	-1	-1	-1
12	Hermosillo	-1	-1	0.33	-0.33	1
13	Irapuato	1	-1	-0.33	-0.33	-1
14	Lázaro Cárdenas	0.33	1	-1	0.33	-1
15	León	-1	-1	-0.33	0.33	-1
16	Manzanillo	0.33	-1	-1	-1	-1
17	Mexicali	1	-1	1	1	1
18	Monterrey	-1	1	1	0.33	1



19	Nogales	-0.33	-1	0.33	1	1
20	Nuevo Laredo	-1	1	0.33	1	1
21	Pachuca	1	-1	-0.33	0.33	-1
22	Progreso	0.33	1	-1	-0.33	-1
23	Puebla	1	1	-0.33	0.33	1
24	Querétaro	1	-1	-0.33	1	-1
25	Ramos Arizpe	-1	-1	0.33	0.33	1
26	San Luis Potosí	1	-1	0.33	1	1
27	Tampico	1	1	0.33	-0.33	1
28	Tijuana	-0.33	-1	1	-1	-1
29	Toluca	-0.33	1	1	0.33	1
30	Topolobampo	1	1	-1	0.33	-1
31	Torreón	1	1	1	-1	1
32	Zacatecas	1	1	-0.33	-1	1

Tabla 5.4 Elaboración propia con base en información mostrada en la página de internet del Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Con las condiciones descritas, a continuación, se presentan los resultados de este escenario respetando el requerimiento de 4 almacenes:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{2}, \mathbf{x}_{El\ Salto} = \mathbf{1}, \mathbf{x}_{Pachuca} = \mathbf{1}, \mathbf{x}_{Ramos\ Arizpe} = \mathbf{1}, \mathbf{x}_{Tampico} = \mathbf{1}$$

Tabla 5.5 Valoraciones de los criterios para los sitios considerados en la solución del modelo de validación en el problema de diversidad máxima bajo el escenario de validación

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
El Salto	-1: Sequías	1: Propio	-0.33: Terrestre	-0.33: Estación de policía	-1: No
Pachuca	1: Inundaciones	-1: Rentado	-0.33: Terrestre	0.33: Estación de bomberos	-1: No
Ramos Arizpe	-1: Sequías	-1: Rentado	0.33: Férrea	0.33: Estación de bomberos	1: Sí
Tampico	1: Inundaciones	1: Propio	0.33: Férrea	-0.33: Estación de policía	1: Sí

Tabla 5.5 Fuente: Elaboración propia.

Como se puede notar en la Tabla 5.5, a pesar de limitar el número de fenómenos naturales considerados en la formulación del modelo de diversidad máxima, la solución óptima cumple con el objetivo de localizar almacenes con características diversas que aumenta la resiliencia al



evitar que todos los almacenes se vean afectados por los mismos eventos disruptivos producto de los desastres naturales. El único criterio que presenta similitudes entre los sitios seleccionados es la cercanía de los organismos que proveen auxilio; sin embargo, se puede considerar que la solución es satisfactoria por cumplir con el objetivo, por lo que se puede decir que el modelo de diversidad máxima es útil y usable, así como representar la realidad si se considera la propuesta de Kleindorfer & Saad (2005) en cuanto a atacar la localización de instalaciones a través de la diversidad.

Ahora, a través del índice de resiliencia desarrollado por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED, en la Tabla 5.6 se muestran las evaluaciones de los sitios seleccionados en el modelo de validación. Como se puede notar, los niveles de resiliencia de los municipios donde se han localizado los sitios seleccionados representan que dichas comunidades cuentan con condiciones sociodemográficas sólidas para responder ante la acción de los desastres naturales.

Tabla 5.6 Índice de resiliencia de los sitios seleccionados en el modelo de validación

Ubicación	Índice de Resiliencia	Nivel de Resiliencia
El Salto	78.0042581	Muy alto
Pachuca	83.86923171	Muy alto
Ramos Arizpe	84.65103425	Muy alto
Tampico	84.55503617	Muy alto

Tabla 5.6 Tomado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED.

Mediante la Figura 5.3 se puede observar que la distancia física entre los sitios seleccionados también representa una diferencia suficiente para identificar cambios significativos en los ecosistemas de las regiones que, por ende, reflejará que las ubicaciones no se vean afectados por el mismo tipo de desastres naturales.

La validación operacional de esta propuesta de investigación está pensada conforme a las dimensiones de validación mencionadas por Landry, Malouin & Oral (1983). En primera instancia, un modelo válido significa que el modelo propuesto representa la porción de realidad que presenta la situación problema y con la cual se ha trabajado para hallar una solución. En esta investigación, la propuesta se basa en la problemática que representan los efectos de los fenómenos naturales sobre la supervivencia de la cadena de suministro en México, es decir, persigue la mejora de la resiliencia en la misma.



Figura 5.3 Localización de los almacenes de acuerdo con la solución encontrada por LINGO en el modelo construido para la validación



Figura 5.3 Adaptado de Google Earth (n.d.)

A pesar de la vasta literatura que analiza las implicaciones de las causas de interrupción sobre diferentes cadenas de suministro, las referencias bibliográficas son escasas en cuanto a la solución de este problema con respecto a los desastres naturales mediante modelos cuantitativos, por lo que resulta difícil poder comparar esta propuesta con alguna otra investigación. La investigación más cercana en cuanto al problema de localización de almacenes se presenta en el estudio de Ye, Zhao, Xi & Dessouky (2015), aunque el enfoque se diferencia al tratarse de la localización de almacenes de emergencia para el acopio de víveres, sin embargo, a pesar de que la representatividad del modelo propuesto se construyó durante el capítulo 1, a través del análisis del problema de investigación, resulta discutible no poderse comparar con otra propuesta que resuelva una problemática similar.

Por lo anterior, la usabilidad y utilidad de la propuesta de solución representan las determinantes del modelo que pueden establecer si el problema de diversidad máxima es válido para resolver el problema de investigación. Los esfuerzos en esta sección radican en comprobar que el modelo de diversidad máxima puede utilizarse o no, es por ello que el modelo construido anteriormente con el fin de validar persigue este objetivo. La consideración de una menor cantidad de desastres naturales en la construcción de los criterios que evalúan la resiliencia de una cadena de suministro para un problema de localización de almacenes



conlleva a que los sitios seleccionados no sean resilientes entre sí, sin embargo, el modelo de diversidad máxima buscará la solución más diversa si el concepto de la formulación está bien entendido. A través de la experimentación del modelo bajo este escenario, se pudieron encontrar hallazgos relacionados con la forma en que el modelo se comporta ante las variaciones, lo cual permite mejorar y robustecer la propuesta de solución que se presentará en la siguiente sección.

De acuerdo con las reflexiones de Landry *et al.* (1983), la validación de cualquier modelo puede encontrarse en discusión, aún más si se considera que esta propuesta teórica aborda un enfoque diferente a los clásicos modelos de localización; resulta complicado comparar resultados entre este modelo y los empleados en la realidad. Sin embargo, la propuesta de solución de esta investigación, además de proveer un modelo matemático que permite obtener soluciones viables, propicia la reflexión y puede aplicarse en situaciones diferentes, donde se pueden agregar o determinar nuevos criterios y aportar hallazgos y conocimientos útiles.

5.4 RESULTADOS DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN

Una vez que se cuenta con un modelo verificado y validado, se puede dar certeza al presentar resultados que resuelven el problema planteado, así como contar con la confianza de que el modelo representa una buena aproximación hacia una solución integral del problema, es decir, la propuesta de diversidad máxima permite el análisis del problema desde la perspectiva de la gestión del riesgo, la cual no ha sido abordada a detalle en México, la resiliencia a través de la disimilitud. Antes de presentar los resultados, es necesario especificar la computadora empleada durante el desarrollo del modelo programado, ya que las diferencias entre equipos de cómputo impactan en el tiempo de solución que requirió LINGO para hallar la solución óptima, así como el número de iteraciones requeridas para llegar a dicha solución. Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se empleó una computadora personal Lenovo_MT_80SL_BU_idea_FM_Lenovo_ideapad_310-14ISK que cuenta con el sistema operativo Microsoft Windows 10 Home Single Language y un procesador Intel® Core™ i7-6500U CPU @ 2.50GHz, con 2592 MHz y constando de 2 procesadores principales y 4 procesadores auxiliares.

Recordando que el ejemplo de aplicación requiere localizar 4 almacenes, es decir, $m = 4$, la solución óptima del problema de diversidad máxima se presenta a continuación:

$$Z = 2, x_{Aguascalientes} = 1, x_{Chihuahua} = 1, x_{León} = 1, x_{Tampico} = 1$$



Dado el ejemplo de aplicación, localizar 4 almacenes que posean resiliencia al diferenciar las características entre sí, la solución óptima indica localizar los almacenes en Aguascalientes, Chihuahua, León y Tampico. Para notar la diversidad existente entre las ubicaciones seleccionadas, en la Tabla 5.7 se muestran las evaluaciones de los criterios considerados.

Tabla 5.7 Valoraciones de los criterios para la solución del primer planteamiento del problema de diversidad máxima considerando localizar 4 almacenes

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
Aguascalientes	0.2	-1	-0.33	-0.33	1
Chihuahua	-0.2	1	0.33	0.33	-1
León	-1	-1	-0.33	0.33	-1
Tampico	1	1	0.33	-0.33	1

Tabla 5.7 Elaboración propia.

A través de la Tabla 5.7 se puede analizar qué tan diferentes son las características de las ubicaciones seleccionadas; a pesar de que existen algunas similitudes entre las ubicaciones como en el caso de las vías de comunicación y los organismos que brindan auxilio, de acuerdo con el algoritmo de *Branch and Bound* utilizado por LINGO, el conjunto comprendido por Aguascalientes, Chihuahua, León y Tampico posee la mayor diferencia entre sí que cualquier otro conjunto de posibles soluciones, por lo que se puede determinar que es el más resiliente. Además, a través del índice de resiliencia del CENAPRED, se verifica que los sitios seleccionados cuentan con un índice de resiliencia municipal muy alto, como se muestra en la Tabla 5.8, por lo que las características del entorno respaldan la consideración de los sitios seleccionados

Tabla 5.8 Índice de resiliencia de los sitios seleccionados en el primer planteamiento del modelo de diversidad máxima

Ubicación	Índice de Resiliencia	Nivel de Resiliencia
Aguascalientes	82.32362625	Muy alto
Chihuahua	83.07361126	Muy alto
León	70.92530877	Muy alto
Tampico	84.55503617	Muy alto

Tabla 5.8 Tomado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED.



Figura 5.4 Localización de los almacenes de acuerdo con la solución encontrada por el primer planteamiento del modelo de diversidad máxima

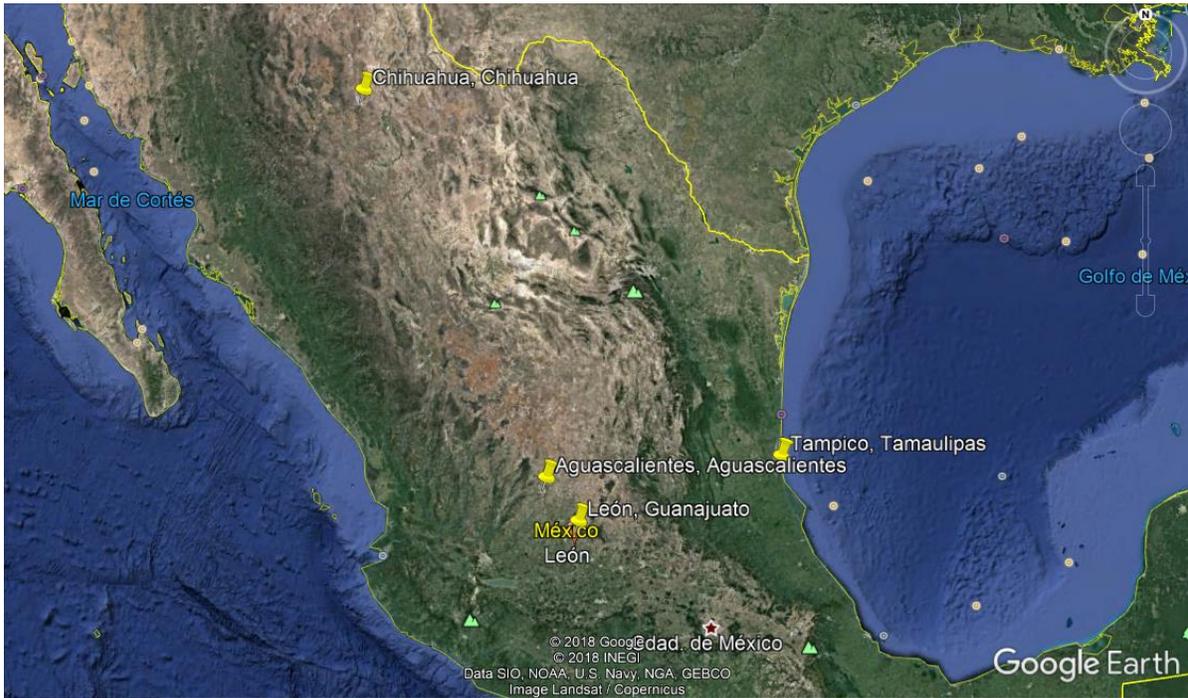


Figura 5.4 Adaptado de Google Earth.

En la Figura 5.4 se observa que las ciudades seleccionadas se encuentran en regiones diferentes ya que, de acuerdo con los criterios establecidos, son la mejor opción al evaluar la resiliencia; resulta evidente que localizar en ciudades con diferentes ecosistemas y condiciones socioeconómicas evita que un fenómeno natural impacte en la totalidad de los almacenes, la diversidad se cumple y, por lo tanto, aumenta la resiliencia del conjunto de los sitios elegidos.

Para verificar que la solución óptima es correcta, se realiza de nuevo un proceso de verificación. En primer lugar, se verifica que las variables auxiliares correspondientes hayan sido activadas:

$$\begin{aligned}
 y_{Aguascalientes,Chihuahua} &= 1, y_{Aguascalientes,León} = 1, y_{Aguascalientes,Tampico} = 1, \\
 y_{Chihuahua,León} &= 1, y_{Chihuahua,Tampico} = 1, y_{León,Tampico} = 1
 \end{aligned}$$

Enseguida, se corrobora que el valor de la función objetivo corresponda con el reportado por el *solver* de LINGO:



$$\begin{aligned}
Z = & y_{Aguascalientes,Chihuahua} + 0.074200655y_{Aguascalientes,León} \\
& - 0.074200655y_{Aguascalientes,Tampico} - 0.074200655y_{Chihuahua,León} \\
& + 0.074200655y_{Chihuahua,Tampico} + y_{León,Tampico} = 2
\end{aligned}$$

Finalmente, se verifica que las restricciones lógicas hayan sido respetadas. Debido al gran número de restricciones a comprobar (1986 restricciones), sólo se mostrará la comprobación de las restricciones lógicas para la primera variable auxiliar activada, $y_{Aguascalientes,Chihuahua}$:

$$y_{ij} \geq x_i + x_j - 1; 1 \leq i < j \leq n$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} \geq x_{Aguascalientes} + x_{Chihuahua} - 1;$$

$$x_{Aguascalientes} = 1, x_{Chihuahua} = 1 \therefore$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} \geq 1 + 1 - 1;$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} \geq 1$$

$$\text{como } y_{ij} \in \{0, 1\}$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} = 1$$

$$y_{ij} \leq x_j; 1 \leq i < j \leq n$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} \leq x_{Aguascalientes}$$

$$x_{Aguascalientes} = 1 \therefore$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} \leq 1$$

$$y_{ij} \leq x_i; 1 \leq i < j \leq n$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} \leq x_{Chihuahua}$$

$$x_{Chihuahua} = 1 \therefore$$

$$y_{Aguascalientes,Chihuahua} \leq 1$$

Con esto la solución óptima del ejemplo de aplicación se ha verificado.



Ahora, en el segundo planteamiento, donde sólo se consideran los índices de vulnerabilidad de los sitios considerados frente a los desastres naturales, los resultados del modelo para la localización de 4 almacenes son:

$$Z = 1.31399, x_{Cancún} = 1, x_{Ciudad\ Juárez} = 1, x_{Progreso} = 1, x_{Toluca} = 1$$

En el planteamiento de considerar sólo las vulnerabilidades de los sitios frente a los desastres naturales, la solución más diversa sugiere localizar almacenes en Cancún, Ciudad Juárez, Progreso y Toluca. Para notar la diversidad existente entre las ubicaciones seleccionadas, en la Tabla 5.9 se muestran las evaluaciones de los criterios considerados.

Tabla 5.9 Valoraciones de los criterios para la solución del segundo planteamiento del problema de diversidad máxima considerando localizar 4 almacenes

Ubicación	Inundación	Sequía	Tormenta eléctrica	Granizo	Ondas Cálidas	Ciclones Tropicales	Bajas Temperaturas	Nevadas	Sismos	Laderas
Cancún	-0.33	-0.33	0.33	1	0	-1	1	1	0.33	0
Ciudad Juárez	-0.33	-0.33	0.33	0	0	1	-1	-1	0	-1
Progreso	1	0	0.33	1	-0.33	-0.33	1	1	0.33	0
Toluca	0	0.33	-1	-1	0.33	1	-0.33	-1	-0.33	-1

Tabla 5.9 Elaboración propia.

Al presentarse una mayor cantidad de criterios a considerar, la diversidad trata de compensar los opuestos, lo que en el caso de estos resultados resulta desfavorable debido a la localización tanto de los almacenes en Cancún y en progreso. En la Figura 5.5 se puede notar que la dispersión física de estos dos almacenes es mínima.

Además, a través del índice de resiliencia del CENAPRED, se verifica que los sitios seleccionados cuentan con un índice de resiliencia municipal muy alto, como se muestra en la Tabla 5.9, por lo que las características del entorno respalden la consideración de los sitios seleccionados.

Tabla 5.10 Índice de resiliencia de los sitios seleccionados en el ejemplo de aplicación

Ubicación	Índice de Resiliencia	Nivel de Resiliencia
Cancún	78.63206372	Muy alto
Ciudad Juárez	80.54693452	Muy alto
Progreso	76.26502015	Muy alto
Toluca	75.64648707	Muy alto

Tabla 5.10 Tomado de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED.



Figura 5.5 Localización de los almacenes de acuerdo con la solución encontrada por LINGO

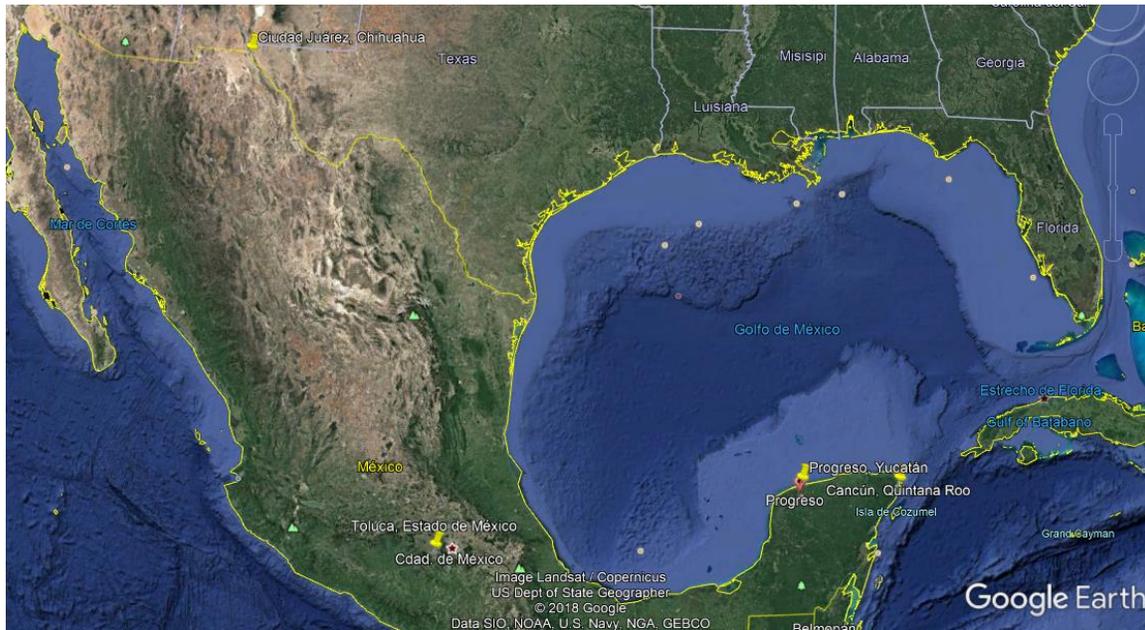


Figura 5.5 Adaptado de Google Earth.

Para este segundo planteamiento, también se realizó la verificación del modelo. En primer lugar, se verifica que las variables auxiliares correspondientes hayan sido activadas:

$$y_{Cancún,Ciudad Juárez} = 1, y_{Cancún,Progreso} = 1, y_{Cancún,Toluca} = 1,$$

$$y_{Ciudad Juárez,Progreso} = 1, y_{Ciudad Juárez,Toluca} = 1, y_{Progreso,Toluca} = 1$$

Enseguida, se corrobora que el valor de la función objetivo corresponda con el reportado por el *solver* de LINGO:

$$Z = 0.610229388y_{Cancún,Ciudad Juárez} - 0.7254486y_{Cancún,Progreso}$$

$$+ 0.7897424y_{Cancún,Toluca} + 0.582335y_{Ciudad Juárez,Progreso}$$

$$- 0.5961575y_{Ciudad Juárez,Toluca} + 0.653292y_{Progreso,Toluca} = 1.31399$$

Finalmente, se verificaron que las restricciones lógicas hayan sido respetadas.

En este segundo planteamiento se ha notado que algunos desastres naturales se presentan en casi todos los sitios considerados, por ejemplo, las laderas, por lo que cualquier sitio que no tenga vulnerabilidad hacia este fenómeno natural se convierte en un sitio con altas



posibilidades de conformar la solución óptima. Estas condiciones se explorarán en la siguiente sección.

Como se mencionó anteriormente, la estructura sencilla de entender del problema de diversidad máxima resulta atractiva para aquellos decisores que buscan soluciones rápidas de verificar, además de que su formulación admite la evaluación de varios criterios, como se presentó en el primer planteamiento, recordando que no se trata de un método de solución que jerarquice las soluciones, sino que la solución proporcione una diversidad a un conjunto de elementos; en este trabajo de investigación, como destaca Kleindorfer y Saad (2005), la diversidad genera una mayor resiliencia. Además, la complejidad del modelo radica en el manejo de una gran cantidad de variables de decisión, variables auxiliares y restricciones, así como el cálculo de una gran cantidad de “distancias” entre los elementos, en resumen, la naturaleza combinatoria del problema en cuanto a criterios y opciones a localizar dificultan que se pueda obtener una solución mediante una simple inspección.

El problema de diversidad máxima es un método de solución dúctil, que puede ser adaptado para brindar un mayor panorama de un problema de investigación. Esta ventaja, en conjunto con el lenguaje de programación de LINGO, abre la puerta para realizar diferentes escenarios que permiten a los decisores ampliar el panorama de opciones para tomar una decisión.

5.5 EXPERIMENTACIÓN CON EL MODELO DE SOLUCIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura del problema de diversidad máxima permite realizar cambios tanto en los criterios que se consideran para calificar la diversidad de los sitios posibles para localizar los almacenes, así como poder variar el número de almacenes que son requeridos. Por ejemplo, durante el proceso de validación se mostró el comportamiento de la solución óptima cuando disminuyen las opciones que definen uno de los criterios que representan a la resiliencia. Es por esto por lo que en esta sección se analizará el comportamiento del modelo cuando varían ciertas características como el número de almacenes o los criterios que determinan la resiliencia de los almacenes, con el fin de proporcionar más información a los decisores.

En el proceso de verificación del modelo, se probó el comportamiento del modelo programado del primer planteamiento cuando se necesitaban $m = 0$ y $m = 1$ almacenes, ya que, por la formulación del problema de diversidad máxima, estos requerimientos no corresponden con la naturaleza de la propuesta, es decir, la comparación entre dos o más alternativas de sitios para localizar el almacén. Localizar menos de 2 almacenes bajo el paradigma de diversidad máxima no permite que exista una comparación pareada entre alternativas. En los siguientes apartados se muestran diversos escenarios que permitirán a los decisores tomar en consideración que, el



problema de diversidad máxima en el problema de localización de almacenes resulta un modelo flexible y robusto, con el cual se puede experimentar de diversas maneras.

5.5.1 Experimento 1: Localización de 3 almacenes

Como primer experimento se considera disminuir el número de almacenes que se requieren. Esta formulación, así como el siguiente experimento, permiten observar de qué manera se está comportando el algoritmo de *Branch and Bound* dentro de LINGO. Con el fin de que los decisores tengan la certeza de la flexibilidad del modelo en cuanto a requerimientos, este experimento que requiere sólo 3 almacenes discernirá cómo el modelo construye las soluciones:

$$Z = 1.33978, x_{\text{Nuevo Laredo}} = 1, x_{\text{Pachuca}} = 1, x_{\text{Zacatecas}} = 1$$

Los resultados muestran un cambio radical si se modifica el número de almacenes requeridos debido a que el modelo por sí mismo es sistémico puesto que está basado en relaciones de un conjunto de elementos; ninguno de los tres sitios seleccionados se encuentra en la solución del modelo base (Aguascalientes, Chihuahua, León, Tampico).

Como se puede observar en la Tabla 5.11, a pesar de que los sitios seleccionados cuentan con una similitud en las vías de comunicación, la solución respeta el requerimiento de diversidad, por lo tanto, la solución se puede considerar resiliente.

Tabla 5.11 Valoraciones de los criterios para cada sitio seleccionado en la solución del primer planteamiento del problema de diversidad máxima al requerir 3 almacenes

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
Nuevo Laredo	-1: Sequías	1: Propio	0.33: Férreo	1: Hospital	1: Sí
Pachuca	0.2: Laderas	-1: Rentado	-0.33: Terrestre	0.33: Estación de bomberos	-1: No
Zacatecas	1: Inundaciones	1: Propio	-0.33: Terrestre	-1: Cuartel	1: Sí

Tabla 5.11 Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.6 permite visualizar la dispersión geográfica de los sitios localizados.



Figura 5.6 Localización de los almacenes de acuerdo con los resultados del primer experimento

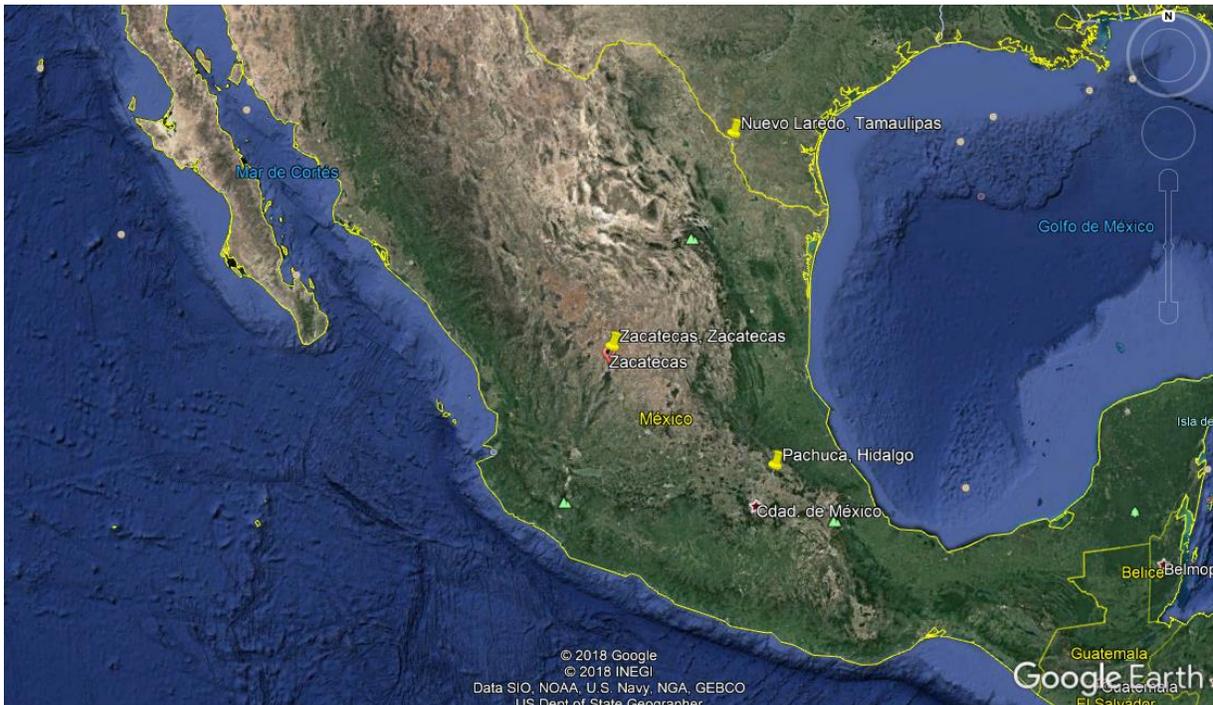


Figura 5.6 Adaptado de Google Earth.

Ahora bien, bajo la formulación del segundo planteamiento, los resultados son los siguientes:

$$Z = 0.8957858, x_{Cancún} = 1, x_{Nogales} = 1, x_{Toluca} = 1$$

Se puede notar que los resultados cuando se requieren 3 o cuando se requieren 4 almacenes no presentan diferencias significativas. Cancún y Toluca se mantienen en ambas soluciones, sólo con la diferencia de la inclusión de Nogales en este escenario.

Tabla 5.12 Valoraciones de los criterios para la solución del segundo planteamiento del problema de diversidad máxima considerando localizar 3 almacenes

Ubicación	Inundación	Sequía	Tormenta eléctrica	Granizo	Ondas Cálidas	Ciclones Tropicales	Bajas Temperaturas	Nevadas	Sismos	Laderas
Cancún	-0.33	-0.33	0.33	1	0	-1	1	1	0.33	0
Nogales	1	-0.33	0.33	0.33	-0.33	1	-1	0	0	-1
Toluca	0	0.33	-1	-1	0.33	1	-0.33	-1	-0.33	-1

Tabla 5.12 Elaboración propia.

A través de la Figura 5.7 se puede observar su dispersión física.



Figura 5.7 Localización de los almacenes de acuerdo con los resultados del primer experimento

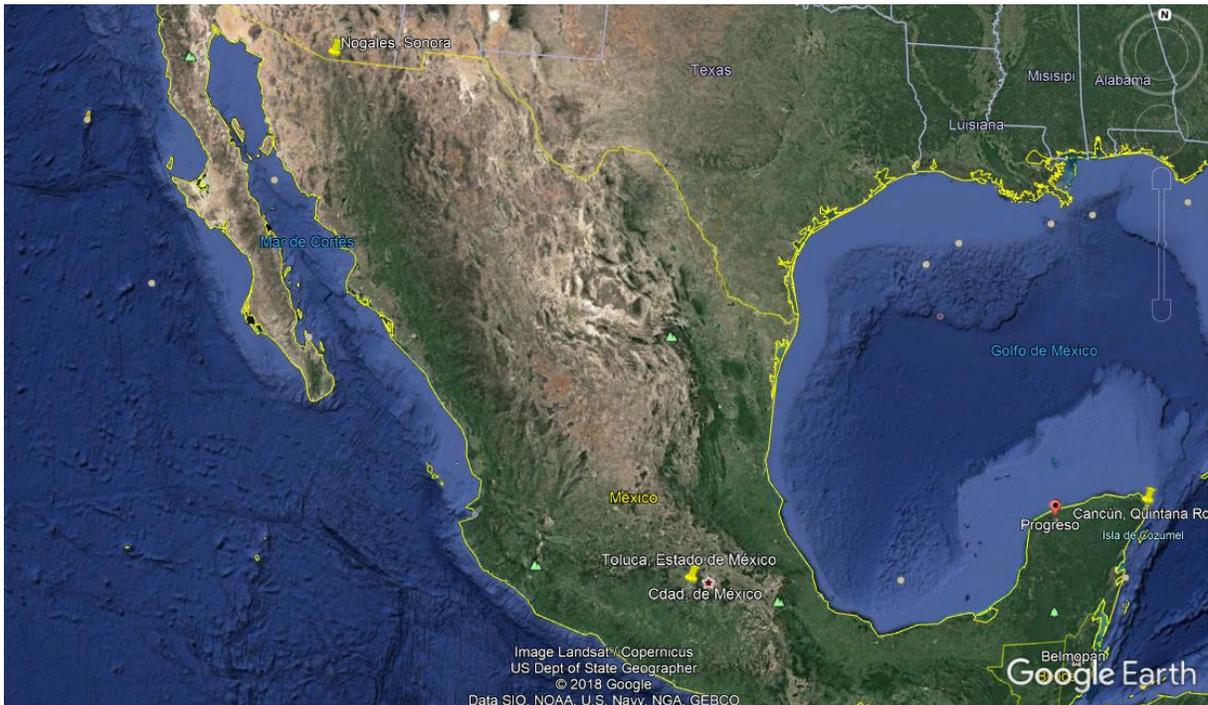


Figura 5.7 Adaptado de Google Earth.

Con estos resultados, ahora se requiere saber qué pasará cuando se aumenta el número de almacenes requeridos.

5.5.2 Experimento 2: Localizar 5 almacenes con el primer planteamiento

Ya que, en el primer experimento, la solución obtenida cuando se requieren sólo 3 almacenes cambia por completo con respecto a la solución cuando se requieren 4 almacenes, a continuación, se presentan los resultados bajo el escenario de requerir 5 almacenes, con el fin de constatar si la solución vuelve a cambiar:

$$Z = 2.45336, x_{León} = 1, x_{Nuevo\ Laredo} = 1, x_{Pachuca} = 1, x_{Torreón} = 1, x_{Zacatecas}$$

Tabla 5.13 Valoraciones de los criterios para cada sitio seleccionado en la solución del primer planteamiento del problema de diversidad máxima al requerir 5 almacenes



Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
León	-1: Sequías	-1: Rentado	-0.33: Terrestre	0.33: Estación de bomberos	-1: No
Nuevo Laredo	-1: Sequías	1: Propio	0.33: Férrea	1: Hospital	1: Sí
Pachuca	0.2: Laderas	-1: Rentado	-0.33: Terrestre	0.33: Estación de bomberos	-1: No
Torreón	1: Inundaciones	1: Propio	1: Aérea	-1: Cuartel	1: Sí
Zacatecas	1: Inundaciones	1: Propio	-0.33: Terrestre	-1: Cuartel	1: Sí

Tabla 5.13 Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.8 Localización de los almacenes de acuerdo con los resultados del segundo experimento basado en el primer planteamiento

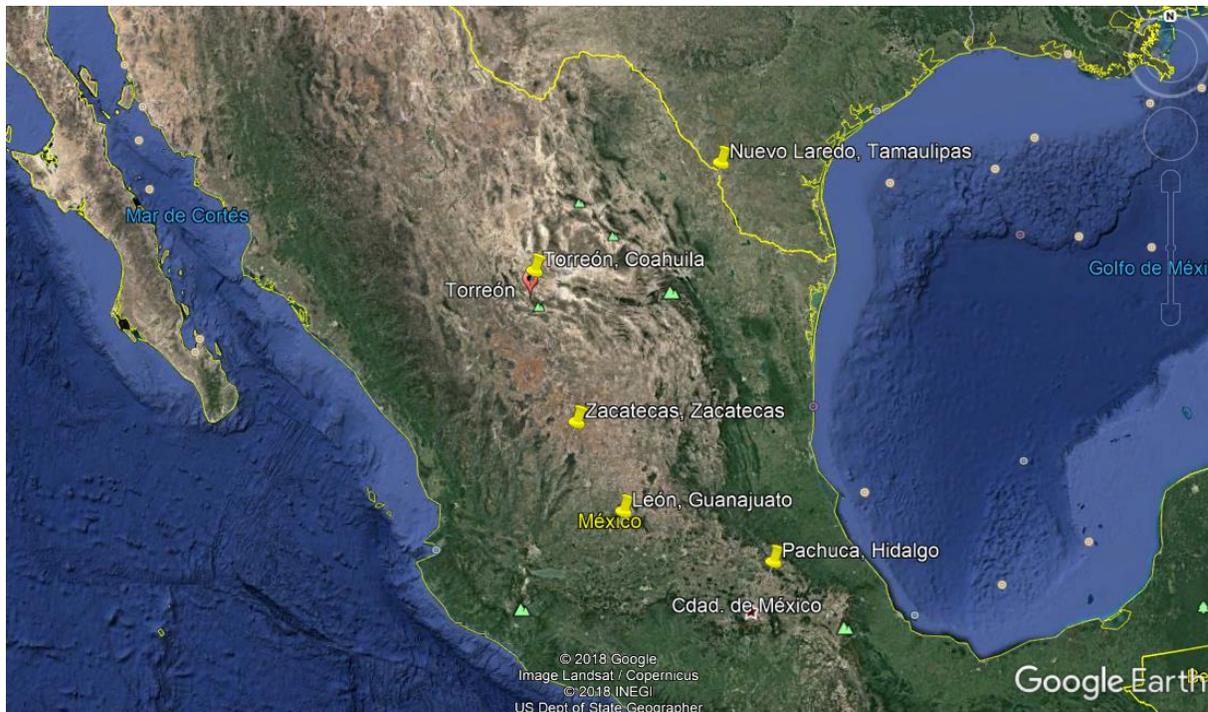


Figura 5.8 Adaptado de Google Earth.

En primera instancia, la solución de este escenario destaca por el incremento de tiempo que requiere LINGO para resolver el problema, ya que el algoritmo debe realizar una mayor cantidad de iteraciones para determinar las comparaciones entre sitios que proporcionan



mayor disimilitud. De acuerdo con los sitios seleccionados, se puede observar que la solución de este escenario se asemeja a la solución del modelo cuando se requieren 3 almacenes, ya que cuenta con las tres ciudades seleccionadas, con la adhesión de León y Torreón. A pesar de que en la Tabla 5.13 existen algunas similitudes entre las características de los sitios seleccionados, la solución preserva la suficiente diversidad para no verse afectado por los mismos desastres naturales al mismo tiempo. En la Figura 5.8 se puede ver la dispersión física de los sitios seleccionados en este escenario.

Ahora, para el segundo planteamiento del modelo de diversidad máxima, los resultados son:

$$Z = 1.246641, x_{Cancún} = 1, x_{Ciudad de México} = 1, x_{Ciudad Juárez} = 1, x_{Progres} = 1, x_{Toluca}$$

Tabla 5.14 Valoraciones de los criterios para la solución del segundo planteamiento del problema de diversidad máxima considerando localizar 5 almacenes

Ubicación	Inundación	Sequía	Tormenta eléctrica	Granizo	Ondas Cálidas	Ciclones Tropicales	Bajas Temperaturas	Nevadas	Sismos	Laderas
Cancún	-0.33	-0.33	0.33	1	0	-1	1	1	0.33	0
Ciudad de México	-1	0.33	-0.33	-0.33	1	1	0	1	-0.33	-0.33
Ciudad Juárez	-0.33	-0.33	0.33	0	0	1	-1	-1	0	-1
Progreso	1	0	0.33	1	-0.33	-0.33	1	1	0.33	0
Toluca	0	0.33	-1	-1	0.33	1	-0.33	-1	-0.33	-1

Tabla 5.14 Tomado de Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos.

En la Figura 5.9 se muestra la disposición física de los almacenes. Si bien, empieza a presentarse menos dispersión geográfica, los desastres naturales que caracterizan cada uno de los sitios siguen teniendo a maximizarse.

Figura 5.9 Localización de los almacenes de acuerdo con los resultados del segundo experimento basado en el segundo planteamiento



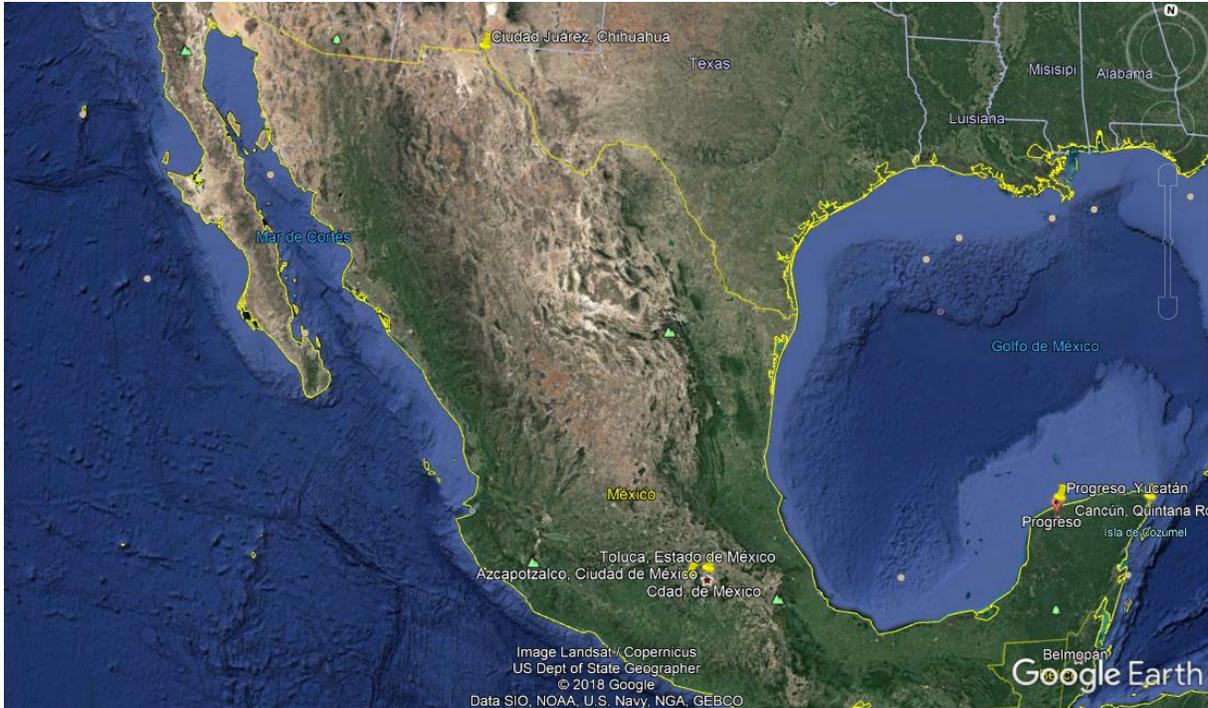


Figura 5.9 Adaptado de Google Earth.

5.5.3 Experimento 3: Reducción en el número de sitios posibles para localizar almacenes bajo el primer planteamiento del modelo de diversidad máxima

Una vez que se ha experimentado con la disminución y aumento de almacenes a localizar, también se requiere conocer de qué forma se comporta el modelo de diversidad máxima ante un número de opciones reducidas. Para este escenario se considera que sólo se cuenta con 20 posibles sitios para localizar los almacenes, los cuales se muestran en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15 Valoraciones de los criterios para cada sitio considerado en el problema de diversidad máxima en el experimento 3

Número	Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
1	Aguascalientes	0.2	-1	-0.33	-0.33	1
2	Chihuahua	-0.2	1	0.33	0.33	-1
3	Ciudad de México	1	1	-0.33	1	-1
4	Guadalajara	1	-1	-0.33	-0.33	-1
5	Hermosillo	-1	-1	0.33	-0.33	1



6	Irapuato	1	-1	-0.33	-0.33	-1
7	Lázaro Cárdenas	0.6	1	-1	0.33	-1
8	León	-1	-1	-0.33	0.33	-1
9	Manzanillo	0.6	-1	-1	-1	-1
10	Mexicali	-0.6	-1	1	1	1
11	Monterrey	0.2	1	1	0.33	1
12	Nuevo Laredo	-1	1	0.33	1	1
13	Progreso	0.6	1	-1	-0.33	-1
14	Puebla	0.2	1	-0.33	0.33	1
15	Querétaro	0.2	-1	-0.33	1	-1
16	San Luis Potosí	0.2	-1	0.33	1	1
17	Tijuana	0.2	-1	1	-1	-1
18	Toluca	-0.2	1	1	0.33	1
19	Torreón	1	1	1	-1	1
20	Zacatecas	1	1	-0.33	-1	1

Tabla 5.14 Fuente: Elaboración propia.

Bajo estas condiciones se obtuvieron los siguientes resultados:

$$Z = 1.97724, x_{Guadalajara} = 1, x_{Hermosillo} = 1, x_{Lázaro Cárdenas} = 1, x_{Toluca} = 1$$

Tabla 5.16 Valoraciones de los criterios para cada sitio seleccionado en la solución del problema de diversidad máxima bajo el experimento 3

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
Guadalajara	1: Inundaciones	-1: Rentado	-0.33: Terrestre	-0.33: Estación de Policía	-1: No
Hermosillo	-1: Sequías	-1: Rentado	0.33: Férreo	-0.33: Estación de Policía	1: Sí
Lázaro Cárdenas	0.6: Ciclones tropicales	1: Propio	-1: Marítima	0.33: Estación de Bomberos	-1: No
Toluca	-0.2: Nevadas	1: Propio	1: Aérea	0.33: Estación de Bomberos	1: Sí

Tabla 5.16 Fuente: Elaboración propia.

A través de la Tabla 5.16 se puede notar que la diversidad entre los sitios seleccionados prevalece a pesar de la reducción de sitios posibles.



A pesar de la reducción de opciones para localizar almacenes, dentro del conjunto de sitios que permanecieron aún se mantuvieron ubicaciones que proporcionaron la diversidad en casi todos los criterios, a excepción del criterio “compañía de auxilio”.

En la Figura 5.10 se muestra la dispersión geográfica de los sitios localizados.

Figura 5.10 Localización de los almacenes de acuerdo con los resultados del tercer experimento

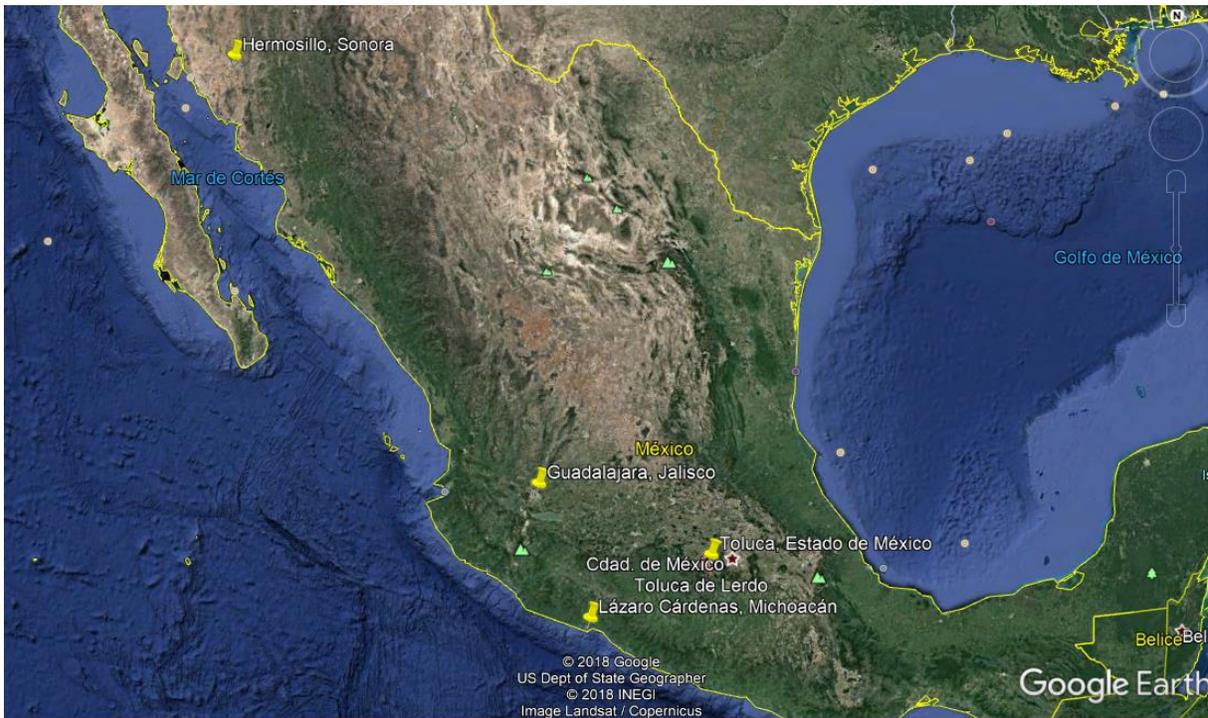


Figura 5.10 Adaptado de Google Earth.

5.5.4 Experimento 4: Consideración de sólo 4 criterios que definen la resiliencia en el primer planteamiento del modelo de diversidad máxima

Mediante los experimentos anteriores se puede notar la forma en que el modelo de diversidad máxima construye las soluciones a partir de la variación en el requerimiento de los almacenes, de modo que el decisor pueda distinguir la robustez del modelo, además de poder identificar el esfuerzo computacional que conlleva cada modificación.

Ahora, y partiendo del hallazgo encontrado en la validación operacional del modelo de diversidad máxima, se requiere experimentar cómo actúa el modelo cuando los criterios que definen la resiliencia son modificados. Tal como se mostró en la sección de validación operacional, disminuir el número de fenómenos naturales a considerar puede modificar de



manera significativa la validez de las soluciones obtenidas, es decir, si los criterios no son lo suficientemente diversos, las soluciones obtenidas pueden no representar la resiliencia que se busca. En este experimento se analizará la funcionalidad del modelo cuando se reduce el número de criterios que califican la diversidad del conjunto de sitios posibles, eliminando el criterio “Compañía de auxilio más cercana” debido a que, dentro de los criterios considerados, una la característica basada en la logística humanitaria más que en la resiliencia de los sitios considerado. Bajo estas condiciones, se presentan los siguientes resultados:

$$Z = 2, x_{Chihuahua} = 1, x_{Nogales} = 1, x_{Pachuca} = 1, x_{Puebla} = 1$$

Tabla 5.17 Valoraciones de los criterios para cada sitio seleccionado en la solución del problema de diversidad máxima bajo el experimento 4

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Capacidad Extra
Chihuahua	-0.2: Nevadas	1: Propio	0.33: Férrea	-1: No
Nogales	-0.2: Nevadas	-1: Rentado	0.33: Férrea	1: Sí
Pachuca	1: Inundaciones	-1: Rentado	-0.33: Terrestre	-1: No
Puebla	-1: Sequías	1: Propio	0.33: Férrea	1: Sí

Tabla 5.17 Fuente: Elaboración propia.

Como se puede notar en la Tabla 5.17, la eliminación del criterio “Compañía que brinda auxilio” provoca la modificación de la solución obtenida, ya que en el modelo base determinó que Chihuahua, Nogales, Pachuca y Puebla representaban la mejor opción para localizar los almacenes. En este experimento, a pesar de que existen cambios en tres ciudades en comparación con la solución base (Chihuahua es el único sitio que se repite del modelo base) al integrar las demás ciudades, la diversidad se sigue respetando, sin embargo, la dispersión geográfica empeora, como se puede ver en la Figura 5.11.

La Tabla 5.18 muestra los índices de resiliencia en los sitios seleccionados.

Tabla 5.18 Índice de resiliencia de los sitios considerados en el ejemplo de aplicación

Ubicación	Índice de Resiliencia	Nivel de Resiliencia
Chihuahua	83.07361126	Muy alto



Nogales	87.09207634	Muy alto
Pachuca	83.86923171	Muy alto
Puebla	68.81662367	Muy alto

Tabla 5.18 Fuente: Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos.

Figura 5.11 Localización de los almacenes de acuerdo con la solución encontrada por LINGO

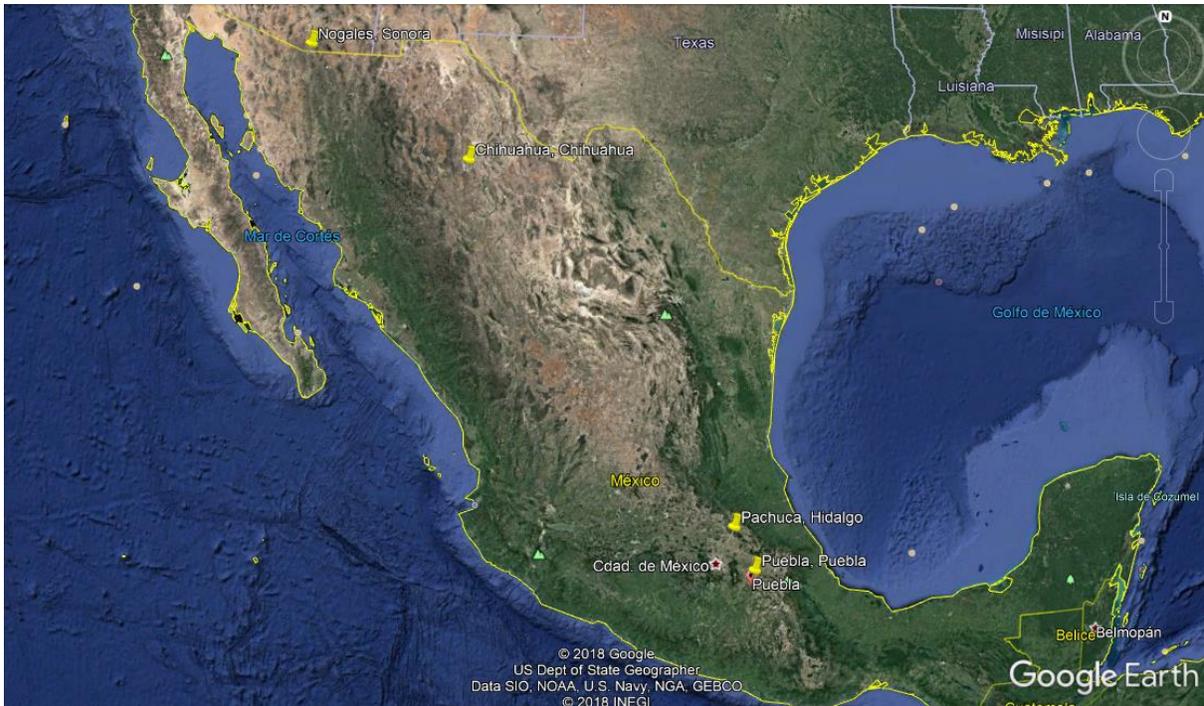


Figura 5.11 Adaptado de Google Earth.

5.5.5 Experimento 5: Ponderación del criterio “desastre natural” en el primer planteamiento del modelo de diversidad máxima

Por último, este experimento pretende mostrar el comportamiento del problema de diversidad ante la ponderación de sus criterios, es decir, que alguno de los criterios sea más importante que los demás y por tanto debe hacerse notar en la formulación del método de solución. En este caso, se pondera el criterio “desastre natural” con un valor de 2 sobre los demás criterios, debido a que representa el evento disruptivo que define el problema de investigación de este documento. A continuación, se presentan los resultados:

$$Z = 2.531539, x_{\text{Ciudad de México}} = 1, x_{\text{Hermosillo}} = 1, x_{\text{León}} = 1, x_{\text{Tampico}} = 1$$



Tabla 5.19 Valoraciones de los criterios para cada sitio seleccionado en la solución del problema de diversidad máxima bajo el experimento 5

Ubicación	Desastre Natural	Rentado o Propio	Transporte	Compañía de Auxilio	Capacidad Extra
Ciudad de México	1	1	-0.33	1	-1
Hermosillo	-1	-1	0.33	-0.33	1
León	-1	-1	-0.33	0.33	-1
Tampico	1	1	0.33	-0.33	1

Tabla 5.19 Fuente: Elaboración propia.

Llama la atención que a pesar de que se dio un mayor peso al criterio de los desastres naturales, se obtuvo una solución no diversa, por lo que no se recomienda ponderar los criterios. Como se puede observar en la Tabla 5.17 las características entre los sitios seleccionados son muy similares.

Figura 5.12 Localización de los almacenes de acuerdo con los resultados del quinto experimento

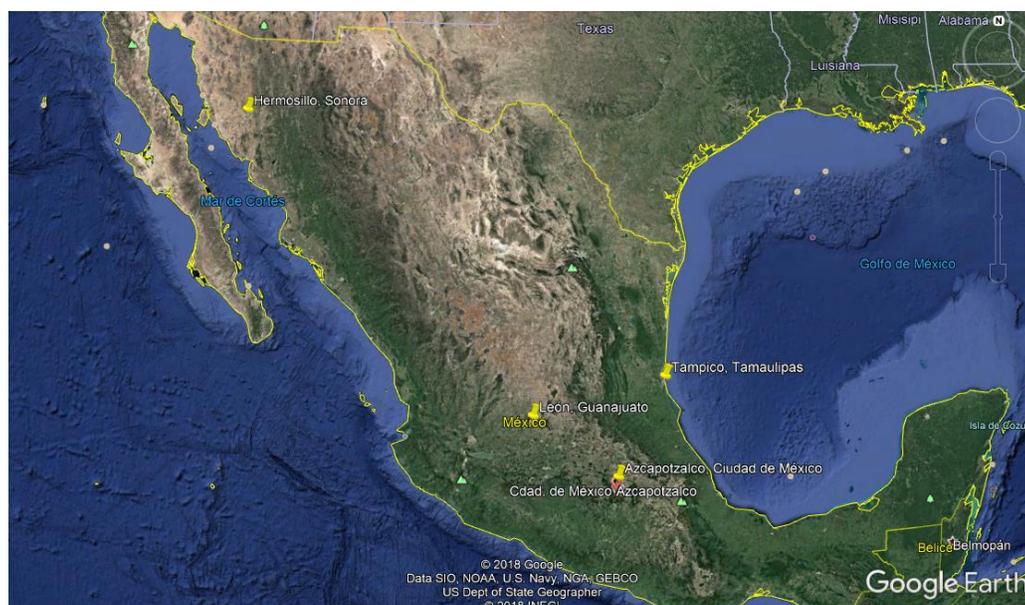


Figura 5.12 Adaptado de Google Earth.

5.5.6 Experimento 6: Problema de diversidad máxima multiobjetivo

La consideración del índice de resiliencia municipal desarrollado por el CENAPRED durante el desarrollo de los resultados ha sido de poca utilidad hasta ahora, ya que todos los sitios



considerados en el ejemplo de aplicación se encuentran en un nivel de resiliencia clasificado como muy alto.

Es por ello, que en este experimento se plantea la inclusión del índice de nivel de resiliencia municipal como una restricción adicional en el modelo de diversidad máxima. De acuerdo con Pliego Martínez (2012), una de las formas de solucionar un problema multiobjetivo es la formulación de uno o varios de los objetivos como restricciones. Este experimento considera el segundo planteamiento del modelo de diversidad máxima de manera que en los resultados se maneje un nivel deseado de resiliencia municipal y las vulnerabilidades de los sitios localizados.

En este caso, se propone que se requiere un nivel de resiliencia mínimo de 340 al requerirse localizar 4 almacenes, recordando que, de acuerdo con la estratificación realizada por la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos del CENAPRED (2015), la resiliencia se mide en una escala de 0 a 100. La formulación de este experimento se muestra en el Anexo 5 de esta investigación. Los resultados arrojados bajo las condiciones de este experimento son:

$$Z = 1.246641, x_{\text{Ciudad de México}} = 1, x_{\text{Ciudad Juárez}} = 1, x_{\text{Hermosillo}} = 1, x_{\text{Progreso}}$$

Tabla 5.20 Valoraciones de los criterios para la solución del problema de diversidad máxima multiobjetivo

Ubicación	Inundación	Sequía	Tormenta eléctrica	Granizo	Ondas Cálidas	Ciclones Tropicales	Bajas Temperaturas	Nevadas	Sismos	Laderas
Ciudad de México	-1	0.33	-0.33	-0.33	1	1	0	1	-0.33	-0.33
Ciudad Juárez	-0.33	-0.33	0.33	0	0	1	-1	-1	0	-1
Hermosillo	0	-0.33	0.33	0	-1	0	0.33	0.33	-0.33	-1
Progreso	1	0	0.33	1	-0.33	-0.33	1	1	0.33	0

Tabla 5.20 Tomado de Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos.

En la Figura 5.13 se muestra la dispersión geográfica de los sitios seleccionados.

Figura 5.13 Localización de los almacenes bajo el modelo multiobjetivo





Figura 5.13 Adaptado de Google Earth.

Con los hallazgos arrojados en este capítulo, en las conclusiones se analiza la importancia y la aportación que esta investigación puede brindar en el cuerpo del conocimiento del problema de localización de almacenes, la resiliencia y la diversidad como enfoque de solución.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



A través de este trabajo de investigación se ha dejado clara la importancia en la adopción de estrategias que permitan mejorar la capacidad de resiliencia por parte de las empresas. A pesar de que diferentes estudios acerca de este tema han determinado diferentes tipos de causas que provocan afectaciones en las actividades laborales (causas de disrupción), sin menospreciarlas, los fenómenos naturales conforman el riesgo de mayor impacto debido a su magnitud, así como la imposibilidad de predecir en qué momento específico ocurrirán, por lo que son eventos que requieren una atención prioritaria. En el año pasado (2017), México sufrió de las terribles consecuencias ocasionadas por de estos eventos disruptivos, como son: las inundaciones ocurridas en la Ciudad de México y estados federativos aledaños en los meses de julio y agosto de 2017, los huracanes que azotaron mayormente a los estados litorales y finalizando con el terremoto ocurrido el 7 de septiembre en Oaxaca y Chiapas, así como el temblor del 19 de septiembre que provocó grandes afectaciones en los estados de Morelos, Puebla, Estado de México y Ciudad de México.

El marco teórico con respecto a este tema avala el enfoque que este trabajo adoptó, prueba de ello se encuentran los estudios de las disrupciones sufridas en Japón y Tailandia estudiadas por Abe y Ye (2013) y los fenómenos naturales ocurridos en India abordados por Prasad, Su, Altay y Tata (2014). Identificando que esta problemática permanecerá, incluso se intensificará de acuerdo con los estudios del Banco Mundial (2012), se requiere que se puedan plantear métodos de solución o de mitigación que permitan que las empresas puedan resistir y sobreponerse a los efectos de los desastres naturales. Debe recordarse que las empresas han constituido su funcionamiento a través de los sistemas de cadena de suministro, por ende, si cualquiera de los componentes de la cadena de suministro presenta afectaciones, perjudicará a las demás actividades.

Teniendo en cuenta que durante la revisión de la literatura se identifica que diferentes investigadores han dedicado sus esfuerzos hacia la formulación de metodologías de mitigación que puedan conducir la construcción de políticas empresariales, se logra identificar que aún existe una brecha en la formulación de métodos que se enfoquen en la resiliencia plenamente, es decir, que se considere desde la planeación de la cadena de suministro. Por ello, esta investigación se concentró en la localización de instalaciones, una decisión estratégica que puede contemplar la problemática de los desastres naturales desde el punto de vista de una cultura de prevención; con esto, se puede establecer que se puede construir una estrategia resiliente a los desastres naturales desde el problema de localizar las instalaciones que conformarán la cadena de suministro.

Si bien las investigaciones de Medal (2012) y Ye, Zhao, Xi, y Dessouky (2015) representan esfuerzos por dar solución a problemas de localización de instalaciones ante eventos disruptivos, aún se requiere mayor investigación al respecto. Este trabajo aporta otro enfoque para apoyar las decisiones que requieren resiliencia ante los fenómenos naturales, basado en



la propuesta de Kleindorfer y Saad (2005) que consiste en localizar instalaciones persiguiendo la diversidad entre ellas, teniendo en cuenta la teoría de la cartera, con el fin de disminuir el riesgo de someterse a las mismas condiciones que pueden provocar interrupciones simultáneas que afectarán a la cadena de suministro, por completo.

A partir del enfoque de diversidad para definir la resiliencia de la cadena de suministro, el primer modelo de diversidad máxima permitió considerar criterios relacionados a la resiliencia ante los fenómenos naturales para localizar almacenes, de modo que, bajo la formulación de dicho modelo, se elegirán ubicaciones con características diversas. De acuerdo con los resultados obtenidos, las ubicaciones presentaron diferentes características que garantizarán que todos los almacenes eviten verse inmersos en interrupción debido al mismo desastre natural. Con otro enfoque, el segundo modelo de diversidad máxima, donde se considera sólo el nivel de vulnerabilidad que tienen cada uno de los sitios considerados ante cada uno de los desastres naturales, los resultados sugieren una localización donde la vulnerabilidad se diversifica, es decir, se eligieron sitios que son vulnerables, pero a diferentes desastres naturales.

Como se presentó en el último capítulo de este trabajo, el problema de diversidad máxima proporciona una gran flexibilidad para conceptualizar la resiliencia a través de la diferencia de características de los sitios, sin embargo, la construcción de los criterios y la forma en cómo se consideran las vulnerabilidades de los desastres naturales son la clave para que las soluciones sean válidas, de acuerdo con el objetivo. Como se experimentó en la validación y en los escenarios, la determinación de los criterios, así como la forma en que se evalúan dentro de la medida de la similitud del coseno $[-1,1]$, repercuten directamente en la forma en que el modelo hallará soluciones. La forma en que se formuló el primer modelo de esta investigación permitió que, a pesar de disminuir la diversidad de fenómenos naturales considerados, la solución mantuvo la suficiente diversidad para considerar la solución como válida. Por el otro lado, el segundo modelo arroja resultados donde un solo desastre natural puede repercutir en una localización no dispersa. Otro hallazgo durante los experimentos del modelo recayó en la sensibilidad del modelo cuando se modifica el número de almacenes o el número de ciudades que se consideran como candidatas para localizar los almacenes, ya que provoca cambios radicales en las soluciones, sin embargo, ninguna de las soluciones obtenidas en estos escenarios careció de diversidad, por lo que pueden ser útiles.

Con los resultados obtenidos en la fase de experimentación, ahora se puede responder la pregunta de investigación presentada en el capítulo 1:

¿considerar la diversidad de características de sitios posibles para localizar almacenes aumentará la resiliencia en una cadena de suministro establecida en México?



Sí, considerando el índice de resiliencia municipal hacia los desastres naturales construido por el CENAPRED, ya que permite considerar un nivel de resiliencia deseado a partir de las características sociodemográficas del entorno en que se localizarán los almacenes; la propuesta de este trabajo, basado en el marco teórico desarrollado en el capítulo 2, puede considerarse como una buena aproximación para conseguir que una empresa sea resiliente desde la localización de sus almacenes o bien fortalecerse a partir de otras mediciones de resiliencia, por ejemplo, las consideradas por (Munoz & Dunbar, 2015) si es que ya se cuenta con otras medidas resilientes a través de la cadena de suministro. Además, partiendo de los determinantes de la resiliencia en la cadena de suministro definidos por Craighead, Blackhurst, Rungtusanatham y Handfiel (2007): densidad, complejidad y números de nodos críticos, debe entenderse que incorporar o aumentar la resiliencia mediante la localización de almacenes obedece a la idea de que la dispersión en las ubicaciones de los almacenes, la redundancia en el número de almacenes a localizar y la flexibilidad referente a la necesidad de contar con capacidad extra dentro de los almacenes son estrategias que se han adaptado en el desarrollo del modelo de diversidad máxima por lo que, en todo momento, se ha seguido el objetivo de mejorar la resiliencia. En el segundo modelo, los resultados obtenidos proporcionan una localización que evita que dos almacenes se vean afectados por los mismos desastres naturales al mismo tiempo.

Tomando en cuenta que este trabajo propone la aplicación de la formulación de diversidad máxima (método que se ha utilizado en escasas ocasiones para resolver problemas de investigación de operaciones, sobre todo en problemas de localización) para resolver el problema de almacenes, los hallazgos encontrados constituyen una aportación teórica al cuerpo del conocimiento en la localización de almacenes, y en general a la localización de instalaciones, considerando como objetivo la resiliencia. Este trabajo pretende que se pueda considerar para casos de aplicación, ya sea como un modelo base o que forme parte de una estrategia resiliente.

Se entiende que la propuesta de métodos poco conocidos y poco utilizados, como lo es el problema de diversidad máxima, pueden producir escepticismo o desaprobación por parte de los decisores, sin embargo, este trabajo se ha desarrollado lo más detalladamente posible, con el fin de exponer que los paradigmas y la funcionalidad de este método sirven para tomar una decisión tan importante como es la localización de instalaciones y, en particular, de almacenes. Si bien, los costos definen en gran medida la mayoría de los problemas en las empresas y definen la mayoría de los planteamientos del problema de localización de instalaciones y almacenes, la resiliencia no se desvía de este objetivo ya que evitar las interrupciones puede representar un mayor ahorro económico.

El enfoque resiliente basado en la diversidad es una propuesta interesante que no ha sido explorada completamente en el ámbito empresarial; la diversidad es un enfoque que ha sido



empleado en otros campos del conocimiento que, por lo general, significa la supervivencia y el fortalecimiento de una entidad. Por ejemplo, desde el punto de vista biológico, la diversidad es un objetivo que todo organismo busca para asegurar la supervivencia como es el caso de la reproducción sexual. Recordando que algunos algoritmos empleados en la investigación de operaciones se han basado en comportamientos observados en distintos animales, la diversidad puede representar una propuesta que fortalezca la gama de opciones para resolver problemas.

Uno de los hallazgos más importantes de este trabajo reside en la conceptualización del problema de diversidad máxima, ya que se puede pensar en este método como un acercamiento hacia decisiones multicriterio. La forma en que se mide la diversidad en este modelo admite la incorporación de varios criterios para calificarla, por lo que se pueden tomar decisiones considerando varios criterios que los mismos decisores pueden definir; además, admite la consideración de criterios cualitativos que, por lo general, representan un desafío dentro de las formulaciones de varios métodos de la investigación de operaciones. Sin embargo, al contrario de varios métodos multicriterio que buscan jerarquizar las opciones de solución, el problema de diversidad máxima sostiene el paradigma de que las disimilitudes entre un conjunto de opciones determinarán la mejor solución para un problema, como el caso de localización de almacenes de este trabajo, por lo que se puede establecer el modelo sigue un enfoque sistémico para proporcionar soluciones resilientes.

Uno de los temas pendientes para robustecer aún más el planteamiento del problema de diversidad máxima en la localización de almacenes consiste en la experimentación en los criterios considerados. Por ejemplo, como trabajo futuro se considera armar escenarios en los que se combinen criterios que persigan la resiliencia de los almacenes con criterios ajenos a este objetivo, por ejemplo, criterios relacionados con costos o con el desempeño deseado en los almacenes requeridos.

Finalmente, el desarrollo de este tipo de investigaciones permite disminuir la *brecha* que se percibe entre las investigaciones realizadas por las universidades y las necesidades que presentan las empresas, por lo que es importante resaltar que el objetivo de concretar investigaciones está en función de resolver problemas del mundo real, por lo que ambos persiguen una meta en común, sobre todo cuando se trata de decisiones estratégicas que implican grandes inversiones de recursos.

REFERENCIAS

Abe, M. y Ye, L. (2013). Building Resilient Supply Chains against Natural Disasters: The Cases of Japan and Thailand. *Global Business Review*, 14(4), 567–586.



<https://doi.org/10.1177/0972150913501606>

- American Production and Inventory Control Society. (n.d.). About APICS | Supply Chain Certification and Membership. Retrieved May 15, 2017, from <http://www.apics.org/about/overview>
- Animal Político. (2017). Sismo de 7.1 deja 369 muertos en CDMX, Morelos, Puebla, Edomex y Guerrero. Retrieved January 8, 2018, from <http://www.animalpolitico.com/2017/10/sismo-muertos-cdmx-morelos-puebla-edomex-guerrero/>
- Bank, W. (2012). Disaster Risk Management in Mexico: from Response to Risk Transfer. In *Improving the Assessment of Disaster Risks to Strengthen Financial Resilience* (pp. 210–221).
- Bhatia, G., Lane, C. y Wain, A. (2013). *Building Resilience in Supply Chains*. *World Economic Forum*. Retrieved from http://www3.weforum.org/docs/WEF_RRN_MO_BuildingResilienceSupplyChains_ExecutiveSummary_2013.pdf
- Blyde, J. S. (2014). The participation of Mexico in global supply chains: the challenge of adding Mexican value. *Applied Economics Letters*, 21(7), 501–504. <https://doi.org/10.1080/13504851.2013.870647>
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... Von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733–752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- Business Continuity Institute. (n.d.). About the BCI. Retrieved May 15, 2017, from <http://www.thebci.org/index.php/about/generalinfo>
- Campos Cortés, J. (2016). *Administración del Riesgo dentro de la Cadena de Suministro*. Ciudad de México.
- Caws, P. (2015). General Systems Theory: Its Past and Potential. *Systems Research and Behavioral Science*, 32(5), 514–521. <https://doi.org/10.1002/sres.2353>
- Cedillo Campos, M. G. (2011). *Evaluación del Riesgo en las Cadenas de Suministro*. *México Logístico* (Vol. GC-74-78/2).
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (n.d.). Indicadores Municipales de Peligro, Exposición y Vulnerabilidad. Retrieved May 18, 2018, from <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/indicadores-municipales.html>
- Christopher, M. (2011). *Logistics & Supply Chain Management*. *Logistics and Supply Chain Management: Creating Value-adding Networks* (Fourth). Dorchester, Dorset: Financial Times Prentice Hall. <https://doi.org/10.1007/s12146-007-0019-8>
- Craighead, C. W., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M. J., & Handfiel, R. B. (2007). The Severity of Supply Chain Disruptions : Design Characteristics and Mitigation Capabilities. *Decision Sciences*, 38(1), 131–156. <https://doi.org/10.1080/00207540500151549>
- Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos. (2015). *Índice de Resiliencia a nivel municipal*. Ciudad de México, México.



- Expansión. (2017). 5 desastres naturales que golpearon a México durante septiembre. Retrieved January 8, 2018, from <http://expansion.mx/nacional/2017/09/28/5-desastres-naturales-que-golpearon-a-mexico-durante-septiembre>
- Falasca, M., Zobel, C. W. y Cook, D. (2008). A Decision Support Framework to Assess Supply Chain Resilience. In F. Friedrich & B. Van de Walle (Eds.), *5th. International ISCRAM Conference* (pp. 596–605). Washington, DC: ISCRAM.
- García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Nava Sánchez, S. y Vázquez Bravo, F. (2016). *Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2016*. Ciudad de México. Retrieved from <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/340-NO.17-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2015.PDF>
- Glover, F., Kuo, C.-C. y Dhir, K. S. (1998). Heuristic algorithms for the maximum diversity problem. *Journal of Information and Optimization Sciences*, *19*(1), 109–132. <https://doi.org/10.1080/02522667.1998.10699366>
- Goble, G., Fields, H. y Cocciara, R. (2002). Resilient infrastructure: Improving your business resilience. *IBM Global Services*, (September), 1–20.
- Google. (n.d.). Google Earth. Retrieved October 30, 2017, from <https://earth.google.com/web/@23.74048475,-104.71538814,4485.30127318a,3103510.96328348d,35y,-0h,0t,0r>
- Hillier, F. S. (Stanford U. y Lieberman, G. J. (Stanford U. (2013). *Introducción a la Investigación de operaciones*. (M. I. Rocha Martínez, Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Novena edi, Vol. 53). Ciudad de México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *4*(1), 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Kim, C.-R. (2012). Toyota: supply chain will be ready by autumn for next big quake. Retrieved April 27, 2017, from <http://www.reuters.com/article/us-toyota-supply-chain-idUSTRE8210CA20120302>
- Kleindorfer, P. R. y Saad, G. H. (2005). Managing Disruption Risks in Supply Chains. *Production and Operations Management Society*, *14*(1), 53–68.
- Korpela, J. y Tuominen, M. (1996). A decision aid in warehouse site selection. *International Journal of Production Economics*, *45*(1–3), 169–180. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00135-2](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00135-2)
- Kuo, C., Glover, F. y Dhir, K. S. (1993). Analyzing and Modeling the Maximum Diversity Problem by Zero-One Programming. *Decision Sciences*, *24*(6), 1171–1185. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1993.tb00509.x>
- Landry, M., Malouin, J.-L., & Oral, M. (1983). Model validation in operations research. *European Journal of Operational Research*, *14*(3), 207–220. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90257-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90257-6)
- Landry, M. y Oral, M. (1993). In search of a valid view of model validation for operations research. *European Journal of Operational Research*, *66*(2), 161–167. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90310-J](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90310-J)



- Lezama-Leguizamón, I. B. (2008). *Identificación de variables relevantes en modelos de toma de decisiones con diagramas de influencia*. Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from <http://oa.upm.es/1090/>
- LINGO: *The Modeling Language and Optimizer*. (2016). Chicago, Illinois: LINDO Systems Inc. Retrieved from <http://www.lindo.com>
- Medal, H. R. (2012). *Locating and Protecting Facilities subject to Random Disruptions and Attacks*. University of Arkansas.
- Mensah, P., Merkurjev, Y. y Longo, F. (2015). Using ICT in Developing a Resilient Supply Chain Strategy. *Procedia Computer Science*, 43, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.12.014>
- Miguel Llovera. (2017). El impacto económico de los desastres naturales. Retrieved January 21, 2018, from <https://www2.deloitte.com/mx/es/pages/dnoticias/articles/impacto-economico-desastres-naturales.html>
- Miser, H. J. (1993). A foundational concept of science appropriate for validation in operational research. *European Journal of Operational Research*, 66(2), 204–215. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90313-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90313-C)
- Mota Palomino, R., Cruz Reyna, S. de la, D’Luna Fuentes, A., Palacio Aponte, Á. G., Mitre-Salazar, L. M., Ortiz Pérez, M. A., ... Vidal Zepeda, R. (1992). Zonas Susceptibles a Desastres por Fenómenos Naturales. In I. de Geografía (Ed.), *Atlas Nacional de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/map.MAP01000015157>
- Munoz, A. y Dunbar, M. (2015). On the quantification of operational supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 53(22), 6736–6751. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1057296>
- Noh de la Cruz, N. y Elizondo Cortés, M. (2017). *LINGO* (El Software Volandero No. 101). Ciudad de México.
- Noticieros Televisa. (2017). ¿Cuánto le han costado a México los desastres naturales? México: Noticieros Televisa. Retrieved from <http://noticieros.televisa.com/historia/nacional/2017-09-23/cuanto-le-han-costado-mexico-desastres-naturales/>
- Ortiz Adame, J. (2013). Factores que afectan a la Inversión Extranjera Directa (pp. 89–122). Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Jurídicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://biblio.juridicas.unam.mx>
- Papadakis, I. S. (2006). Financial performance of supply chains after disruptions: an event study. *Supply Chain Management: An International Journal*, 11(1), 25–33. <https://doi.org/10.1108/13598540610642448>
- Papadakis, L. S. (2003). On the sensitivity of configure-to-order supply chains for personal computers after component market disruptions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 33(10), 934–950. <https://doi.org/10.1108/09600030310508726>
- Pliego Martínez, O. A. (2012). *Programación Lineal Multiobjetivo: Análisis, Técnicas y Casos de aplicación*. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from



http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5090/TE_SIS.pdf?sequence=1

- Prasad, S., Su, H.-C., Altay, N. y Tata, J. (2014). Building disaster-resilient micro enterprises in the developing world. *Disasters*, 39(3), 447–466. <https://doi.org/10.1111/disa.12117>
- ProMéxico: Mapa de Inversión en México - Parques industriales en México. (n.d.). Retrieved January 3, 2018, from http://mim.promexico.gob.mx/swb/mim/Parques_industriales_en_Mexico
- Ramírez Estrada, C., Rubio Cortés, J. R. y Calderón Ortega, V. I. (2016). *Cadenas Globales de Valor: Un Modelo para la Integración de Empresas Mexicanas*. (F. Zúñiga Anaya, Ed.) (Primera ed). Ciudad de México: Secretaría de Economía.
- Rose, A. y Liao, S. Y. (2005). Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions. *Journal of Regional Science*, 45(1), 75–112. <https://doi.org/10.1111/j.0022-4146.2005.00365.x>
- Saboonchi, B. (2013). *Variable Neighborhood Search Methods for the Dispersion Graph Problems, With Application to Franchise Location Problems*. Université de Montréal.
- Sandoya, F. (2012). Algoritmo grasp híbrido para resolver una nueva variante del problema de la diversidad máxima, (September). <https://doi.org/10.13140/2.1.4290.0480>
- Sandoya Sánchez, F. F. (2013). *Un modelo para el Problema de la Diversidad Máxima. Un estudio para la selección de lo mejor y lo más diverso*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/tes.TES01000695172>
- Sarah Romero. (2017). ¿Cómo funciona la escala de Richter? Retrieved January 8, 2018, from <https://www.muyinteresante.es/ciencia/preguntas-respuestas/como-funciona-la-escala-de-richter-501481801518>
- Sheffi, Y. y Rice Jr., J. B. (2005). Building the Resilient Enterprise. *MIT Sloan Management Review*, 47(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79933-9>
- Stock, J. R. y Lambert, D. M. (2013). *Strategic Logistics management. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* (Vol. 27). McGraw-Hill International Edition. <https://doi.org/10.1108/09600039710757736>
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 451–488. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>
- Transparencia Presupuestaria. (2018). Fuerza México. Retrieved January 7, 2018, from <http://www.transparenciapresupuestaria.gob.mx/es/PTP/fuerzamexico>
- Ye, F., Zhao, Q., Xi, M. y Dessouky, M. (2015). Chinese National Emergency Warehouse Location Research based on VNS Algorithm. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 47, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2014.11.009>



	El Salto	Guadalajara	Guaymas	Hermosillo	Irapuato	Lázaro Cárdenas	León	Manzanillo
Aguascalientes	0.788476644	-0.155005168	-0.23177395	-0.667805893	-0.155005168	0.592763676	0.074200655	-0.248604293
Altamira	-0.498106731	-0.335821828	-0.213533385	0.945751933	-0.335821828	-0.982395689	0.154311381	-0.300052805
Cancún	-0.474494616	-0.113409436	0.146918375	0.646843844	-0.113409436	-0.360661881	0.310955564	0.07971179
Chihuahua	-0.788476644	0.155005168	0.23177395	0.667805893	0.155005168	-0.592763676	-0.074200655	0.248604293
Ciudad de México	-0.362234301	-0.214209829	0.115357116	0.945751933	-0.214209829	-0.863493204	0.154311381	0.016538344
Ciudad Juárez	-0.452415592	0.238521892	0.504950495	0.499231866	0.238521892	-0.323220425	-0.055470207	0.505128571
Ciudad Victoria	0.196168859	-0.553254632	-0.19906194	0.132289777	-0.553254632	-0.036308301	-0.634934381	-0.21320845
Coahuila	0.167125084	-0.747922725	-0.489493575	0.413850574	-0.747922725	-0.463421754	-0.413850574	-0.556858818
El Salto		0.132704775	-0.167331794	0.486098076	0.132704775	-0.622370801	-0.208327747	-0.089485651
Guadalajara			-0.793223965	0.310771334	-1	-0.245765342	-0.310771334	-0.8703518
Guaymas				0.055470207	-0.793223965	-0.211028212	-0.499231866	-0.981664959
Hermosillo					0.310771334	0.909580194	-0.243085338	0.160187448
Irapuato						-0.245765342	-0.310771334	-0.8703518
Lázaro Cárdenas							0.048219214	-0.264848849
León								-0.373770712
Manzanillo								
Mexicali								
Monterrey								
Nogales								
Nuevo Laredo								
Pachuca								
Progreso								
Puebla								
Querétaro								
Ramos Arizpe								
San Luis Potosí								
Tampico								
Tijuana								
Toluca								
Topolobampo								
Torreón								
Zacatecas								



	Mexicali	Monterrey	Nogales	Nuevo Laredo	Pachuca	Progreso	Puebla	Querétaro
Aguascalientes	-0.456925788	0.149603539	-0.570473661	0.209762267	-0.017716361	0.514938654	-0.017716361	0.067919782
Altamira	0.60623846	0.192131544	0.611618285	0.243374139	-0.209762267	-0.924705867	-0.209762267	-0.239087148
Cancún	0.323220425	-0.305927689	0.641446643	0.15892513	0.113950411	-0.423448355	0.113950411	0.163387352
Chihuahua	0.456925788	-0.149603539	0.570473661	-0.209762267	0.017716361	-0.514938654	0.017716361	-0.067919782
Ciudad de México	0.277347959	-0.055601662	0.363885079	0.026503444	-0.209762267	-0.688675562	-0.209762267	-0.363885079
Ciudad Juárez	0.00990099	-0.361675919	0.176632425	-0.375524228	0.013244226	-0.146918375	0.013244226	-0.176632425
Ciudad Victoria	-0.384105433	0.41284258	-0.339451872	0.303334868	-0.848003415	0.163387352	0.652157418	-0.930832989
Coahuila de Zaragoza	-0.044499416	0.622490197	-0.118449552	0.514053278	-0.851213096	-0.304945921	0.339294731	-0.889631739
El Salto	0.861448866	0.196168859	0.813912984	-0.049500336	0.04974093	-0.69520534	0.04974093	0.119723023
Guadalajara	0.127581477	0.703356877	0.200712273	0.945751933	-0.816207202	-0.310955564	0.667805893	-0.621677129
Guaymas	0.485148515	0.922413777	0.384105433	0.866405573	-0.675455513	-0.387330262	0.648967061	-0.384105433
Hermosillo	-0.499231866	-0.006628626	-0.621677129	-0.214209829	0.155005168	0.844389972	0.155005168	0.200712273
Irapuato	0.127581477	0.703356877	0.200712273	0.945751933	-0.816207202	-0.310955564	0.667805893	-0.621677129
Lázaro Cárdenas	0.681167012	0.233311088	0.641446643	0.15892513	-0.19970801	-0.937213526	-0.19970801	-0.236003953
León	0.055470207	0.760595531	-0.132289777	0.214209829	-0.748610406	0.113409436	0.735402689	-0.703356877
Manzanillo	0.447944205	0.866328004	0.391331965	0.92850986	-0.675693719	-0.43455782	0.59920009	-0.391331965
Mexicali		-0.384105433	-0.922413777	-0.277347959	-0.013244226	0.857469063	-0.013244226	-0.19906194
Monterrey			-0.196894154	-0.683900446	0.818000198	0.299210653	-0.682160635	0.622439582
Nogales				-0.363885079	-0.067919782	0.841142295	-0.067919782	-0.270284861
Nuevo Laredo					0.64970817	0.333742772	-0.663563183	0.363885079
Pachuca						-0.121882989	0.771636106	-0.929687172
Progreso							-0.121882989	-0.036308301
Puebla								0.570473661
Querétaro								
Ramos Arizpe								
San Luis Potosí								
Tampico								
Tijuana								
Toluca								
Topolobampo								
Torreón								
Zacatecas								



	Ramos Arizpe	San Luis Potosí	Tampico	Tijuana	Toluca	Topolobampo	Torreón	Zacatecas
Aguascalientes	-0.807068828	-0.600476877	-0.074200655	-0.013244226	0.179606756	0.518381035	-0.059525391	-0.209762267
Altamira	0.663563183	0.50041496	-0.154311381	0.277347959	0.303334868	-1	0.072805829	-0.243374139
Cancún	0.592763676	0.568830041	-0.310955564	-0.387330262	-0.233311088	-0.394955435	-0.463421754	-0.15892513
Chihuahua	0.807068828	0.600476877	0.074200655	0.013244226	-0.179606756	-0.518381035	0.059525391	0.209762267
Ciudad de México	0.518381035	0.252681754	-0.154311381	0.277347959	0.055601662	-0.890749349	0.072805829	-0.026503444
Ciudad Juárez	0.456925788	0.19906194	0.055470207	0.00990099	-0.384105433	-0.277347959	0.044499416	0.375524228
Ciudad Victoria	-0.179606756	-0.364857569	0.634934381	-0.384105433	0.438248277	-0.055601662	0.622490197	0.808698377
Coahuila	-0.059525391	-0.219257681	0.413850574	-0.044499416	0.723298326	-0.514053278	0.6	0.36844162
El Salto	0.96903622	0.898150819	0.208327747	0.037184843	0.111931024	-0.498106731	0.167125084	0.049500336
Guadalajara	0.006603858	0.075051122	0.310771334	-0.610172281	0.829018028	-0.335821828	0.249307575	0.154311381
Guaymas	0.205285499	0.361675919	0.499231866	-0.504950495	0.944843291	-0.213533385	0.400494744	0.115357116
Hermosillo	-0.667805893	-0.496015978	0.243085338	-0.127581477	-0.132289777	0.945751933	0.084764575	0.214209829
Irapuato	0.006603858	0.075051122	0.310771334	-0.610172281	0.829018028	-0.335821828	0.249307575	0.154311381
Lázaro Cárdenas	0.750772054	0.568830041	-0.048219214	0.323220425	0.305927689	-0.982395689	0.175283876	-0.15892513
León	0.074200655	-0.006628626	1	-0.316180182	0.634934381	0.154311381	0.912465724	0.885853485
Manzanillo	0.172110664	0.326559777	0.373770712	-0.505128571	0.931100192	-0.300052805	0.299847056	0.016538344
Mexicali	-0.893985237	-0.944843291	-0.055470207	-0.00990099	-0.361675919	0.60623846	-0.044499416	0.277347959
Monterrey	-0.179606756	-0.222299851	-0.760595531	0.361675919	-0.974594303	0.192131544	-0.723298326	-0.428132799
Nogales	-0.899683956	-0.974594303	0.132289777	0.19906194	-0.222299851	0.611618285	0.219257681	0.363885079
Nuevo Laredo	-0.078435132	-0.252681754	-0.214209829	0.704414729	-0.79510377	0.243374139	-0.072805829	0.026503444
Pachuca	-0.017716361	-0.097922998	0.748610406	-0.456925788	0.848003415	-0.209762267	0.732162313	0.663563183
Progreso	0.828597075	0.768525694	-0.113409436	0.146918375	0.371827254	-0.924705867	0.016808043	-0.333742772
Puebla	-0.017716361	-0.097922998	-0.735402689	0.867496786	-0.652157418	-0.209762267	-0.458345513	-0.64970817
Querétaro	-0.097922998	-0.295690559	0.703356877	-0.19906194	0.647845279	-0.239087148	0.78882361	0.748148166
Ramos Arizpe		-0.929687172	-0.074200655	-0.013244226	-0.149603539	0.663563183	-0.059525391	0.078435132
San Luis Potosí			0.006628626	0.176632425	-0.196894154	0.50041496	0.118449552	0.252681754
Tampico				0.316180182	-0.634934381	-0.154311381	-0.912465724	-0.885853485
Tijuana					0.384105433	0.277347959	-0.044499416	0.277347959
Toluca						0.303334868	-0.622490197	-0.316929475
Topolobampo							0.072805829	-0.243374139
Torreón								-0.809689069
Zacatecas								



ANEXO 2. “DISTANCIAS” CALCULADAS EN SEGUNDO MODELO CONSIDERADO

En este anexo se presentan los cálculos de las “distancias” consideradas en el modelo donde se consideran sólo las vulnerabilidades de los sitios frente a los desastres naturales, los cuales se requieren variar mediante el problema de diversidad máxima:

	Aguascalientes	Altamira	Cancún	Chihuahua	Ciudad de México	Ciudad Juárez	Ciudad Victoria	Coahuila de Zaragoza
Aguascalientes		-0.596868194	-0.196966504	-0.428578417	-0.618068878	-0.202023558	-0.603726652	-0.803876126
Altamira			-0.624244747	-0.146068733	-0.421206683	0	-0.855469725	-0.708159024
Cancún				0.549859879	0.072766233	0.610229388	-0.405782225	-0.296701803
Chihuahua					-0.314051852	-0.935134153	-0.239245888	-0.237554938
Ciudad de México						-0.099723449	-0.321435012	-0.698952036
Ciudad Juárez							-0.127119319	-0.046055471
Ciudad Victoria								-0.670555904
Coahuila de Zaragoza								
El Salto								
Guadalajara								
Guaymas								
Hermosillo								
Irapuato								
Lázaro Cárdenas								
León								
Manzanillo								
Mexicali								
Monterrey								
Nogales								
Nuevo Laredo								
Pachuca								
Progreso								
Puebla								
Querétaro								
Ramos Arizpe								
San Luis Potosí								
Tampico								
Tijuana								
Toluca								
Topolobampo								
Torreón								
Zacatecas								



	El Salto	Guadalajara	Guaymas	Hermosillo	Irapuato	Lázaro Cárdenas	León	Manzanillo
Aguascalientes	-0.657666941	-0.561278011	-0.713269186	-0.4118826	-0.6750512	-0.3296842	-0.5681263	-0.3348846
Altamira	-0.523879238	-0.568209174	-0.595322889	-0.3958897	-0.729884	-0.5363821	-0.5475922	-0.6133518
Cancún	-0.027871995	0.124239378	-0.428305053	-0.2288719	-0.0902943	-0.6708204	0.05210118	-0.6548246
Chihuahua	-0.255605981	-0.401495656	-0.154291343	-0.2302856	-0.3183236	0.25896727	-0.3488364	0.19593014
Ciudad de México	-0.924150109	-0.778479481	-0.262048792	0.13200954	-0.7888286	-0.0663989	-0.516736	-0.2713089
Ciudad Juárez	-0.055611132	-0.277633511	0.033815299	-0.1681121	-0.1622461	0.34163647	-0.3307378	0.30097745
Ciudad Victoria	-0.402807563	-0.645314259	-0.595334481	-0.4875395	-0.7072511	-0.4752372	-0.6117567	-0.5177269
Coahuila	-0.829666117	-0.788157901	-0.632886125	-0.4508974	-0.7924418	-0.4894646	-0.5472381	-0.597547
El Salto		-0.813981482	-0.436216211	-0.1439513	-0.8790381	-0.2206991	-0.6304238	-0.3718311
Guadalajara			-0.294073384	-0.1640341	-0.9022008	-0.1538351	-0.7409594	-0.3122818
Guaymas				-0.8235803	-0.4831936	-0.7951685	-0.3958897	-0.6961257
Hermosillo					-0.2411486	-0.675655	-0.2642638	-0.5276818
Irapuato						-0.2447323	-0.8656648	-0.3475222
Lázaro Cárdenas							-0.1330873	-0.9448682
León								-0.1256751
Manzanillo								
Mexicali								
Monterrey								
Nogales								
Nuevo Laredo								
Pachuca								
Progreso								
Puebla								
Querétaro								
Ramos Arizpe								
San Luis Potosí								
Tampico								
Tijuana								
Toluca								
Topolobampo								
Torreón								
Zacatecas								



	Mexicali	Monterrey	Nogales	Nuevo Laredo	Pachuca	Progreso	Puebla	Querétaro
Aguascalientes	-0.4252366	-0.8617133	-0.4556948	-0.7631469	-0.7868166	-0.3407016	-0.7876316	-0.7290406
Altamira	-0.3764992	-0.591364	0	-0.8286167	-0.4604901	-0.2998467	-0.4212067	-0.4709076
Cancún	-0.0245514	-0.061854	0.40179457	-0.3529141	0.11686019	-0.7254486	0.12201207	0.20384292
Chihuahua	-0.6039556	-0.5365654	-0.723419	-0.4130031	-0.5357261	0.48969862	-0.4295034	-0.5866873
Ciudad de México	-0.3212227	-0.392088	0.07276623	-0.3509922	-0.6841192	0.26901456	-0.9012213	-0.6308785
Ciudad Juárez	-0.5544406	-0.4366755	-0.6591929	-0.3215117	-0.411477	0.58233501	-0.2009579	-0.5144404
Ciudad Victoria	-0.2474057	-0.6999117	-0.1255491	-0.9048134	-0.565688	-0.243713	-0.4851987	-0.6611207
Coahuila	-0.4793477	-0.6929424	0	-0.7216712	-0.5793727	-0.1833248	-0.698952	-0.7384984
El Salto	-0.358262	-0.5087331	0.08115669	-0.4773	-0.570818	0.16313315	-0.8139815	-0.6660099
Guadalajara	-0.3212227	-0.5881468	-0.0272177	-0.5865771	-0.7121269	0.27124187	-0.7784795	-0.8649969
Guaymas	-0.494118	-0.5654942	-0.2966792	-0.6795	-0.3062798	-0.4283051	-0.459078	-0.3579499
Hermosillo	-0.494118	-0.4786009	-0.3624921	-0.5750887	0	-0.2946848	-0.0650196	-0.2691353
Irapuato	-0.2736191	-0.692046	-0.0699477	-0.7205941	-0.7102893	0.09029429	-0.7888286	-0.7989664
Lázaro Cárdenas	-0.4472136	-0.1458443	0.18035343	-0.4244256	0	-0.4472136	-0.1558273	-0.0601665
León	-0.1986428	-0.7583818	-0.2775498	-0.7105852	-0.7208157	0.09894941	-0.61672	-0.8082828
Manzanillo	-0.5291495	-0.1103433	0.33936096	-0.4346827	-0.0725586	-0.2739908	-0.2713089	-0.1416149
Mexicali		-0.3300768	-0.2722969	-0.4355719	-0.2886751	0.25	-0.3212227	-0.3715113
Monterrey			-0.5619253	-0.8852059	-0.7622797	-0.2288719	-0.5891172	-0.8471333
Nogales				-0.3175404	-0.4347439	-0.0491027	-0.2256934	-0.3414217
Nuevo Laredo					-0.6392461	-0.2360629	-0.5096154	-0.7470883
Pachuca						0.02834947	-0.8564349	-0.8568093
Progreso							0.11978476	0.16666441
Puebla								-0.7658069
Querétaro								
Ramos Arizpe								
San Luis Potosí								
Tampico								
Tijuana								
Toluca								
Topolobampo								
Torreón								
Zacatecas								



	Ramos Arizpe	San Luis Potosí	Tampico	Tijuana	Toluca	Topolobampo	Torreón	Zacatecas
Aguascalientes	-0.7301071	-0.7916939	-0.5968682	-0.644794	-0.0786781	-0.525083	-0.7501012	-0.7906226
Altamira	-0.1939171	-0.6618479	-1	-0.1734852	0.20298527	-0.8151571	-0.3300768	-0.347908
Cancún	0.08658051	0.03491078	-0.6242447	0.07572856	0.78974243	-0.5945751	0.13460251	0.03491078
Chihuahua	-0.4863312	-0.6238386	-0.1460687	-0.5423831	-0.5479304	-0.1268867	-0.6874197	-0.5509018
Ciudad de México	-0.0559116	-0.593329	-0.4212067	-0.3435141	-0.3094091	-0.3512017	-0.165975	-0.2524372
Ciudad Juárez	-0.3977918	-0.514562	0	-0.5500125	-0.5961575	0.02780915	-0.635589	-0.514562
Ciudad Victoria	-0.3667319	-0.7227091	-0.8554697	-0.2444234	-0.1508405	-0.665568	-0.4875395	-0.5188813
Coahuila	-0.2810248	-0.6650632	-0.708159	-0.4286312	-0.1036634	-0.6944659	-0.4240337	-0.4930034
El Salto	-0.0926209	-0.6264249	-0.5238792	-0.2721452	-0.2465959	-0.510081	-0.2208304	-0.2805062
Guadalajara	-0.139804	-0.7507635	-0.5682092	-0.2926615	-0.5810324	-0.4038748	-0.3300092	-0.3782042
Guaymas	-0.4791284	-0.4195138	-0.5953229	-0.2931029	0.14729807	-0.8223837	-0.4358027	-0.4182691
Hermosillo	-0.405506	-0.2527192	-0.3958897	-0.1610934	0.02659324	-0.677299	-0.4358027	-0.3348717
Irapuato	-0.255203	-0.8362627	-0.729884	-0.2475163	-0.3514484	-0.5470351	-0.3935574	-0.4345031
Lázaro Cárdenas	0.0007444	-0.0278267	-0.5363821	-0.1091309	0.34205378	-0.8222832	0.02987173	-0.0278267
León	-0.4486399	-0.8532573	-0.5475922	-0.3697335	-0.4765582	-0.3255733	-0.5629076	-0.6024824
Manzanillo	0.16661801	-0.079627	-0.6133518	-0.1446467	0.28553935	-0.8699815	0.11117295	0.02707317
Mexicali	-0.1381556	-0.347908	-0.3764992	-0.61672	-0.0672069	-0.6511465	-0.3624921	-0.3167968
Monterrey	-0.8110119	-0.9186907	-0.591364	-0.6201714	-0.2724665	-0.3935936	-0.9144036	-0.9186907
Nogales	-0.8389961	-0.477095	0	-0.4204717	-0.2957512	0.05493131	-0.7907972	-0.6335936
Nuevo Laredo	-0.5744021	-0.8495914	-0.8286167	-0.5084493	-0.1109201	-0.6869682	-0.7309265	-0.7508765
Pachuca	-0.6141461	-0.8763958	-0.4604901	-0.6866911	-0.4703265	-0.1893831	-0.6874197	-0.7686235
Progreso	-0.3903563	0.03111116	-0.2998467	0.02425541	0.65329202	-0.2148784	-0.1630589	-0.2196637
Puebla	-0.3897869	-0.7200274	-0.4212067	-0.4909451	-0.4442147	-0.3512017	-0.4280238	-0.503943
Querétaro	-0.5313128	-0.8970197	-0.4709076	-0.6338842	-0.6403674	-0.2943722	-0.7158998	-0.7710661
Ramos Arizpe		-0.6381164	-0.1939171	-0.5805443	-0.1804819	-0.0596422	-0.9208961	-0.8838457
San Luis Potosí			-0.6618479	-0.5644838	-0.4028761	-0.3787818	-0.7954618	-0.8028817
Tampico				-0.1734852	0.20298527	-0.8151571	-0.3300768	-0.347908
Tijuana					-0.2456883	-0.187572	-0.7172156	-0.8122358
Toluca						0.26708197	-0.3017486	-0.2896084
Topolobampo							-0.1802813	-0.173028
Torreón								-0.959767
Zacatecas								



ANEXO 3. PROGRAMA DEL PRIMER MODELO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA

Con el fin de que esta investigación pueda ser reproducida, en este anexo se presenta el programa del primer problema de diversidad máxima planteado en este trabajo:

MODEL:

TITLE LOCALIZACIÓN DE ALMACENES MEDIANTE EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO;

SETS:

Ciudades / Aguascalientes
Altamira
Cancun
Chihuahua
Ciudad_de_Mexico
Ciudad_Juarez
Ciudad_Victoria
Coatzacoalcos
El_Salto
Guadalajara
Guaymas
Hermosillo
Irapuato
Lazaro_Cardenas
Leon
Manzanillo
Mexicali
Monterrey
Nogales
Nuevo_Laredo
Pachuca
Progreso
Puebla
Queretaro
Ramos_Arizpe
San_Luis_Potosi
Tampico
Tijuana
Toluca
Topolobampo
Torreon
Zacatecas

/: x;

Combinaciones (Ciudades,Ciudades) |&2 #GT# &1: Distancia_i_j, y_i_j;

ENDSETS

```

DATA:

    Distancia_i_j =
    @OLE('C:\Users\Alan Monterrubio Gil\Desktop\Tesis\Sitios
posibles.xlsx');

    m = 4;

ENDDATA

[Funcion_Objetivo]
MAX = @SUM(Combinaciones(i,j): Distancia_i_j(i,j) * y_i_j(i,j));

[Restriccion_Almacenes_Requeridos]
@SUM(Ciudades:x) = m;

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_1]
        x(i) + x(j) - y_i_j <= 1);

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_Ciudad_i]
        -x(i) + y_i_j <= 0);

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_Ciudad_j]
        -x(j) + y_i_j <= 0);

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_no_negatividad]
        y_i_j >= 0);

@FOR(Ciudades:
    [Restriccion_variable_binaria]
        @BIN((x)));

END

```



ANEXO 4. PROGRAMA DEL SEGUNDO MODELO DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA

Con el fin de que esta investigación pueda ser reproducida, en este anexo se presenta el programa del segundo problema de diversidad máxima planteado en este trabajo:

MODEL:

TITLE LOCALIZACIÓN DE ALMACENES MEDIANTE EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO;

SETS:

```
Ciudades / Aguascalientes
          Altamira
          Cancun
          Chihuahua
          Ciudad_de_Mexico
          Ciudad_Juarez
          Ciudad_Victoria
          Coatzacoalcos
          El_Salto
          Guadalajara
          Guaymas
          Hermosillo
          Irapuato
          Lazaro_Cardenas
          Leon
          Manzanillo
          Mexicali
          Monterrey
          Nogales
          Nuevo_Laredo
          Pachuca
          Progreso
          Puebla
          Queretaro
          Ramos_Arizpe
          San_Luis_Potosi
          Tampico
          Tijuana
          Toluca
          Topolobampo
          Torreón
          Zacatecas
```

```
/: x;
```

```
Combinaciones (Ciudades,Ciudades) |&2 #GT# &1: Desastres_naturales,
y_i_j;
```

ENDSETS



```

DATA:

    Desastres_naturales =
    @OLE('C:\Users\Alan Monterrubio Gil\Desktop\Tesis\Sitios
posibles.xlsx');

    m = 4;

ENDDATA

[Funcion_Objetivo]
MAX = @SUM(Combinaciones(i,j): Desastres_naturales(i,j) * y_i_j(i,j));

[Restriccion_Almacenes_Requeridos]
@SUM(Ciudades:x) = m;

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_1]
        x(i) + x(j) - y_i_j <= 1);

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_Ciudad_i]
        -x(i) + y_i_j <= 0);

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_Ciudad_j]
        -x(j) + y_i_j <= 0);

@FOR(Combinaciones(i,j):
    [Restriccion_no_negatividad]
        y_i_j >= 0);

@FOR(Ciudades:
    [Restriccion_variable_binaria]
        @BIN((x)));

END

```



ANEXO 4. PROGRAMA DEL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA CON RESTRICCIÓN DE NIVEL DE RESILIENCIA

Con el fin de que esta investigación pueda ser reproducida, en este anexo se presenta el programa del último experimento presentado:

MODEL:

TITLE LOCALIZACIÓN DE ALMACENES MEDIANTE EL PROBLEMA DE DIVERSIDAD MÁXIMA PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE SUMINISTRO;

SETS:

```
Ciudades / Aguascalientes
            Altamira
            Cancun
            Chihuahua
            Ciudad_de_Mexico
            Ciudad_Juarez
            Ciudad_Victoria
            Coatzacoalcos
            El_Salto
            Guadalajara
            Guaymas
            Hermosillo
            Irapuato
            Lazaro_Cardenas
            Leon
            Manzanillo
            Mexicali
            Monterrey
            Nogales
            Nuevo_Laredo
            Pachuca
            Progreso
            Puebla
            Queretaro
            Ramos_Arizpe
            San_Luis_Potosi
            Tampico
            Tijuana
            Toluca
            Topolobampo
            Torreón
            Zacatecas
```

```
/: x, Indice_Resiliencia;
```

```
Combinaciones (Ciudades,Ciudades) |&2 #GT# &1: Desastres_naturales,
y_i_j;
```



ENDSETS

DATA:

```
Desastres_naturales =  
@OLE('C:\Users\Alan Monterrubio Gil\Desktop\Tesis\Sitios  
posibles.xlsx');
```

```
Indice_Resiliencia =  
@OLE('C:\Users\Alan Monterrubio Gil\Desktop\Tesis\Sitios  
posibles.xlsx');
```

```
m = 4;
```

ENDDATA

```
[Funcion_Objetivo]  
MAX = @SUM(Combinaciones(i,j): Desastres_naturales(i,j) * y_i_j(i,j));
```

```
[Restriccion_Almacenes_Requeridos]  
@SUM(Ciudades:x) = m;
```

```
[Restriccion_Nivel_Resiliencia]  
@SUM(Ciudades: Indice_Resiliencia * x) >= 340;
```

```
@FOR(Combinaciones(i,j):  
[Restriccion_1]  
x(i) + x(j) - y_i_j <= 1);
```

```
@FOR(Combinaciones(i,j):  
[Restriccion_Ciudad_i]  
-x(i) + y_i_j <= 0);
```

```
@FOR(Combinaciones(i,j):  
[Restriccion_Ciudad_j]  
-x(j) + y_i_j <= 0);
```

```
@FOR(Combinaciones(i,j):  
[Restriccion_no_negatividad]  
y_i_j >= 0);
```

```
@FOR(Ciudades:  
[Restriccion_variable_binaria]  
@BIN((x)));
```

END

