

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE GRADUADOS E INVESTIGACIÓN
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.

**MODELO MATEMÁTICO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RIESGO
EN EL TRANSPORTE DE MATERIALES PELIGROSOS DENTRO
DE UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL**

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

IVAN RAFAEL QUEVEDO PARTIDA

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DEL 2006

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por el Ing. Iván Rafael Quevedo Partida sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**Maestro en Ciencias
Con Especialidad en Sistemas Ambientales**

Comité de Tesis:

Dr. Joaquín Acevedo Mascarúa
Asesor

Dr. Enrique Ortiz Nadal
Sinodal

Dr. Vicente Garza Ramírez
Sinodal

Aprobado:

Dr. Francisco Román Ángel-Bello Acosta
Director del Programa de Graduados en Ingeniería
Diciembre, 2006

“Me encanta Dios”

Me encanta Dios. Es un viejo magnífico que no se toma en serio. A él le gusta jugar y juega... A veces se le pasa la mano y nos rompe una pierna y nos aplasta definitivamente. Pero esto sucede porque es un poco cegatón y bastante torpe de las manos.

Nos ha enviado a algunos tipos excepcionales como Buda, o Cristo o Mahoma, o mi tía Chofi, para que nos digan que nos portemos bien. Pero eso a él no le preocupa mucho; nos conoce. Sabe que el pez grande se traga al chico, que la lagartija grande se traga a la pequeña, que el hombre se traga al hombre. Y por eso inventó la muerte: para que la vida -no tú ni yo- la vida sea para siempre.

Ahora los científicos salen con su teoría del “Big-Bang”... Pero ¿qué importa si el universo se expande interminablemente o se contrae? Esto es asunto sólo para agencias de viajes.

A mi me encanta Dios. Ha puesto orden en las galaxias y distribuye bien el tránsito en el camino de las hormigas. Y es tan juguetón y travieso que el otro día descubrí que ha hecho -frente al ataque de los antibióticos- “¡Bacterias mutantes!”.

Viejo sabio o niño explorador, cuando deja de jugar con sus soldaditos de plomo o de carne y hueso, hace campos de flores y pinta el cielo de manera increíble. Mueve una mano y hace el mar, mueve otra y hace el bosque. Y cuando pasa por encima de nosotros, quedan las nubes, pedazos de su aliento.

Dicen que a veces se enfurece y hace terremotos, manda tormentas, caudales de fuego, vientos desatados, aguas alevosas, castigos y desastres. Pero esto es mentira. Es la tierra que cambia -y se agita y crece- cuando Dios se aleja. Dios siempre esta de buen humor.

Por eso es el preferido de mis padres, el escogido de mis hijos, el más cercano de mis hermanos, la mujer más amada, el perrito y la pulga, la piedra más antigua, el pétalo más tierno, el aroma más dulce, la noche insondable, el borboteo de luz, el manantial que soy.

A mi me gusta, a mi me encanta Dios. Que Dios bendiga a Dios.

- Jaime Sabines (1926 – 1999)

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	4
INDICE DE TABLAS	6
INDICE DE FIGURAS	7
Capítulo 1 Introducción	8
1.1 Descripción del problema	8
1.2 Definición del problema	10
1.3 Justificación de la investigación en el transporte de materiales peligrosos	11
1.4 Ejemplo motivador	13
1.5 Objetivos	16
1.5.1 Objetivo General	16
1.5.2 Objetivos Específicos	16
1.6 Descripción de la tesis	16
Capítulo 2 Revisión bibliográfica	18
2.1 Descripción general	18
2.2 Definición del riesgo	18
2.2.1 Cálculo del riesgo	19
2.2.2 Cuantificación del riesgo	19
2.2.3 Índices de riesgo	20
2.2.4 Cálculo de índices de riesgo	22
2.3 Análisis de riesgo en el transporte	23
2.3.1 Principales diferencias con respecto a la evaluación en instalaciones fijas	24
2.3.2 Modelación de riesgo en el transporte	25
2.3.2.1 Cálculo de riesgo en un segmento de ruta	26
2.3.3 Metodología de jerarquización de riesgo (IAEA)	27
2.3.3.1 Generalidades metodología IAEA	27
2.3.3.2 Procedimiento de cálculo metodología IAEA	29
2.3.4 Software disponible para análisis de riesgo en el transporte	32
2.4 Conclusiones a la revisión bibliográfica	33
Capítulo 3 Modelo de evaluación de riesgo en el transporte	34
3.1 Introducción	34
3.2 Fundamento teórico del Índice de Riesgo en el Transporte (IRT)	35
3.2.1 Definición de conceptos	35
3.2.2 Identificación de eventos en el transporte	38
3.2.3 Identificación de posibles incidentes en el transporte	38
3.3 Caracterización de eventos de transporte	39
3.3.1 Identificación de las “Características”	40
3.3.1.1 Rubro Transporte	41
3.3.1.2 Rubro Ruta	45
3.3.1.2 Otras Características “no consideradas” en el cálculo del IRT	49

3.3.2 Evaluación de las “características” por rúbrica	50
3.3.3 Cálculo de contribuciones a la probabilidad	57
3.4 Caracterización del impacto en incidentes de transporte	61
3.4.1 Ejemplo de Cálculo del impacto Resultante	63
3.5 Cálculo del Índice de Riesgo en el Transporte (IRT)	64
3.6 Integración del IRT en un modelo de planeación	66
Capítulo 4 Evaluación del IRT en un modelo de transporte	68
4.1 Aplicación de programación matemática	68
4.1.1- Formulación de Programación Matemática	68
4.1.2- Aplicación de programación matemática en Análisis de riesgo	70
4.1.3 Formulación del Problema de Transporte en el Manejo de Materiales peligrosos	70
4.2 Planteamiento del modelo de transporte	75
4.2.1 Subíndices del modelo de transporte	76
4.2.2 Parámetros del modelo de transporte	76
4.2.3 Variables del modelo de transporte	78
4.2.4 Modelo de programación lineal entera	79
4.2.4.1 Funciones objetivo del modelo	79
4.2.5 Restricciones del modelo	80
4.3 Aplicación del modelo de transporte a un problema simple	84
4.3.1 Planteamiento del problema	84
4.3.2 Solución al problema propuesto	86
4.4 Aplicación del modelo a ejemplo motivador	90
4.4.1 Planteamiento del problema	90
4.4.2 Solución al problema propuesto	91
Capítulo 5 Conclusiones y trabajos futuros	92
5.1 Conclusiones	92
5.2 Trabajos futuros	93
Bibliografía	94
ANEXO I	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Comparativo de rutas Boston-Houston (Erkut & Verter, 1997)	9
Tabla 2.- Accidentes Históricos en el Transporte de Materiales Peligrosos (APELL, 2001)	12
Tabla 3.- Demanda de Productos Químicos en la Empresa X	13
Tabla 4.- Requerimiento de Productos Químicos en la Empresa X	13
Tabla 5.- Costo por Transportación	14
Tabla 6.- Diferencias en el análisis de riesgo en instalaciones fijas y transporte (Rhyne, 1995)	25
Tabla 7.- Características por Rubro que inciden en Eventos de Riesgo	40
Tabla 8.- Principales causas que contribuyen a incidentes en Auto-transportes (AICHE 1995)	41
Tabla 9.- Hoja de Control para el Rubro Transporte	42
Tabla 10.- Hoja de Control para el Rubro Ruta	46
Tabla 11.- Modelo General de Ponderación de Riesgo por Rubro	50
Tabla 12.- Rúbrica de Transporte	51
Tabla 13.- Rúbrica de Ruta	54
Tabla 14.- Resumen de características de los procesos ejemplificados por Transporte	57
Tabla 15.- Resumen de características de los procesos ejemplificados por Ruta	58
Tabla 16.- Contribución de las características de Ruta y Transporte	59
Tabla 17.- Clasificación de Substancias por Categorías de Efecto (IAEA, 1996)	62
Tabla 18.- Contribución de Material (Cm) por categoría (IAEA, 1996)	63
Tabla 19.- Contribución al Impacto para los Materiales Analizados	64
Tabla 20.- Contribuciones a la Probabilidad e Impacto del ejemplo	65
Tabla 21.- Cálculo de IRT por segmentos de Ruta	65
Tabla 22.- Subíndices del Modelo de Transporte Propuesto	76
Tabla 23.- Parámetros de Operación	77
Tabla 24.- Parámetros de Costo	77
Tabla 25.- Parámetros de Riesgo	77
Tabla 26.- Parámetros Restrictivos	77
Tabla 27.- Variables de Carga-Descarga	78
Tabla 28.- Variables de Decisión	79
Tabla 29.- Restricciones de Operación	84
Tabla 30.- Restricciones de acuerdo a norma	85
Tabla 31.- Contribuciones al IRT	85
Tabla 32.- Carga de Materiales por Transporte vs Capacidad	87
Tabla 34.- Carga de Materiales por Transporte vs Capacidad	88
Tabla 35.- Restricciones Adicionales al Modelo	90

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.-Selección de Ruta en el Transporte de Materiales Peligrosos</i>	10
<i>Figura 2.- Flotilla de Transporte Disponible</i>	14
<i>Figura 3.- Distribución de Rutas y Procesos en la Empresa X</i>	14
<i>Figura 4.-Descripción del transporte de materiales peligrosos entre un origen (O) y un destino (D)</i>	26
<i>Figura 5.- Categorías típicas de efecto</i>	28
<i>Figura 6.- Gráfica de frecuencia vs. Consecuencia</i>	31
<i>Figura 7.-Definición de conceptos</i>	37
<i>Figura 8.-Ejemplo de dependencia del arco en problemas de transporte de materiales peligrosos.</i>	65
<i>Figura 9.- Proceso Óptimo de Transporte mediante el cálculo del IRT</i>	66
<i>Figura 10.- Mapa Conceptual del Modelo de Riesgo en el Transporte</i>	67
<i>Figura 11.-Matriz de Transporte</i>	71
<i>Figura 12.- Formulación y Solución al Problema Típico del Vendedor Viajero (TSP)</i>	74
<i>Figura 13.-Diagrama de rutas posibles</i>	86
<i>Figura 14.- Gráfico de Pareto</i>	90

Capítulo 1 Introducción

Los materiales peligrosos son usados en un amplio rango de actividades económicas e industriales, materiales con alto grado de peligrosidad como el Plutonio o el Amonio (utilizados para producir energía y fertilizantes respectivamente) resultan en grandes beneficios económicos y sociales.

Su carácter de “peligrosos” a pesar de ser sinónimo de la potencialidad de riesgo, restringe su manejo, más no prohíbe ni limita su uso en la industria. Dada la relevancia del tema, el presente estudio está destinado al transporte de “materiales peligrosos” dentro de instalaciones industriales.

1.1 Descripción del problema

El panorama general contempla que todo material peligroso sea transportado de un punto de origen a uno o más destinos. Definiendo los puntos de origen como instalaciones fijas donde los materiales peligrosos son producidos y/o almacenados y desde donde en función a su demanda, son trasladados a través de algún medio de transporte a una instalación de producción para su almacenamiento, distribución o uso.

Debido a las características de peligrosidad de ciertos materiales, las medidas de seguridad son de carácter prioritario en cualquier proceso de producción, almacenamiento o distribución. Históricamente con el fin de reducir el riesgo asociado al uso y manejo de este tipo de productos, estándares de seguridad y códigos han sido implementados para regular su distribución.

Sin embargo, aunque el propósito de dichas reglamentaciones es mitigar el nivel de riesgo en las actividades industriales, la existencia de medidas de seguridad no es garantía de que no se presenten accidentes. Es por ello que iniciando por el nivel gerencial, debe existir un alto compromiso en la industria hacia la prevención de pérdidas y una adecuada administración del riesgo, la complejidad de solución de este tipo de problemas y la necesidad de participación a todos los niveles de la organización requiere del desarrollo y aplicación de sistemas de planeación en la toma de decisiones.

Una herramienta valiosa a ser implementada con este objetivo, es el análisis de riesgo preliminar de las variables de decisión que influyen en el incremento o disminución del grado de peligro de los procesos involucrados. Un modelo de planeación, en base a: “ruta”, “transporte” o “material” sería de gran utilidad; el tomador de decisiones determinaría de forma óptima la mejor ruta, el vehículo adecuado, la secuencia apropiada, la configuración y cantidad de materiales que le permitan cubrir las demandas de sus clientes con el nivel de servicio requerido.

El objetivo que con mayor frecuencia es utilizado para la aplicación de modelos en la toma de decisiones es el de minimizar el costo en las operaciones de transporte. Sin embargo, los modelos de este tipo, rara vez integran el riesgo asociado al manejo de

materiales peligrosos. Por lo que, la presente tesis propone la inclusión de restricciones de riesgo.

Cuando se desea resolver el problema de asignación de rutas desde una perspectiva de doble criterio: Minimización de costo y riesgo (a un mismo tiempo), se observa que con regularidad, ambos objetivos no siempre son proporcionales; es posible que al minimizar matemáticamente alguno de ellos el otro aumente y viceversa. *Erkut & Verter (1997)* utilizando un programa computacional (PC* Hazroute); que integra todas las vías carreteras de los Estados Unidos, realizaron distintas comparaciones entre ciudades (nodos) por donde se transportan materiales peligrosos, encontrando los resultados de la **Tabla 1**. Hay dos supuestos de los que parte su estudio: La población expuesta es proporcional al nivel de riesgo, en tanto que la longitud de la ruta lo es al costo.

Tabla 1.- Comparativo de rutas Boston-Houston (Erkut & Verter, 1997)

Ruta Boston - Houston	
Población Expuesta	Longitud Ruta (Millas)
606,057	2792.1
593,292	2818.8
566,652	2918.3
567,037	2976.8
557,135	2919.8
548,601	2925.0
542,629	3116.2
540,043	3337.2
549,158	3346.5

De manera análoga al estudio realizado por los autores, se parte de la hipótesis que dentro de una instalación industrial (como se muestra en la **Figura 1**), también pudiera haber discrepancia entre ambos criterios. En el ejemplo es mostrado que del almacén general a la planta industrial se tienen tres posibles rutas: Dos vías diseñadas para el transporte de materiales (una pavimentada y la otra sin pavimentar), además de una tercera, más corta que las anteriores pero que no ha sido diseñada para el transporte de materiales (circulando a través de procesos productivos y áreas de alta densidad poblacional), como puede observarse en la figura, la distancia de las rutas posibles es inversamente proporcional al nivel de riesgo. Si la elección de enviar los productos por la ruta más corta fuera la utilizada, el riesgo de daño a la población expuesta sería el mayor. En tanto que la ruta pavimentada asociada el menor riesgo, es por la ruta más larga, con el correspondiente consumo de combustible y costo.

Es así que, el tomador de decisiones involucrado en el proceso de transporte de materiales peligrosos, deberá plantear una solución óptima factible según sus parámetros de operación y la percepción del nivel de riesgo.

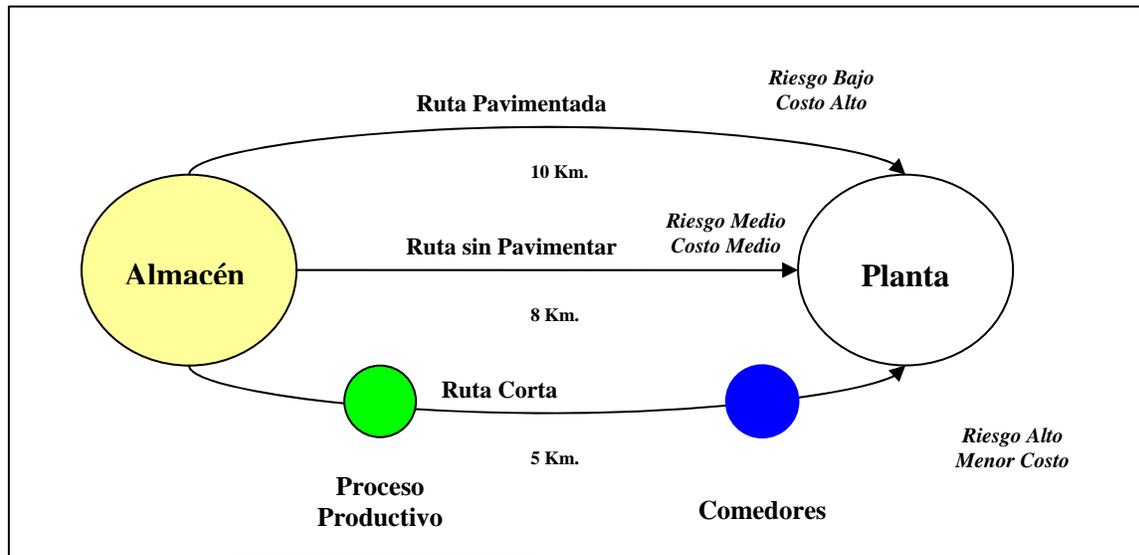


Figura 1.-Selección de Ruta en el Transporte de Materiales Peligrosos

Como puede concluirse el presente estudio tiene fundamento, primero proponiendo un método para la medición del riesgo, evaluando los resultados y aplicando e integrando los resultados a un modelo de transporte con el fin de optimizar los resultados en base a características de costo y riesgo.

1.2 Definición del problema

El problema en el transporte de materiales peligrosos inicia al decidir la combinación adecuada en las variables de operación: Nodos de envío o almacenes (s), nodos de recepción (n , N), transporte (t), y materiales (m) a transportar en un mismo viaje. Para calcular el número se tiene la Ecuación (1):

$$\#combinaciones = (s) \left(\sum_{i=1}^N (N) 2^{n_i-1} \right) * (t) * (m) \quad (1)$$

Como puede inferirse, dar solución al problema es una tarea compleja dada la limitante de tiempo y el gran número de variables. Por lo que es práctica común que la logística de materiales se haga en base al nivel de requerimiento (orden de prioridad), cubriendo la demanda en el menor tiempo. Sin embargo, los avances en herramientas computacionales y la extensa investigación en modelos matemáticos de transporte a la fecha, hacen posible la incorporación de modelos determinísticos con un gran número de variables.

La contribución del presente trabajo consiste en incorporar un modelo de medición del riesgo que sea factible de ser programado en un modelo de optimización.

Habiendo aclarado el punto, deberá definirse el concepto de riesgo: “*El riesgo es comúnmente entendido como la probabilidad de ocurrencia de un evento dañino y sus consecuencias*” (Lavel: 1996; Berdica; Fabiano, Curro et al. 2002). En otras palabras, el riesgo es la interacción de peligro y factores de vulnerabilidad de uno o más elementos.

La interacción, puede ser determinada y/o influenciada por factores externos tales como los ambientales, sociales, políticos, etc. Existe una considerable cantidad de investigaciones en países como Estados Unidos publicadas para la modelación de una ruta para el transporte de materiales peligrosos donde factores como la probabilidad de accidentes, probabilidad de explosiones o vulnerabilidad de la población circundante son considerados cuando se efectúa un análisis de riesgo (Rhyne, 1994). Es aquí que se identifica la primer necesidad de esta investigación: El objetivo de desarrollar una herramienta que permita seleccionar un proceso de transporte que sea factible económicamente y a la vez seguro, permitiendo a los departamentos de planeación y logística evaluar todas las opciones posibles.

El modelo de medición de riesgo comparativo, se basa en índices adimensionales y se ha denominado: “Índice de Riesgo en el Transporte (IRT)”.

Debido a que difícilmente se cuenta con información estadística tan detallada en estos rubros dentro de las instalaciones industriales, es propuesto un medio para la generación de información que sea almacenada en una base de datos, mediante estimaciones de probabilidad subjetiva e impacto (considerando el peor escenario). Por lo que, los parámetros estimados representarán así, una herramienta donde se estime mayor peligrosidad.

El IRT no sustituye la necesidad de realizar análisis de riesgo cuantitativo detallados, su propósito constituye en representar una herramienta de análisis preliminar integrado dentro de un modelo matemático de optimización.

1.3 Justificación de la investigación en el transporte de materiales peligrosos

Evidencia histórica pone de manifiesto, que el riesgo relacionado al transporte de materiales peligrosos puede ser de la misma magnitud que el asociado a instalaciones fijas. En la **Tabla 2**, se hace referencia a los principales accidentes donde se involucra el transporte de materiales peligrosos.

Tabla 2.-Accidentes Históricos en el Transporte de Materiales Peligrosos (APELL, 2001)

Fecha	Área/Locación	Material	Evento Inicial	Consecuencias
1978	San Carlos, España	Propileno	Ruptura de Tanque sobrellenado en transporte terrestre	200 muertos
1981	San Luis Potosí, México	Cloro	Descarrilamiento: ruptura de contenedor	14-20 muertos
1984	Matamoros, México	Amoniaco	Accidente durante el transporte de Amoniaco vía terrestre	182 heridos, 3000 evacuados
1988	Chakhnounia, Ex URSS	Pesticidas	Fuga de pesticidas durante transporte en tren	Más de 20000 evacuados
1989	Asha-Ufa, Ex URSS	Gas LP	Fuga por horas a través de tubería	Más de 500 muertos
1998	Idjerhe, Nigeria	Gasolina	Explosión por fuga de una tubería en un transporte pesado	Mas de 500 muertos
1990	Ahlsfeld, Alemania	Cloro	Emisión de Cloro de un transporte pesado	Más de 182 personas lesionadas
1990	Bangkok, Tailandia	Gas LP	Accidente durante el transporte de Gas LP	Más de 51 muertos y 54 lesionados
1991	California, USA	Carmichael	Volcadura de un auto transporte	3 lesionados y costos de limpieza por 1 millón de dólares
1991	New Bombay, India	Amoniaco	Accidente durante el transporte	1 muerto, 150 lesionados
1994	Distrito de Thane, India	Cloro	Accidente de Transporte	4 muertos, 298 lesionados
1994	Nueva York, USA	Propano	Colisión de un auto tanque y explosión a partir de la ruptura del contenedor	1 muerto, 23 lesionados, 400 pies de radio de un área bajo fuego
1994	Onitscha, Nigeria	Gasolina	Fuga de combustible durante el transporte ocasionando fuego de el equipo y explosión de la carga	60 muertos
1995	Madras, India	Amoniaco	Accidente de Transporte en carretera	2000 lesionados
1996	Alberton, USA	Clorato de Potasio, Cristales de Cloro, Cloro: 122000 lb	Descarrilamiento de tren que llevaba cinco vagones con los materiales	1000 evacuados, 300 lesionados, 1200 yardas de suelo contaminado
1997	Bhopal, India	Amoniaco	Fuga de amoniaco durante el transporte	400 lesionados
1997	Lahore, Pakistán	Cloro	Accidente de Transporte	32 muertos, 900 lesionados, 1000 evacuados
1997	Stanger, Sudáfrica	Petróleo	Accidente de Carretera	34 muertos, 2 lesionados
1998	Yaundé, Camerún	Derivados de petróleo	Accidente de Transporte	220 muertos, 130 lesionados
1998	Biloxi, USA	Gasolina	Derrame por sobrellenado de gasolina y fuego en una estación de servicio	5 muertos, 1 lesionado, daños por 55,000 dls
1999	Tauertunnel, Austria	Laca	Colisión de un vehículo que llevaba laca en una cola de automóviles dentro de un túnel.	12 muertos, 50 heridos, 14 millones de dls en reparaciones

Particularmente en el caso del transporte dentro de instalaciones industriales, se cuenta con los siguientes parámetros adicionales de riesgo: la frecuencia de viaje, la densidad poblacional concentrada en instalaciones, la cercanía de procesos productivos donde se utilizan otros materiales peligrosos, el espacio limitado para efectuar maniobras, entre otras.

En una simple jornada laboral existe un alto nivel de riesgo tanto para quienes laboran en la planta, como para quienes habitan zonas aledañas.

Es por ello que, bajo este enfoque, existe una justificación para el estudio por el nivel de impacto de un accidente durante el transporte. Además de los costos asociados por tratamiento e indemnización a empleados lesionados, reemplazo de unidades de transporte, y retrasos en la entrega de materiales.

1.4 Ejemplo motivador

El siguiente ejemplo motivador es propuesto para mostrar la dificultad de la toma de decisiones cuando se tienen múltiples productos y el tomador de decisiones deberá seleccionar la opción más adecuada.

En la empresa “X”, el encargado de logística deberá satisfacer la demanda total (**Tabla 3**) en cada uno de los destinos mostrados (**Tabla 4**), trasladando los materiales desde el almacén general a distintas plantas, dentro de su proceso productivo:

Tabla 3.-Demanda de Productos Químicos en la Empresa X

Material	Recipiente	Densidad	Demanda total de Materiales
Acido Acrílico	A granel	1.05 T/m ³	16 Ton
Peróxido de Dibenzoilo	A granel	1.33 T/m ³	12 Ton
Metil-Etil Cetona	A granel	0.81 T/m ³	17 Ton
Acido Acético	Tanques de 10 l	1.05 T/m ³	12 Ton
Acido Clorosulfónico	Tanques de 10 l	1.76 T/m ³	5 Ton
Diesel	A granel	0.88 T/m ³	20 Ton
Água	A granel	1.00 T/m ³	26 Ton

Tabla 4.- Requerimiento de Productos Químicos en la Empresa X

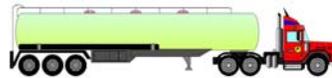
Demanda (Ton)	Planta Polimeros 1	Planta Polimeros 2	Planta Polimeros 3	Planta Alcoholes	Mantenimiento	Planta Extrusión	Almacén Producto Terminado	Planta Inyección
Acido Acrílico	10	0	0	1	0	0	0	5
Peróxido de Dibenzoilo	0	5	5	1	0	0	0	1
Metil-Etil Cetona	0	0	1	1	5	5	3	2
Acido Acético	0	4	1	5	1	0	0	1
Acido Clorosulfónico	1	0	1	1	0	1	0	1
Diesel	1	2	3	4	1	2	3	4
Água	3	7	5	1	2	1	3	4

En la **Tabla 5**, se muestran los costos y capacidades de transporte de los que se compone la flotilla de vehículos disponibles y en la **Figura 2** se muestra la configuración de dichos transportes y las unidades disponibles.

Tabla 5.-Costo por Transportación

Costo Fijo por Kilómetro		
Tipo de Transporte	Costo por Kilómetro (\$/Km.)	Capacidad
Transporte Tipo A	5	30 m ³
Transporte Tipo B	10	60 m ³
Transporte Tipo C	3	30 m ³

Costo (\$/Km-Ton)			
Material	TA	TB	TC
Acido Acrílico	10	20	15
Peróxido de Dibenzoilo	20	20	20
Metil-Etil Cetona	7	10	7
Acido Clorosulfónico	7	7	5
Acido Acético	7	6	4
Diesel	4	6	3
Água	4	6	3



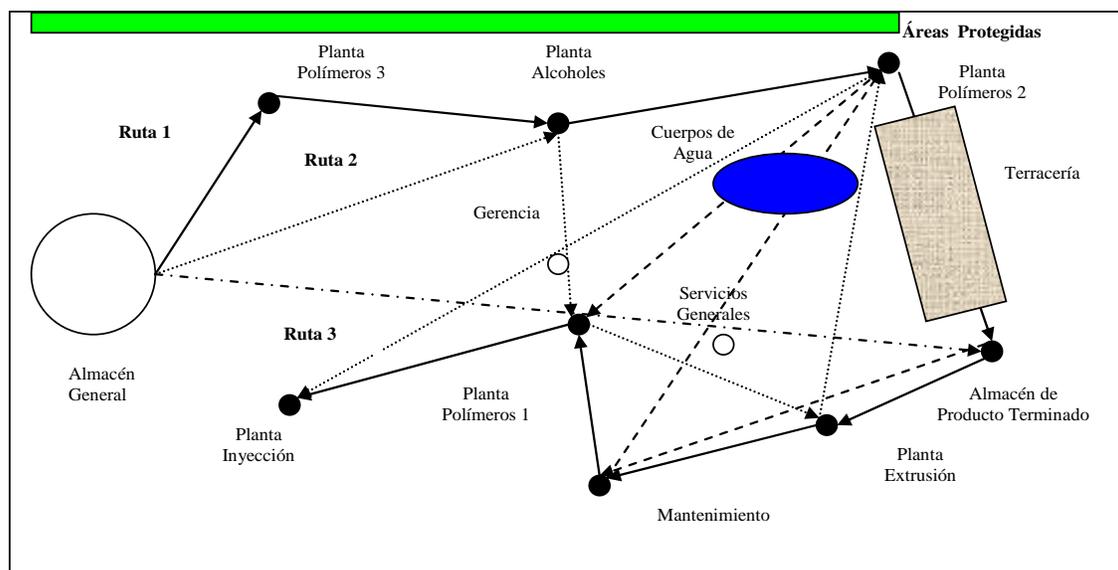
Tipo A (5 Unidades)



Tipo B (2 Unidades)



Tipo C (2 Unidades)

Figura 2.- Flotilla de Transporte Disponible

Figura 3.- Distribución de Rutas y Procesos en la Empresa X

En la **Figura 3** se muestra un diagrama de la instalación con las rutas que normalmente siguen los transportes.

Para resolver el problema anterior el encargado de logística, podrá tomar sus decisiones de envío bajo tres criterios:

- **Criterio por orden de prioridad:**

Sin tomar en consideración los costos ni el riesgo asociado, el tomador de decisiones podría cumplir los requerimientos de materiales con prioridad inmediata, siendo esta la alternativa que involucra un análisis mínimo y por consecuencia la de mayor nivel en costo y riesgo.

En este caso, no es especificada la urgencia de entrega de los materiales pero es de esperarse que los transportes “**Tipo B**” al ser los de mayor capacidad sean usados para cubrir las altas demandas de **Diesel** y **Agua** que es requerida en todos los nodos de destino. En tanto que cualquiera de los transportes “**Tipo A**” o “**Tipo C**”, pudiera ser utilizado, para cargar las mayores cantidades de los materiales restantes sin considerar la compatibilidad entre ellos.

- **Criterio por función costo:**

En este punto es importante destacar el contexto en el que se pretende resolver el problema. El tomador de decisiones cuenta con los siguientes elementos de decisión:

- 7 productos
- 9 auto transportes
- 1 Nodo inicial (Almacén)
- 8 Nodos de recepción (2040 combinaciones posibles)

En total existen **128,520** elementos de decisión ($1 \times 2040 \times 9 \times 7$) aplicando la ecuación (1). Por lo que es vital el uso de herramientas computacionales para resolver este tipo de problemas donde sea necesario calcular cada una de las variables para minimizar costos. El modelo deberá asignar la capacidad máxima de productos por transporte para cumplir con los requerimientos en cada una de las instalaciones de la planta, tomando la ruta más corta.

Para obtener una solución óptima, el problema deberá plantearse como un modelo de programación entera mixta (MIP por sus siglas en inglés) considerando como restricciones la capacidad de cada tipo de transporte y la prioridad de entrega.

- **Criterio por función riesgo:**

El tomador de decisiones además de considerar las restricciones de la función costo, tratará de minimizar los riesgos asociados en cada uno de los rubros asociados. Por

lo que el número de elementos de decisión se duplica. En total hay **257,040** ($128,520 \times 2$) elementos de decisión. Para cada una de las variables seleccionadas, es necesario calcular el riesgo y costo resultantes en un modelo de programación entera mixta pero utilizando un criterio de minimización matemática multiobjetivo.

- *Material:* Peligrosidad del material a transportar evaluando la compatibilidad con los demás productos.
- *Transporte:* Características que contribuyen al riesgo en el transporte a utilizar.
- *Ruta:* Peligrosidad asociada con el trayecto de ruta seleccionada.

Los resultados pudieran ser muy diferentes, según el criterio que seleccione el tomador de decisiones (en el Capítulo 4 se presentará la solución mediante los últimos dos criterios a este problema).

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo semicuantitativo de medición del riesgo, que permita la optimización en el transporte de materiales peligrosos, que pueda integrarse como una herramienta de planeación, desde una perspectiva económica y de riesgo, para el transporte de materiales peligrosos dentro de una instalación industrial.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar diferentes factores relacionados al riesgo que puedan influenciar de forma directa o indirecta a las actividades de transporte de materiales peligrosos y que puedan ser consideradas en un modelo de optimización.
- Identificar y cuantificar dichos factores de riesgo mediante la elaboración de “*Hojas de Control*” y evaluarlos a través de “*Rúbricas*” con el fin de definir su contribución al riesgo o como restricciones del modelo. Y que permitan su almacenamiento en una base de datos.
- Aplicar un modelo de optimización de transporte con una perspectiva multiobjetivo para demostrar la utilidad del método propuesto.

1.6 Descripción de la tesis

Con el fin de explorar cada uno de los puntos antes mencionados, la presente tesis ha sido estructurada de la siguiente forma:

En el Capítulo 2, correspondiente a la revisión bibliográfica se sienta la base, para mostrar un punto de vista profundo sobre estudios de investigación previos en el área, que permitirá determinar las herramientas disponibles para un estudio de este tipo.

En el Capítulo 3, se define un índice de riesgo (IRT) para el problema de transporte de materiales peligrosos y se justifican cada una de las características asociadas con el transporte y su valoración dentro de dicho modelo.

En el Capítulo 4, se expone el modelo matemático de optimización, las ecuaciones formuladas y se resuelve un caso estudio con el fin de mostrar la aplicabilidad en la práctica.

En el Capítulo 5, se exponen las conclusiones a la presente investigación, son citadas las áreas futuras de investigación identificadas y que no son cubiertas en la presente tesis.

En la sección de Anexos, se presenta un listado de materiales peligrosos y su respectiva categoría para el cálculo del IRT.

Capítulo 2 Revisión bibliográfica

2.1 Descripción general

Junto con los grandes beneficios que el desarrollo tecnológico ha llevado a la sociedad, la industria en general se ha ganado fama como sector de alto riesgo.

En algunos casos la falta de conocimiento, tecnología adecuada o sistemas de seguridad ha repercutido en trágicos accidentes. Eventos como las catástrofes de Bhopal en India con más de 2000 muertes o la explosión de la planta de nuclear de Chernobyl en Ucrania en 1986 con 30 muertes directas y miles de afectados por la radiación, son claros ejemplos de las consecuencias de una mala administración del riesgo (*Crowl & Luvar, 2001*).

Aunque las actividades industriales, comerciales y de servicios contribuyen de manera importante al desarrollo de cualquier país, no se puede pasar por alto el potencial de accidentes que conllevan; el uso, procesamiento, almacenamiento y transporte de volúmenes importantes de materiales peligrosos, constituye un claro ejemplo del riesgo asociado para el medio ambiente y la sociedad. La situación se agrava cuando el desarrollo de asentamientos humanos circundantes a las empresas, no cuenta con la infraestructura y la organización necesaria para responder a las contingencias derivadas de accidentes industriales.

De tal modo, la prevención de los accidentes que involucren sustancias peligrosas y la reducción de sus efectos adversos sobre el ambiente, la población y sus bienes, es hoy en día uno de los retos más apremiantes de la industria hoy en día.

La adopción de medidas normativas y de otra índole para mejorar la seguridad en el transporte de materiales peligrosos y en las empresas que realizan actividades de alto riesgo, tanto en México como en otros países se fundamenta en la identificación, caracterización y clasificación de las sustancias peligrosas que por sus propiedades y volúmenes de manejo. (*INE, 2005*)

2.2 Definición del riesgo

Aunque en el capítulo anterior se ha dado una definición del riesgo es importante revisar otras definiciones, sobre las que se ha entablado una amplia discusión. *Kaplan y Garrick (1981)* identifican las más comunes:

- El riesgo es una combinación de incertidumbre y daño

- El riesgo es la relación entre condiciones peligrosas y medidas preventivas.
- El riesgo es la triple combinación de un evento, su probabilidad y las consecuencias asociadas.

Por la naturaleza del problema a analizar, la última definición constituye la conceptualización bajo la cual parte la investigación propuesta por la presente tesis.

2.2.1 Cálculo del riesgo

De acuerdo a la “*Guía del Análisis de Riesgo Cuantitativo para Procesos Químicos*” (AICHE, 2000) la metodología apropiada para estimar un riesgo es de tipo probabilística, proponiendo un particular énfasis en eventos extraordinarios pero potencialmente catastróficos.

La base de todo análisis de riesgo cuantitativo es identificar una serie de escenarios y evaluarlo según la probabilidad de eventos y su impacto potencial o consecuencia. Expresando matemáticamente el concepto mediante la Ecuación 2: (AICHE, 2000)

$$Riesgo = F(s, c, f) \quad (2)$$

Donde:

- s = Escenario hipotético
- c = Consecuencia estimada
- f = Frecuencia estimada

Esta función según el método con el que se estimen los parámetros, pudiera ser extremadamente compleja, además de diferir numéricamente y conceptualmente de muchos modos (usando funciones de riesgo calculadas en base a un grupo de escenarios, consecuencias y frecuencias diferentes entre si). Por lo que es importante analizar las diferentes perspectivas de cálculo y cuantificación.

2.2.2 Cuantificación del riesgo

En un análisis de cuantificación del riesgo existen diferentes formas de medir las contribuciones. Principalmente son utilizados tres enfoques para expresar la combinación de frecuencia y consecuencia de incidentes (AICHE, 2000):

- **Evaluación de riesgo individual-** Pueden ser números o un grupo de valores estimados de riesgo para varios individuos o locaciones geográficas. En general, consideran el riesgo a un individuo que pueda estar en la zona afectada por un incidente o un grupo de incidentes.

- **Evaluación del riesgo a la sociedad-** Son mediciones simples, un grupo de números tabulados o gráficas que estiman el riesgo a un grupo de personas localizadas en la zona afectada por un incidente o grupo de incidentes
- **Evaluación con índices de riesgo-** Números o valores tabulados que se encuentran correlacionados a la magnitud de un riesgo. Algunos índices de riesgo son valores relativos sin unidades específicas, los cuales solo tienen un significado dentro del contexto de la metodología. Los índices de riesgo tienen la gran ventaja de dar un panorama general.

Particularmente para el estudio del riesgo en el transporte de materiales peligrosos, conviene presentar la información mediante “*Índices de Riesgo*”, donde los valores de riesgo resultantes sean fácilmente comparados entre sí. Partiendo de este tipo de evaluación se expone el panorama de las diferentes metodologías existentes en índices.

2.2.3 Índices de riesgo

La mayoría de las metodologías propuestas para el análisis de riesgo son aplicables en las etapas finales de diseño y requieren de financiamiento, personal experimentado, datos detallados y tiempo (*Khan, Sadiq & Amyotte, 2003*). Por lo que en ausencia de estudios extensos, los índices de riesgo ofrecen características que los hacen aplicables en casi cualquier etapa del proceso.

Las ventajas de un índice de riesgo pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Pueden ser evaluados rápidamente asignando un valor (penalidad o crédito).
- El valor obtenido puede ser fácilmente interpretado y permite la comparación en diversas etapas de diseño o en el momento de requerir una toma rápida de decisiones.
- No requieren de un análisis detallado o una gran experiencia para el tomador de decisiones.

A continuación se enumeran las técnicas más usadas en la obtención de índices de riesgo en la industria al día de hoy:

- **Razón de Accidentes Fatales (FAR)** (*Lees, 1980*)- Es el número estimado de fatalidades por 10^8 horas de exposición. El FAR es un único número que es directamente proporcional al riesgo individual promedio.
- **Índice de Peligro Individual (IHI)** (*Helmes and Schaller, 1982*)- En términos simples es la evaluación del FAR para un riesgo particular, la exposición a un evento de

peligro es definida como el tiempo actual al cual una persona está expuesta a un evento de peligro.

- **Razón Promedio de Decesos** (*Lees, 1980*)- Está definida como el número promedio de fatalidades esperadas por unidad de tiempo de todos los posibles incidentes. También es conocido como número de accidentes fatales.
- **Costo Social Equivalente** (*Okrent, 1981*)- Es una modificación de la “Razón Promedio de Decesos” y toma en cuenta la respuesta de la sociedad a un gran número de incidentes de consecuencia.
- **Índice de Mortalidad** (*Marshall, 1987*)- Es usado para caracterizar los peligros potenciales del almacenamiento de materiales tóxicos. Se basa en la razón promedio de muertes con respecto a la masa de material o energía liberada, y se deriva de un récord histórico.
- **Índice DOW de Incendio y Explosión** (*Dow, 1994a*) e **Índice MOND (ICI, 1985)**- Ambos estiman el riesgo relativo de incendio y explosiones. Estos índices pueden así mismo ser usados para estimar la magnitud potencial de daño a una planta, ambos métodos utilizan una metodología de asignación de penalizaciones y/o bonificaciones a las instalaciones de una planta química. Las penalizaciones son asignadas en función de las sustancias presentes y las condiciones de proceso, en tanto que las bonificaciones tienen en cuenta las instalaciones de seguridad que pueden mitigar o prevenir los efectos accidentales.

La combinación de ambas lleva a la determinación del índice con el que se afecta una determinada parte de la instalación, pudiendo examinar, a primera vista, la importancia relativa de las partes estudiadas de un proceso en función del riesgo asociado.

- **Índice DOW de Exposición a Químicos** (*Dow, 1994 b*)- Estima el riesgo asociado con la descarga de un solo material químico tóxico.
- **Índice de Seguridad Inherente (ISI)**- Desarrollado por *Heikkila (1999)*. Este método clasifica factores de seguridad en dos categorías, seguridad inherente química y de seguridad inherente en el proceso. La seguridad inherente mediante la revisión de las características de peligrosidad del material: calor de reacción, inflamabilidad, explosividad, toxicidad, corrosividad e incompatibilidad de químicos.

Las metodologías previamente descritas han sido creadas para la evaluación del riesgo en instalaciones fijas donde las condiciones de operación son poco flexibles, dado su carácter repetitivo. Para evaluar el riesgo en el transporte de materiales peligrosos mediante una metodología de índices, se deberá aplicar una modificación a las técnicas existentes, tomando como base las características particulares de transporte.

2.2.4 Cálculo de índices de riesgo

En general el procedimiento de cálculo de los índices anteriormente descritos resulta de la suma de riesgos individuales, a un punto en particular de todos los posibles incidentes asociados con una planta. De forma general la ecuación (3) representa el riesgo total: (AICHE, 2000)

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n IR_{x,y,i} \quad (3)$$

Donde

$IR_{x,y}$ = Riesgo Total en la locación geográfica x, y
 $IR_{x,y,i}$ = Riesgo Individual en la locación x, y para el caso del incidente i
 n = Número total de incidentes considerados en el análisis

Los datos de entrada son obtenidos a su vez de la ecuación (4):

$$IR_{x,y,i} = f_i * p_{f,i} \quad (4)$$

Donde

f_i = Frecuencia del incidente i
 $p_{f,i}$ = Probabilidad de ocurrencia del incidente i

Si bien no todos los índices son aplicación directa de las ecuaciones descritas (algunos son valores absolutos de un tipo de incidentes en un periodo de tiempo), representan de forma genérica la información general requerida para su cálculo.

De ello puede concluirse que a pesar de su simplicidad en cálculo e importancia en el análisis, tienen las siguientes limitantes:

- No proveen de un criterio absoluto para aceptar o rechazar un riesgo.
- Los índices de riesgo carecen de resolución y no comunican la misma información que un análisis de riesgo detallado mediante herramientas tales como los análisis de dispersión, o técnicas de evaluación a un evento extraordinario.
- Los índices de riesgo tales como el DOW consideran el riesgo solo en un sentido comparativo.

Es por ello que de ser utilizados para el análisis de riesgo en transporte de materiales peligrosos, tendrán validez siempre y cuando el objetivo sea obtener un estimado preliminar. Ningún índice sustituye la necesidad de análisis de riesgo cuantitativos completo con todas las herramientas reportadas en la literatura.

A continuación se citan los elementos identificados en un análisis de riesgo en el transporte.

2.3 Análisis de riesgo en el transporte

De acuerdo con el *Center for Chemical Process Safety (CCPS)* un análisis de riesgo en el transporte, debe contemplar los siguientes puntos (*AICHE, 1995*):

- Modos alternos de transporte
- Rutas apropiadas según su evaluación correspondiente.
- Restricciones de transporte (velocidad, temperatura, hora del día)
- Tamaño de embarque
- Condiciones de embarque
- Tamaño y tipo de unidad

Todo análisis debe apearse a la siguiente guía de procedimientos para calcular el riesgo (*Rhyne, 1995*):

Definición del Objetivo

El primer paso es definir los objetivos y el enfoque de este tipo de estudios. Objetivos posibles pueden incluir los siguientes:

- Estimar las limitaciones o consecuencias en los peores escenarios.
- Cumplir con requerimientos regulatorios.
- Estimar el riesgo en las instalaciones en general.
- Evaluar una serie de decisiones que impliquen riesgo con opciones de reducción.

Desarrollo de Escenarios

El tomador de decisiones deberá identificar las operaciones que impliquen un riesgo de consideración bajo ciertas condiciones de transporte, determinará los eventos factibles a ocurrir.

Análisis de Frecuencia

Determinar la frecuencia de incidentes y por tanto de probabilidad que se han presentado para el evento a evaluar. Para lo que regularmente, usará datos de falla históricos. Con el fin de determinar la probabilidad de ocurrencia de un incidente bajo las condiciones previamente identificadas.

Análisis de Consecuencia

En función de las características del material a transportar, el tomador de decisiones analizará las consecuencias utilizando las mismas herramientas que son usadas para los análisis estacionarios. Dado que muchos procesos físicos deberán ser evaluados, es raro que una persona sea experta en técnicas tales como: análisis de falla mecánica, dispersión atmosférica, explosiones, efectos a la salud, entre otros. Por lo que esta parte

de la evaluación, tiende a ser de tipo multidisciplinario o mediante el uso de herramientas computacionales especializadas.

Evaluación y Presentación del Riesgo

El objetivo es la evaluación de alternativas para reducir riesgos potenciales. Independientemente de la decisión, seleccionada. El análisis de riesgo debe contener “sugerencias de reducción de riesgo” factibles en costo.

Un ejemplo para ilustrar la secuencia es explicado a continuación con el fin de dejar en claro los conceptos involucrados:

Un encargado de logística desea evaluar el tipo de transporte a usar, dada la necesidad de transportar una cierta cantidad de un material peligroso (**definición del objetivo**). Para ello ha identificado que en las operaciones de carga y descarga de materiales peligrosos a granel (**escenario**), es factible que se presenten problemas de fugas de material (**evento**), pues en los últimos años se han reportado fugas en las conexiones del transporte, ocasionando nubes de material tóxico al ambiente que han repercutido en interrupción en las operaciones cercanas a la zona de carga (**incidentes**).

El encargado realiza una consulta a la base de datos de la compañía, para determinar la frecuencia con que este tipo de fugas ocurren (**análisis de frecuencia**) y descubre que los transportes cuentan con diferentes conexiones de carga/descarga (**características del transporte**), por lo que, mediante un procedimiento de cálculo puede determinar la probabilidad de fuga, según el tipo de transporte que seleccione.

Habiendo identificado la zona de emisión, utiliza herramientas de simulación para determinar los efectos que una fuga del material peligroso tenga en la zona de emisión (**análisis de consecuencia**).

Toma las decisiones de ruta en función a los resultados obtenidos, interpretando los resultados en un sentido económico, para el uso del transporte que resulte en el menor riesgo para este tipo de eventos (**evaluación del riesgo**).

2.3.1 Principales diferencias con respecto a la evaluación en instalaciones fijas

La principal diferencia en el análisis en el transporte radica en que mientras en una instalación fija los elementos de peligro constituyen un “riesgo puntual”, en el transporte son un “riesgo dinámico” que depende por completo de los sitios por donde transite el vehículo.

En el transporte de materiales químicos, una fuga o derrame puede ocurrir en cualquier punto a través de la ruta entre el origen y el destino. La incertidumbre de la localización exacta de emisión con frecuencia requiere del uso de aproximaciones generalizadas para limitar los datos necesarios y el número de incidentes resultantes.

Estos estudios pueden involucrar la modelación de la consecuencia con cierto nivel de detalle, comparaciones con la consecuencia de incidentes con otros materiales, cantidades emitidas e inclusive una revisión de la densidad de población a lo largo de la ruta para minimizar los impactos potenciales por su emisión o derrame.

Por la naturaleza de este tipo de estudios, cabe mencionar que su enfoque va del rango cualitativo a semicuantitativo. Un análisis exclusivamente cuantitativo requerirá de una gran cantidad de datos que rara vez se tienen disponibles.

Es importante destacar que los resultados de un análisis de riesgo en el transporte, deberán proveer dos grupos de información. Por un lado los elementos restrictivos del transporte; por ejemplo la capacidad del vehículo, y por el otro la contribución a condiciones de riesgo para un conjunto de parámetros semicuantitativos.

La **Tabla 6** muestra algunas de las diferencias entre ambos tipos de análisis.

Tabla 6-Diferencias en el análisis de riesgo en instalaciones fijas y transporte (Rhyne, 1995)

Atributo	Transporte	Instalación Fija
Definición del Sistema	No está bien definido	Bien Definido
Escenarios de Eventos	Pocos (Incendio, explosión, impacto) durante el transporte	Muchos
Control de la Densidad de Población	Poco	Sitios Remotos (Industriales)
Condiciones Meteorológicas	Muchos escenarios (condiciones de estabilidad atmosférica, direcciones del viento, velocidad del viento, posibilidad de lluvias) a través de la ruta	Un solo escenario, regularmente
Sistemas de Mitigación	Conductos y Autoridades locales	Personal de planta entrenado
Análisis de Emisiones	Respuesta de contenedores a la fuerza de impacto	Sistema de respuesta dinámico

Como se ha expuesto hasta el momento, el análisis de riesgo en el transporte a pesar de seguir una secuencia de pasos semejante a la determinación en instalaciones fijas tiene un enfoque distinto por la naturaleza de un proceso que es móvil a través de una ruta. A continuación se exponen las metodologías existentes para modelar de forma dinámica un riesgo en el transporte.

2.3.2 Modelación de riesgo en el transporte

Un evento no deseado en el transporte de materiales peligrosos desde la perspectiva de “Modelación”, es comúnmente asociado como la consecuencia resultante de la emisión o derrame de una sustancia peligrosa al medio ambiente. Aunque es factible que existan consecuencias no deseadas de un incidente como daño a la biota, pérdidas económicas y lesiones al personal, casi toda la literatura en el tema asocia al impacto de un evento de peligro con el número de fatalidades que ocasiona (Erkut y Verter, 1997).

Los autores identifican que es común asumir que: “*El impacto o consecuencia de un evento de peligro es proporcional al tamaño de la población en las zonas*”

circundantes, y donde la longitud del área depende de la sustancia y cantidades transportadas”.

2.3.2.1 Cálculo de riesgo en un segmento de ruta

Usando la definición tradicional y aplicando el modelo desarrollado por *Erkut y Verter (1997)*, la ecuación (5) calcula el riesgo para el transporte del material *B* sobre un segmento de ruta *A*:

$$R_{AB} = P_{AB} * C_{AB} \quad (5)$$

Donde

P_{AB} = Probabilidad de un incidente en un segmento de ruta *A* para el transporte del material *B*

C_{AB} = Población a través del segmento *A* asociada al impacto de transportar el material *B*

La probabilidad de un incidente no es fácil de estimar. De acuerdo a los autores existen muchos factores difíciles de cuantificar en la probabilidad de un evento de transporte. Y la manera en que inciden, “*constituye un ejercicio poco práctico para el cálculo en forma precisa*”.

Sin embargo, para la estimar el nivel de impacto, es factible el uso de un “círculo de peligro”, donde la actividad de transporte de materiales peligrosos representa el “*movimiento de una circunferencia que representa el área de impacto en caso de derrame o emisión de la sustancia transportada a través de una red de arcos de un origen a un destino*” (*Erkut & Verter, 1997*) como es mostrado en la **Figura 4**.

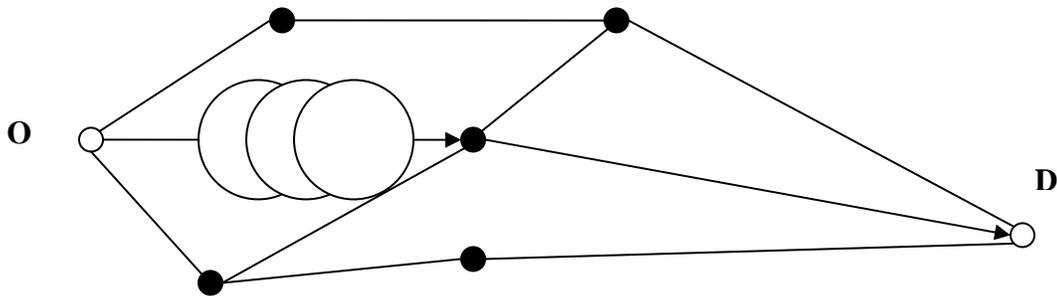


Figura 4.-Descripción del transporte de materiales peligrosos entre un origen (O) y un destino (D)

Para ilustrar la aplicación de este método, se tiene como ejemplo la modelación del efecto de ruptura de un contenedor de Amoniaco. Suponiendo que el contenedor se encuentra presurizado y es transportado por un vehículo de una locación a otra a cierta hora del día. A continuación se presenta el procedimiento de cálculo tradicional para estimar de modo preciso el número de fatalidades:

- Estimar la concentración del gas como función de la velocidad y tipo de emisión.
- La distancia del contenedor a las zonas circundantes a través de toda la ruta.
- Identificar los vientos existentes, la topografía, temperatura y humedad.

Dependiendo de la velocidad y densidad del gas, tres diferentes modelos de dispersión deben ser aplicados para estimar la concentración a diferentes distancias (*Glickman & Raj, 1991*). Para estimar los efectos del impacto en las zonas circundantes, adicionalmente debe estimarse la probabilidad de fatalidad humana como función de la concentración de Amoniac. Finalmente de la multiplicación de las probabilidades con la densidad de población que habita a diferentes distancias de la ruta se puede encontrar el número esperado de fatalidades. Cabe mencionar que este proceso debería hacerse en cada trayecto de ruta a través de toda la red de transporte.

Como puede observarse, este proceso de estimación requiere de información y tiempo que no se dispone en las operaciones de logística de materiales, y aunque es posible estimar el riesgo para un incidente específico (fijando parámetros en el modelo), es poco realista esperar la generación de esta información para todos los segmentos de ruta en una red de transporte.

“Así que, aunque teóricamente posible, es impráctico producir estimados precisos de las consecuencias de un incidente derivado del transporte de materiales peligrosos” (Erkut & Verter, 1997).

2.3.3 Metodología de jerarquización de riesgo (IAEA)

Basado en el concepto de “*círculo de peligro*” anteriormente descrito, es conveniente citar la metodología propuesta por la *Agencia Internacional para la Energía Atómica* (IAEA por sus siglas en inglés) titulada: “*Clasificación y jerarquización de riesgos debidos a accidentes mayores en procesos e industrias relacionadas*”. El principal objetivo consiste en: “*Proponer una técnica de cuantificación del riesgo para establecer prioridades de diferentes fuentes con el fin de focalizar un análisis de riesgo detallado según un orden de prioridades*” (IAEA, 1996).

2.3.3.1 Generalidades metodología IAEA

La metodología propuesta cuenta con las siguientes características:

- Los métodos y procedimientos descritos aplican al nivel de riesgo resultante de accidentes mayores con consecuencias dentro y fuera de instalaciones industriales donde se transporten materiales peligrosos. Los riesgos son cuantificados como daños a la “salud pública”, categorizando el impacto de accidentes como incendios, explosiones y emisiones de sustancias tóxicas.
- El riesgo es definido en términos de consecuencia y probabilidad de eventos no deseados.

- Las suposiciones usadas en la estimación de la consecuencia de accidentes indicada en el método son las máximas consecuencias posibles. La estimación está hecha de modo que en el área de impacto existirá un 100% de fatalidades por ciertos criterios de efecto (incendios, explosiones).

Para el cálculo de la “**Frecuencia de Accidentes**”:

- Frecuencia de falla promedio en función a la experiencia histórica.
- Desarrollo de un método mediante el uso de “números de probabilidad”.
- La frecuencia de accidentes es obtenida en función a “Tablas de Probabilidad”, donde los trayectos de ruta son categorizados como: seguros, promedio o inseguros.

Un camino seguro contempla que la vía constituye una ruta sin cruceros, que existen rutas con bajo o sin tráfico y los carriles están debidamente delimitados.

Un camino poco seguro que se trata de rutas conocidas con una alta frecuencia de incidentes, caminos con juntas de alto tráfico, sin obstáculos, pavimento resbaloso, sin luces de tráfico.

Para el cálculo de la “**Consecuencia**”:

- Existen tres categorías típicas de efecto (**Figura 5**):
 - I. Circulares (explosiones)
 - II. Semicirculares (nubes pesadas)
 - III. Alongadas (dispersión).

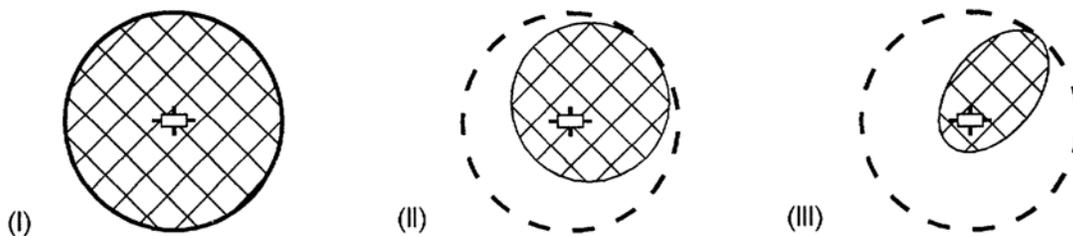


Figura 5.- Categorías típicas de efecto

- Las sustancias son divididas en grupos: Inflamables, explosivos y tóxicas (hasta 5 subcategorías por nivel de impacto);

- Reducción del impacto por cumplimiento en medidas preventivas y de seguridad en las diferentes actividades relacionadas al proceso, almacenamiento y transporte de sustancias.

En base a la metodología descrita, los resultados propuestos son de gran aplicación para la modelación del riesgo en el transporte porque cumplen con las características requeridas para resolver el problema:

- Proveen un visión preliminar cuantitativa de de los diferentes riesgos que pueden encontrarse en un área industrial, basado en el concepto de riesgo a la salud de la población circundante;
- Permiten la jerarquización de las diferentes fuentes de riesgo para análisis detallados posteriores.
- Solo pueden ser aplicados en una base relativa. Los valores absolutos de riesgo no pueden ser usados de forma aislada.

2.3.3.2 Procedimiento de cálculo metodología IAEA

Consecuencia (fatalidades/accidente)

Las consecuencias ($C_{a,s}$ número de fatalidades/accidente) de un accidente causado por una sustancia s para cada actividad identificadas a , puede ser calculado a partir de la ecuación (6).

$$C_{a,s} = A \times \delta \times f_A \times f_d \times f_m \quad (6)$$

Donde:

A =	Área Afectada (ha)
δ =	Densidad de población (personas/ha)
f_A =	Factor de corrección para el área poblada (Arco)
f_d =	Factor de corrección para el área poblada (Distancia)
f_m =	Factor de corrección por efectos de mitigación

Procedimiento de cálculo de la Consecuencia

- Seleccionar una de las actividades.
- Si más de una sustancia se encuentra involucrada en la misma actividad y puede causar un daño, deberá analizarse de modo independiente. Si un grupo de sustancias puede reaccionar al ponerse en contacto accidentalmente, debe considerarse como “una sola sustancia equivalente”. Si una sustancia inflamable es también tóxica, ambos efectos tienen que ser contabilizados. Después de seguir los procedimientos será claro si las propiedades inflamables son importantes o no, comparadas con las propiedades tóxicas.

Las sustancias deberán ser divididas por:

- Potencial de daño (Inflamabilidad, explosividad y toxicidad).
- Características Físicas y químicas.
- Tipo de actividad.

Las sustancias pueden ser clasificadas de acuerdo a las cantidades involucradas por accidente:

- La definición de las categorías de efecto (o clases) es mostrada en una tabla. La cual es hecha por dos categorías de efecto: Distancia máxima en metros y área afectada en hectáreas.
- Estimar la distribución de población en el área circular donde el radio represente la distancia de efecto. Estimar la densidad de población en las partes mas importantes (El método cuenta una tabla para estimar la densidad de población).
- Estimar el factor de corrección F_A . El factor de corrección permite estimar la superficie poblada dentro del área de efecto. Estimando el arco poblado dentro del círculo de impacto. Estimar el factor de corrección fd . El cálculo de $fA \times fd$ da un estimado de la fracción poblada afectada.
- Estimar el factor de corrección fm , el cual toma en cuenta las medidas de mitigación que puedes ser tomadas para facilitar vías de escape o refugios que inciden en la disminución de la consecuencia. Y que constituyen acciones altamente dependiente en el tipo de accidente que ocurra.

Frecuencia de Accidentes (Número de accidentes/año)

Para calcular la frecuencia ($P_{t,s}$ número de accidentes/año) de accidentes durante el transporte t de una sustancia peligrosa s que resultan en las consecuencias estimadas de acuerdo a los círculos de peligro, el valor $N_{t,s}$ puede calcularse usando la ecuación (7):

$$N_{t,s} = N'_{t,s} + n_c + n_{\tau\delta} + n_p \quad (7)$$

Donde:

- $N'_{t,s}$ = Número de probabilidad promedio para el transporte de una sustancia;
- n_c = Parámetro de corrección debidas a las condiciones de seguridad del sistema de transporte;
- $n_{\tau\delta}$ = Parámetro de corrección por las densidad de tráfico;
- n_p = Corrección a la probabilidad por la dirección del viento hacia las áreas pobladas.

Procedimiento de cálculo de la frecuencia de accidentes

- Seleccionar una ruta, escoger 1 Km de distancia entre dos nodos, considerando el punto de mayor peligrosidad debida a la combinación de condiciones no favorables (alta población y baja seguridad en condiciones de tráfico).

- Si varias sustancias son transportadas por esta ruta, analizarlas de manera independiente.
- Seleccionar de tablas reportadas el número de probabilidad $N'_{t,s}$ para cada sustancia o grupo de sustancias. Esto debe ser hecho para cada arco de la combinación de rutas bajo análisis.
- Estimar el parámetro de corrección de acuerdo a tablas n_c .
- Estimar el parámetro de corrección de acuerdo a tablas $n_{t\delta}$.
- Estimar el parámetro de corrección n_p .
- Calcular el número de probabilidad $N_{t,s}$ usando la ecuación (7).

Cálculo del Riesgo Resultante

Para cada actividad analizadas (una porción fija de un camino o tubería), un par de números ha sido calculado:

- Número de fatalidades (Consecuencia)
- Frecuencia de accidentes

El valor de riesgo de estas actividades es estimado de la combinación de ambos valores como es mostrado en la **Figura 6**, donde los valores de frecuencia (accidentes/año) y consecuencia (fatalidades por accidente) son graficados en un plano cartesiano.

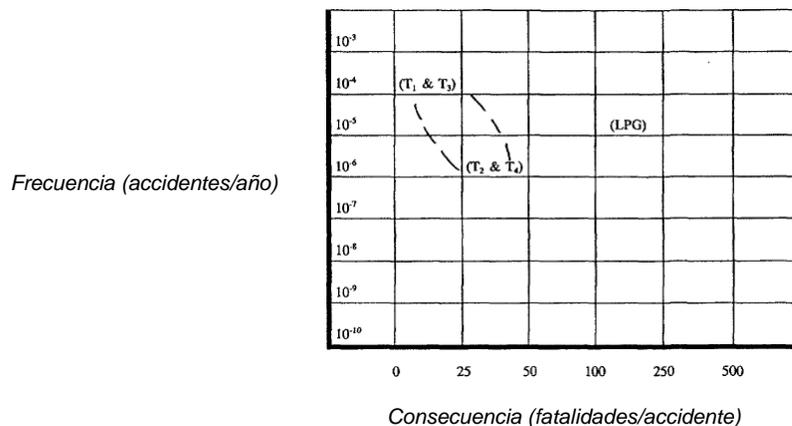


Figura 6.- Gráfica de frecuencia vs. Consecuencia

De la metodología propuesta por la IAEA puede concluirse que constituye un medio excelente para el cálculo de un índice de riesgo en el transporte “On-Site”, ya que cumple con los requisitos de ser integrado dentro de una herramienta de planeación. No obstante, para presentar la información en forma de índices y que el modelo resultante sea programable habrá que integrar modificaciones en la estimación de la frecuencia de accidentes y consecuencias del accidente.

2.3.4 Software disponible para análisis de riesgo en el transporte

Haciendo una revisión a las opciones disponibles en el mercado se han encontrado las siguientes alternativas:

- **HazTrans (Abkowitz and Associates)**- El programa es de tipo multimodal, se trata de una herramienta para el manejo de embarques, materiales y contenedores específicos. Utiliza datos disponibles del “U.S. Census Bureau”, el “U.S. Geological Survey” y el “National Weather Service”. Además permite al usuario efectuar una revisión del riesgo asociado, ruta, programación, respuesta ante emergencia y manejo de incidentes. (*AICHE, 1995*)
- **PC* HazRoute (ALK Associates)** – Es una aplicación que facilita a las compañías transportistas seleccionar la vía férrea y ruta de autopista para el transporte de sus materiales peligrosos. Analiza el costo y los factores de riesgo involucrados en el movimiento de materiales peligrosos a través de una ruta existente o proponiendo una, además de generar rutas alternativas basado en los criterios de riesgo seleccionados por el usuario. El programa está basado en datos de los Estados Unidos, estadísticas de población y datos de seguridad. (*AICHE, 1995*)
- **SAFETI (Técnica, Inc.)** – Es un grupo de programas integrados diseñados para automatizar el análisis de riesgo en instalaciones químicas y petroquímicas involucrando la manufactura, almacenamiento y transporte de materiales tóxicos e inflamables. Calcula las consecuencias de posibles fugas accidentales y su impacto, basado en la frecuencia de un evento para producir mediciones de riesgo tales como las curvas FN. (*AICHE, 1995*)

Las herramientas computacionales mencionadas calculan rutas para el transporte de materiales peligrosos basados en categorías de ruta. A partir de la base de datos con las que cuentan seleccionan las rutas factibles para el transporte. De igual modo, alertan sobre restricciones en cantidad y cualquier punto de alto riesgo en el trayecto, no obstante ninguna tiene aplicación en el transporte “On-Site”, además de que dichas aplicaciones han sido desarrolladas para carreteras de Estados Unidos y Canadá, por lo que no contemplan el carácter de universalidad.

2.4 Conclusiones a la revisión bibliográfica

En base a la información consultada se ha hecho una revisión al estado actual de la medición del riesgo en el manejo y transporte de materiales peligrosos, identificando lo siguiente:

- La base de todo análisis de riesgo consiste en identificar una serie de escenarios, evaluando según la probabilidad de eventos y su impacto potencial o consecuencia.
- La medición del riesgo puede hacerse a través de índices de riesgo adimensionales cuando existe una limitante de información estadística en el problema a resolver y cuando se efectúe un análisis preeliminar, donde los valores resultantes sean usados para comparar procesos entre sí.
- El análisis de riesgo en el transporte debe seguir una secuencia de pasos semejante a la determinación en instalaciones fijas pero con un enfoque “dinámico” por la naturaleza cambiante de los parámetros que lo definen; los cuales varían a través de una ruta.
- Los modelos actuales en el transporte de materiales peligrosos contemplan que existen elementos de decisión en los arcos de ruta (*Erkut & Verter*) y materiales a enviar (IAEA), sin embargo no identifican ni cuantifican elementos de riesgo en las características del vehículo (transporte).
- La modelación de riesgo en el transporte identifica el método de “Círculo de Peligro”, trasladado a través de cada segmento de ruta (entre dos nodos) una buena aproximación a la consecuencia de eventos de peligro. Aunque no es imposible realizar un análisis de riesgo cuantitativo, es poco práctico, para su integración en un modelo de optimización matemática.
- La metodología propuesta por el IAEA, cuantifica el impacto o consecuencia en función a la mortalidad de la gente que habría en las zonas circundantes a la ruta. A través de tablas es cuantificada la peligrosidad de los materiales transportados.
- Las herramientas computacionales existentes para el análisis de riesgo en el transporte no integran modelos de optimización matemática, además no tener aplicación en el transporte “On-Site” de materiales peligrosos.

Es por tanto, que es justificado proponer un nuevo método para la evaluación de riesgo en el transporte. Esta nueva metodología será denominada: Índice de Riesgo en el Transporte (IRT).

Capítulo 3 Modelo de evaluación de riesgo en el transporte

3.1 Introducción

Como ha sido expuesto, existen dos posibles enfoques para el análisis de riesgo en el transporte de materiales peligrosos:

- El análisis de riesgo cuantitativo basado en la identificación de “escenarios”, evaluando los eventos de mayor impacto a lo largo de puntos de particular interés económico o social (zonas densamente pobladas o procesos industriales).
- El análisis de riesgo cualitativo, basado en técnicas de análisis preliminar (índices de riesgo) con dependencia exclusiva del nivel de peligrosidad del material o conjunto de materiales a transportarse.

Ambas metodologías, a pesar de ser utilizadas en la industria para estimar el riesgo en el transporte, resultan poco adecuadas o limitadas para su aplicación en un modelo de planeación “On-Site”.

En el primer caso, un análisis de riesgo cuantitativo no resulta práctico, debido a la inexistencia de estadísticos detallados de incidentes de transporte dentro de instalaciones industriales y a la complejidad de desarrollar modelos de impacto convencionales para todas las variables de decisión a lo largo de la ruta.

En el segundo caso, el modelo desarrollado por la *IAEA* para determinar el impacto resultante de la emisión o derrame de materiales químicos resulta limitado por no identificar y a un mismo tiempo cuantificar todos los elementos de riesgo sobre los que se tiene control en la planeación:

- Selección de ruta
- Elección del vehículo
- Cantidades a enviar por viaje

El presente capítulo propone dos cosas: por un lado, constituir una herramienta en base a listados de revisión y rúbricas para valorar la probabilidad de ocurrencia de un incidente de peligro y por el otro, mostrar la aplicación de una metodología de evaluación del riesgo en el transporte utilizando la información generada. Ambas deberán cumplir con la característica de incluirse en un modelo matemático de planeación para la logística “On-Site” de materiales peligrosos. Este nuevo índice podrá calcularse para un gran número de opciones en variantes de proceso y diseño, donde cada uno de los índices obtenidos sea representado por un número adimensional, con único significado al ser comparado con respecto a otro que se haya calculado mediante el mismo método.

3.2 Fundamento teórico del Índice de Riesgo en el Transporte (IRT)

El análisis de riesgo en el transporte se enfoca a la peligrosidad asociada con la pérdida de materiales peligrosos como efecto de un accidente durante el proceso de transporte.

Habiendo identificado que la probabilidad de una emisión o derrame es generalmente función de la distancia recorrida y el vehículo seleccionado, se enumeran las características de la ruta y el transporte que influyen de manera significativa en la frecuencia de accidentes.

Por su parte, propiedades de los materiales tales como la inflamabilidad o toxicidad, así como las cantidades transportadas, se relacionan directamente con el impacto que pudiera tener una emisión o derrame de este material al medioambiente.

Las contribuciones al riesgo son la resultante de la interacción de ambos elementos: probabilidad e impacto, por lo que con el fin de cuantificarlos deben ser debidamente caracterizados y valorados para asegurar que todos los elementos de peligro sean debidamente evaluados.

3.2.1 Definición de conceptos

En el capítulo anterior ha sido definido el riesgo, por lo que el objetivo en este punto será definir los conceptos básicos sobre los que parte el índice propuesto: **“Evento”** e **“Incidente”**. En el contexto de la metodología propuesta un evento es *“cualquier acontecimiento en al transporte de materiales peligrosos que resulte en una de pérdida, emisión de materia o liberación de energía”*, en tanto que un incidente es definido como *“la consecuencia resultante de la pérdida, emisión de materia o liberación energía”*.

De lo anterior se infiere que un único evento pudiera desencadenar una serie de incidentes a un mismo tiempo. Para aclarar el punto, se propone el siguiente ejemplo:

Un único evento: **“Fuga de gas tóxico e inflamable a través de una conexión de un auto tanque”**, puede ocasionar los siguientes incidentes, únicamente por las características y cantidad del material transportado:

- Incendio a chorro (Ignición Inmediata)
- Explosión de una nube de gas (Ignición retardada)
- Bola de fuego (Ignición retardada)
- Nube de gas tóxica (Sin ignición)

Habiendo identificado los dos conceptos principales se procederá a definir los elementos que son utilizados para la evaluación del índice propuesto.

Todos los elementos de decisión en el transporte de materiales han sido agrupados en categorías que se han denominado “**Rubros**”; en el caso particular de la evaluación del sistema On-Site se han identificado cinco rubros principales: **Material, transporte, ruta, personal, nodos**.

Habiendo identificado a un rubro como un conjunto, se ha definido que cada uno está compuesto por “**Instancias**”, donde estas representan los elementos de decisión y donde cada una puede ser evaluada en función a sus “**Características**” de forma independiente.

La selección de un grupo de instancias: “La elección de una **ruta A** para el transporte de un **material B**, utilizando un **transporte C**, con el **personal D**, entre dos **nodos E**”, es definido como un “**Proceso**” el cual es valorado para calcular el consecuente índice de riesgo con el fin de ser comparado con otros.

La importancia de definir el proceso de este modo, radica en que las características de cada instancia contribuyen en su conjunto a la probabilidad o consecuencia de un evento o un incidente. En la **Figura 7** se muestran los términos previamente definidos:

En este punto es importante destacar que el presente escrito solo contempla los rubros: **Transporte, ruta, materiales**. La caracterización de **nodos**, conceptualmente asociados como almacenes o puntos de recepción, constituye un tema de investigación futura, donde se desee establecer un modelo de planeación que incluya la toma de decisiones en almacenes (control de inventarios de materiales peligrosos, periodos de re-orden, etc.). De igual modo, el análisis del rubro **personal** aunque es descrito, no es incluido en el modelo de programación para la selección de cuadrillas de trabajo, por lo que no es cuantificado en el cálculo del índice de riesgo en el transporte (**IRT**). La metodología desarrollada contempla que el modelo propuesto no pierda validez por no incorporar estos dos rubros, sino por el contrario se enfoque a la toma de decisiones en transporte, ruta y materiales.

"PROCESO"
 Material, Ruta, Transporte, Nodos, Personal

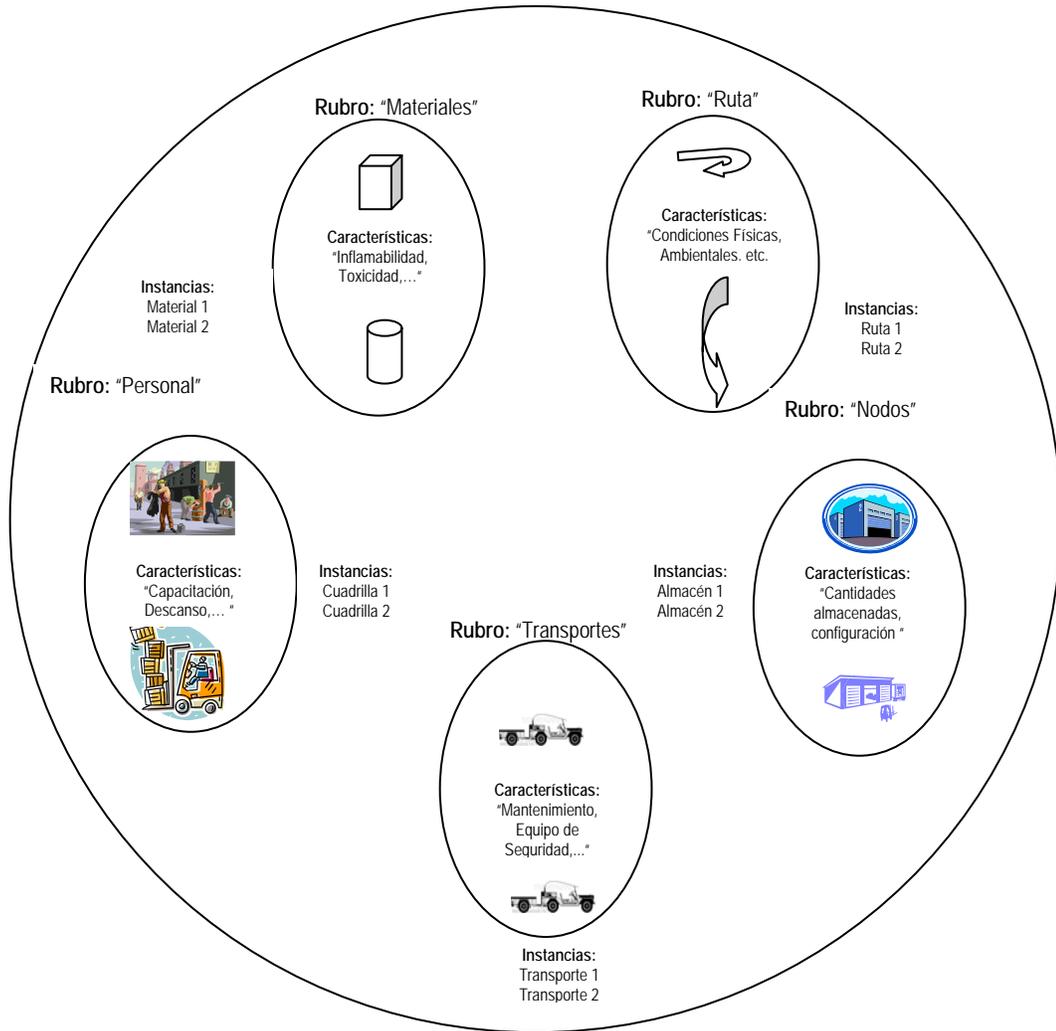


Figura 7.-Definición de conceptos

3.2.2 Identificación de eventos en el transporte

Con el fin de cumplir con la definición general de riesgo en función a la probabilidad e impacto, el modelo propuesto deberá cuantificar el impacto total a una serie de eventos de peligro en el transporte.

- **Colisión**

De todos los accidentes que ocurren en el transporte, los de mayor consecuencia son los resultantes por una colisión. Esta categoría contempla:

- Un vehículo que colisione contra otro en movimiento.
- Un vehículo que colisione contra otro estacionado o contra una instalación fija.

- **Volcadura**

La volcadura de un vehículo que transporte materiales peligrosos resultará en una liberación del material que contenga, causando daños a las zonas circundantes. Las causas posibles pudieran ser determinadas por: las características del vehículo, condiciones de las llantas, localización del centro de gravedad del vehículo, pericia del conductor, condiciones del pavimento a través de la ruta.

- **Falla en Medios de Contención**

Una falla del medio de contención tendrá como consecuencia una emisión/derrame a través de conexiones en el transporte de materiales a granel o a la pérdida de carga cuando los materiales empacados no han sido debidamente sujetos al transporte.

- **Falla de Equipo Auxiliar**

Este evento está muy relacionado al anterior, sin embargo no es por fallas en el vehículo en sí o en los medios de contención, sino en los equipos auxiliares utilizados para las operaciones de carga y descarga, dispositivos de seguridad o de mitigación (extintores).

3.2.3 Identificación de posibles incidentes en el transporte

La lista de incidentes resultantes; como ha sido previamente mencionado es función exclusiva de las propiedades y cantidades del material transportado.

- **Derrame de Líquido Inflamable**

Un derrame de líquido inflamable cuantifica el impacto que ocasionaría una alberca de fuego o una explosión.

- **Emisión de Gas Inflamable**

Una emisión de gas inflamable resultará en una explosión, una bola de fuego, un fuego a chorro.

- **Derrame de Líquido Tóxico**

Un líquido tóxico representa el impacto de una alberca de líquido tóxica, una nube de gas por la evaporación del líquido derramado.

- **Emisión de Gas Tóxico**

La emisión de un gas tóxico que no se dispersa (nube de gas) y afecta al personal circundante o la dispersión del gas en un radio de impacto.

- **Fuga de Explosivos**

Este grupo de materiales no son inflamables o tóxicos, pero cuenta con la característica de producir explosiones, por ser altamente reactivos.

3.3 Caracterización de eventos de transporte

La metodología para calcular la frecuencia de incidentes, propuesta por el IAEA se basa en la estimación de “números de probabilidad”. Con el fin de continuar bajo la misma estrategia, pero al mismo tiempo identificar todos los posibles puntos de peligrosidad en el transporte de materiales peligrosos, se proponen métodos alternos para la estimación del riesgo mediante probabilidad subjetiva, con el fin de construir historiales que permitan la planificación de las actividades de transporte.

Para llevar a cabo el ejercicio, en la **Tabla 7** se muestran las principales características que en base a la literatura consultada (*BNL, 2005; AICHE, 1995*) son mencionadas como las más relevantes. Las características deberán valorarse como elementos independientes, dado que como puede inferirse no repercuten de igual modo en la probabilidad de ocurrencia de todos los eventos. Como ejemplo, vale la pena citar que para el evento “**Falla en Medios de Contención**”, las características de condiciones de ruta no repercuten en la probabilidad del evento, caso contrario con características del transporte que inciden directamente en la probabilidad de este evento.

Tabla 7.-Características por Rubro que inciden en Eventos de Riesgo

Rubro	Características	Colisión	Volcadura	Falla en Medios de Contención	Falla de Equipo Auxiliar
Ruta	Condiciones de Pavimento	✓	✓		
	Amplitud de Vía	✓	✓		
	Características de Vía	✓	✓		
	Elementos externos de la ruta	✓			
	Características de zonas de carga y descarga	✓			
	Características de intersecciones	✓			
	Condiciones de Tráfico	✓	✓		
	Visibilidad y Señalización	✓	✓		
	Políticas de Ruta	✓	✓		
	Condiciones Ambientales	✓	✓	✓	
Transporte	Características de etiquetado				✓
	Información de Seguridad				✓
	Condiciones de carga de materiales empacados		✓	✓	
	Separación de materiales empacados				
	Condiciones de carga de materiales a granel			✓	
	Procedimientos de llenado en auto tanques			✓	✓
	Operaciones de transferencia de carga				✓
	Procedimientos de Inspección			✓	✓
	Condiciones de equipos auxiliares			✓	✓
	Condiciones generales del transporte	✓	✓	✓	✓
	Condiciones de Mantenimiento	✓	✓	✓	✓

3.3.1 Identificación de las “Características”

Debido a la dificultad que representa contar con datos históricos en los accidentes derivados del transporte de materiales On-Site, y en función a la necesidad de proponer una evaluación preeliminar. Se propone la caracterización de cada rubro mediante “Hojas de Control” y su correspondiente cuantificación mediante “Rúbricas”.

Es importante destacar que ni los listados de revisión, ni las rúbricas pretenden ser únicas, las características asociadas a cada uno de los rubros pudieran ser distintas según sean las instalaciones donde pretenda implementarse el presente modelo de planeación, por lo que es de esperarse que el usuario incremente las características propuestas y modifique su respectiva ponderación.

El libro *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis (AICHE, 1995 b)* identifica la lista de elementos de peligro más frecuentemente asociados al transporte, expuestos en la **Tabla 8**. Las principales causas están agrupadas en cuatro grupos:

Errores humanos, fallas de equipo, fallas del sistema o procedimientos y eventos externos.

Tabla 8.- Principales causas que contribuyen a incidentes en Auto-transportes (AICHE 1995)

Errores Humanos	Fallas de Equipos	Fallas en Procedimientos	Eventos Externos
Daños debido al conductor	Transporte inadecuado a la carga	Entrenamiento del conductor	Vandalismo
Velocidad	Falla en cruceros de vías	Selección del transportista	Condiciones meteorológicas
Conductor cansado	Emisión a través de válvulas	Especificación del contenedor	Deslaves, inundación
Inspección en ruta	Emisión a través de conexiones	Selección de la ruta	Accidentes pre-existentes
Contaminación	Falla de frenos	Entrenamiento en respuesta de emergencia	
Inercia	Falla de aislamiento	Políticas de velocidad	
Otros conductores	Falla de equipos de seguridad	Mantenimiento	
Carga no asegurada	Ponchadura de llanta	Inspección	
	Represionamiento	Restricciones por hora del día	
	Defecto en materiales		
	Vacío		
	Falla en frenos		
	Derrame		
	Alto centro de gravedad		
	Corrosión		
	Soldadura incorrecta		
	Pendiente pronunciada		
	Intersecciones mal señaladas		
	Sistema de suspensión		
	Falla en quinta rueda		

Las causas se han integrado como características de los rubros transporte y ruta, además se ha revisado, la legislación vigente. En materia de transporte de materiales peligrosos, México cuenta con el “*Reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos*”, publicado por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. En Estados Unidos, existe una normatividad mucho más extensa el “*Title 49 Code of Federal Regulations (CFR)*”, y algunas otras normas del Departamento de Transporte (DOT) y la Agencia de Materiales Peligrosos (HAZMAT).

Además, se han revisado las normas publicadas por la Secretaria del Trabajo, específicamente las normas relativas a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, señalización e iluminación. Sin embargo, se ha encontrado que no existe un reglamento específico para el transporte On-Site de materiales peligrosos, ni en México ni en los Estados Unidos, por lo que los reglamentos para el transporte terrestre en vías federales han sido usados como base para la elaboración de los listados.

3.3.1.1 Rubro Transporte

De la revisión de prácticas en el transporte, surge la idea de elaborar una “**Hoja de Control**” (Tabla 9) que permita evaluar las operaciones y condiciones del vehículo utilizado. Las características han sido divididas en dos grupos principales: **Condiciones de carga/descarga y condiciones del vehículo.**

Tabla 9.-Hoja de Control para el Rubro Transporte
**HOJA DE CONTROL
RUBRO TRANSPORTE**

Condiciones de Carga/Descarga		SI	NO	NA
Características de etiquetado	1.-¿El etiquetado y marcado de los productos es fácilmente visible y legible?			
	2.-Si los recipientes son de capacidad superior a 450 litros, ¿Han sido rotulados en dos lados opuestos?			
	3.-Para el caso de materiales peligrosos. ¿En el etiquetado, está descrita toda la información relevante para conocer su contenido y características?			
	4.-¿El marcado y etiquetado de la mercancía se ha hecho según los lineamientos de alguna norma oficial de carácter internacional o nacional?			
Información de seguridad	1.-¿El transporte cuenta con Hoja de Seguridad (MSDS) por producto?			
	2.-¿Se cuenta con los procedimientos operativos relacionados a la carga, estiba, transporte, manipulación y descarga?			
	3.-¿Existe equipo de seguridad en el vehículo, incluyendo extintores y equipo de protección personal?			
	4.-¿El transportista cuenta con las instrucciones de que hacer y medidas de emergencia, para adoptar en caso de accidente?			
Condiciones de carga de materiales empacados	1.-¿Los mercancías han sido revisadas exteriormente para descubrir posibles daños, y solo han sido cargados las mercancías en buen estado?			
	2.-¿Las mercancías son repartidas de modo uniforme en el contenedor/vehículo, para equilibrar el centro de gravedad?			
	3.-¿Los paquetes que contienen mercancías son factibles de ser fijados para evitar su movimiento durante el transporte?			
	4.-¿Durante su carga y descarga, los paquetes están protegidos de daños resultantes a accidentes en el traslado o condiciones ambientales?			
	5.-¿Los recipientes que contienen los materiales están aprobados por la norma oficial vigente (nacional o internacional) para contener el material?			
Separación de materiales empacados	1.-¿Los materiales son separados por clase?			
	2.-¿Las mercancías incompatibles se separan unas de otras durante el transporte?			
	3.-¿El espaciamiento entre químicos es suficiente para prevenir mezclado en caso de derramamiento?			
	4.-¿Los espacios entre las mercancías peligrosas han sido llenados con carga compatible?			
Condiciones de carga de materiales a granel	1.-¿Los auto tanques han sido debidamente revisados, limpios, secos y en condiciones para cargar materiales?			
	2.-¿Los auto tanques han sido debidamente revisados para identificar elementos de corrosión o fallas por fuerza puntual?			
	3.-¿Los auto tanques cuentan con recubrimiento especial para materiales corrosivos?			
	4.-¿Los auto tanques cuentan con dispositivos de seguridad para liberar presión en caso de represionamiento?			
	5.-¿Los auto tanques cuentan con válvulas debidamente señalizadas para la carga y descarga?			
Procedimientos de llenado en auto tanques	1.-¿Existirá disponibilidad para que una persona entrenada revise el procedimiento durante la carga/descarga de material?			
	2.-¿Se ha verificado que el contenedor sea seguro para el llenado con materiales?			
	3.-¿Se tienen procedimientos para evitar la contaminación de químicos al cargar o descargar el material?			
	4.-¿En los materiales a granel se utilizan alarmas de nivel?			
	5.-¿Se maneja recirculación del material a granel para mantener control de temperatura y condiciones de estabilidad en el material?			
Operaciones de transferencia de carga	1.-¿Las zonas de carga y descarga, son de fácil acceso para los vehículos?			
	2.-¿Las operaciones de carga y descarga son conducidas o supervisadas por personal experimentado?			
	3.-¿Se tiene un contacto directo con los empleados cuando es requerido efectuar operaciones de carga poco comunes?			
	4.-¿Se cuenta con material para hacer limpieza en caso de derrame de producto accidental?			

**HOJA DE CONTROL
RUBRO TRANSPORTE**

Condiciones de Carga/Descarga		SI	NO	NA
Procedimientos de inspección	1.-¿Se ha verificado que el transporte esté debidamente asegurado al pavimento con calzas, previo a las operaciones de carga-descarga?			
	2.-¿Se han inspeccionado las válvulas, conexiones, alivios y tubería antes de la carga?			
	3.-¿Se ha revisado la compatibilidad de los materiales con los equipos involucrados en las operaciones de transferencia?			
	4.-¿Se ha verificado que los sistemas eléctricos estén sin corriente antes de las operaciones de carga o descarga?			
	5.-¿Se hace una inspección visual a la carga previo a la salida del conductor del área?			
	6.-Durante el proceso de descarga, ¿Los bultos son protegidos contra todo daño. Es decir "empaletados", para evitar ruptura con las cuñas del montacargas o un daño accidental por manipulación defectuosa?			
Condiciones de equipos auxiliares	1.-¿Se cuenta con equipo especializado, para hacer las operaciones de carga y descarga de materiales (montacargas, bombas, grúas)?			
	2.-¿Se cuenta con pallets acondicionados para su carga en camión o Low Boy?			
	3.-¿Se cuenta con conexiones de brida para fluidos peligrosos?			
	4.-¿Bombas para transferencia con sellos apropiados (Condiciones de mto adecuadas)?			
	5.-¿Control y aislamiento de válvulas para evitar derrames?			
	6.-¿Se hace inspección a los sellos, sistemas de drenado, línea y válvulas?			
	7.-¿Mangueras adecuadas para la transferencia de fluidos?			
Condiciones del Vehículo		SI	NO	NA
Condiciones generales del vehículo	1.-¿Se hace una inspección previa y posterior al vehículo cada turno?			
	2.-¿El vehículo cuenta con manual de operación?			
	3.-¿El vehículo cuenta con sistemas de seguridad, apropiados para los materiales y condiciones de viaje?			
	4.-¿Los equipos de seguridad en el vehículo funcionan adecuadamente?			
	5.-¿El vehículo cuenta con equipo de seguridad contra volcaduras?			
	6.-¿El vehículo cuenta con dispositivos de alivio, que funcionen adecuadamente?			
	7.-¿El vehículo cuenta con sensores de temperatura y presión?			
Condiciones de mantenimiento	1.- ¿Existe una bitácora de viajes actualizada y un programa de mantenimiento para la flota de transporte?			
	2.-¿El "Listado de uso de transporte" por turno es llenado y es cumplido en todos sus puntos?			
	3.-¿El mantenimiento programado es realizado una vez al año o cuando el vehículo se descompone?			
	4.-¿El vehículo recibe una inspección por parte de mantenimiento al menos cada 6 meses o según el tiempo establecido por el departamento de logística?			

- **Condiciones de carga/descarga**

Características de etiquetado

El etiquetado y marcado de los productos es una característica relevante dentro de los procedimientos de seguridad, con el fin de evitar fallas humanas en la contaminación de la carga de materiales. En México aplica la NOM-003-SCT/2000 que trata sobre las características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

Información de Seguridad

La documentación de los materiales es de gran importancia ante cualquier incidente que pudiera presentarse en las operaciones de carga o transporte. Cada vehículo debe contar con: hojas de seguridad de los materiales, información referente al manejo y estibado de los productos, procedimiento por escrito de las medidas a tomar en caso de

accidentes. En México la reglamentación vigente puede consultarse en las normas: NOM-005-SCT/2000 (Información de emergencia para el transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos) y en NOM-052-SEMARNAT-1993 (Características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente).

Condiciones de carga de materiales empacados

La característica es particularmente relevante con el fin de revisar las condiciones del envase de materiales peligrosos, su distribución al ser cargados en el transporte, el que los materiales sean asegurados para evitar que caigan durante el transporte, el que se encuentren debidamente protegidos durante condiciones ambientales adversas, tales como lluvia o calor excesivo y el que los recipientes estén aprobados por la norma oficial vigente. A este respecto la reglamentación mexicana establece en la NOM-011-SCT2/2003 las condiciones para el transporte de las sustancias y materiales peligrosos en cantidades limitadas.

Separación de materiales empacados

Debido a la naturaleza de los materiales peligrosos, se busca establecer la compatibilidad de los químicos. En primer lugar verificando que se carguen productos que no den como resultado reacciones violentas, y buscando que el espaciamiento sea el adecuado. A este respecto la normatividad vigente en México, es establecida por la NOM-010-SCT2/2003 sobre las disposiciones de compatibilidad y segregación, para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

Condiciones de carga de materiales a granel

Cuando se transportan materiales a granel, es de vital importancia tomar en consideración: Procedimientos de limpieza de auto-tanques, identificación de las características de riesgo posibles dentro del contenedor, correcto funcionamiento de equipos de seguridad y la debida identificación de válvulas con el fin de evitar errores en los procedimientos de carga y descarga. Al respecto la legislación mexicana cuenta con la NOM-020-SCT-2-1995 (Requerimientos generales para el diseño y construcción de auto tanques destinados al transporte de materiales y residuos peligrosos).

Procedimientos de llenado en auto tanques

En la literatura, se ha notado que existe un gran número de incidentes relacionados al llenado de auto-tanques. Es importante que una persona entrenada en apoyo del transportista efectúe los procedimientos de carga y descarga, con el fin de evitar contaminación de carga o fugas durante los procedimientos, que revise que los tanques mantengan un espacio libre, verifique el funcionamiento de alarmas de nivel para evitar derrames por sobrellenado y recircule el producto para homogenizar condiciones de temperatura una vez cargado el producto.

Operaciones de transferencia de Carga

Este apartado se refiere a la facilidad con que el conductor puede acceder al punto de carga, a si cuenta con equipo adecuado para realizar las operaciones, al material de limpieza en caso de derrame accidental, a las condiciones de los equipos auxiliares y a cualquier evento que pudiera dañar el empaquetado a la hora de subir la carga.

Procedimientos de Inspección

Con el fin de reducir los incidentes en operaciones de carga y descarga de materiales peligrosos, es aconsejable la inspección de los equipos y de los procedimientos a intervalos regulares de tiempo, proveer una adecuada supervisión de estas operaciones e inspeccionar las operaciones de manejo puede reducir los incidentes en esta etapa del transporte.

Condiciones de equipos auxiliares

No solo es relevante el que existan equipos de transferencia, sino que los equipos auxiliares cuenten con el mantenimiento adecuado con el fin de evitar incidentes. Esta característica evalúa este aspecto en particular.

- **Condiciones del vehículo**

Condiciones generales del vehículo

Es conveniente una revisión general a las condiciones del transporte. En la reglamentación mexicana la NOM-032-SCT2/1995 se especifican las condiciones de seguridad para un carro tanque, las cuales consisten en protecciones laterales, sistema anti-vuelco, así como accesorios adicionales en el tanque para evitar derrames.

Condiciones de mantenimiento

En este punto, se ha querido dar un énfasis a un breve listado de 16 puntos, que el conductor debe hacer al iniciar su turno. Una forma de disminuir los riesgos, derivados por un malfuncionamiento del equipo, es a través de programas de revisión pre-operativos. El compromiso por parte de la gerencia es de vital para mantener un mantenimiento óptimo de la flotilla de vehículo.

3.3.1.2 Rubro Ruta

A través de la “Hoja de Control” expuesta en la **Tabla 10**, se hace una revisión a las principales características que hacen de una ruta, una vía segura o riesgosa para el transporte de materiales peligrosos.

Las características han sido divididas en dos grupos principales: **Condiciones de Generales de Ruta, Puntos de Alto Riesgo, Condiciones de Tráfico, Visibilidad y Señalización, Vías y Salidas de Evacuación, Políticas de Ruta.**

Tabla 10.- Hoja de Control para el Rubro Ruta
**HOJA DE CONTROL
RUBRO RUTA**

Condiciones Generales de Ruta		SI	NO	NA
Condiciones de pavimento	1.-¿Se cuenta con algún tipo de pavimento en la ruta de transporte?			
	2.-De existir pavimento, ¿Es de tipo flexible (carpeta asfáltica)?			
	3.-De existir pavimento, ¿Es de tipo rígido (concreto)?			
	4.-De existir pavimento, ¿Es de tipo empedrado?			
	5.-Si el trayecto no está pavimentado, ¿La vía es de terracería?			
	6.-¿El terreno esta debidamente acondicionado para el transporte de equipos pesados?			
	7.-¿El terreno cuenta con inclinación para evitar escurrimientos?			
	8.-¿Se cuenta con canaletas laterales para la contención de fluidos?			
	9.-¿Existen irregularidades en el pavimento o baches?			
Amplitud de Vía	1.-¿El trazado de la vía es específico para la circulación de vehículos pesados?			
	2.-¿El vía cuenta con puentes, o zonas de angostamiento?			
	3.-¿El camino cuenta con acotamiento?			
	4.-¿La amplitud del camino permite realizar sin riesgos todas las operaciones de maniobras?			
	5.-¿Los vehículos que circulan a través de la vía cumplen con las disposiciones de la normatividad vigente (en México NOM-012-SCT-2-1995)?			
Características de la vía	1.-¿Existe una continuidad en la ruta?			
	2.-¿Hay necesidad de trayectos alternos o desviaciones con malas condiciones de vía?			
	3.-¿Trayecto principalmente lineal?			
	4.-¿Trayecto accidentado con necesidad de efectuar maniobras continuas?			
	5.- ¿Existe una alta elevación del terreno?			
	6.- ¿Existe peralte en las curvas?			
	7.-¿Existen trabajos de reparación en la zona?			
	8.-¿Las características de la vía permiten el fácil acceso para actividades de limpieza o mitigación en caso de incidente?			
Elementos externos de la ruta	1.-¿Existen centros con alta densidad poblacional cercanos a la ruta (comedores, edificios administrativos, etc.)?			
	2.-¿El tránsito del personal que inicia o termina turno laboral pasa por la ruta seleccionada?			
	3.-¿La ruta pasa por procesos productivos propios o externos?			
	4.- ¿La ruta pasa por procesos productivos de transformación donde se involucran otros materiales peligrosos o liberación de energía?			
	5.-¿Existen zonas protegidas o ambientalmente sensibles en el curso de la ruta?			
	6.-¿Existen cuerpos de agua cercanos a la zona de tránsito en caso de derrame?			

**HOJA DE CONTROL
RUBRO RUTA**

Puntos de Alto Riesgo				
Características de zonas de carga y descarga	1.-¿Las zonas de carga y descarga cuentan con diques de contención para prevenir derrames?			
	2.-¿Las zonas de carga y descarga, están debidamente delimitadas y señalizadas?			
	3.-¿Existe buena visibilidad en las zonas de carga y descarga a cualquier hora del día ?			
	4.-¿El acceso a las zonas de carga/descarga requiere de pocas maniobras?			
	5.-¿Las zonas de carga y descarga cuentan los equipos mínimos de mitigación de incendios y limpieza de derrames?			
	6.-¿Las zonas de carga y descarga se encuentran alejadas de procesos de liberación de calor o líneas eléctricas?			
Características de las Intersecciones	1.-¿La ruta propuesta tiene intersecciones de alto riesgo (restricciones de visibilidad, alto tráfico)?			
	2.-¿Las intersecciones están debidamente señalizadas?			
	3.-¿La ruta atraviesa cruces con vías de ferrocarril?			
	4.-¿Las vías de ferrocarril están debidamente señalizadas?			
	5.-¿Existe una práctica de alto total en todas las intersecciones a todas horas del día?			
	6.-¿Las intersecciones cruzan vías principales de tránsito por donde circulan peatones y tráfico no industrial?			
Condiciones de Tráfico				
Condiciones de Tráfico	1.-¿Se tiene un estimado realista del tiempo para las operaciones transferencia de materiales?			
	2.-¿Los tiempos de transporte son agendados de manera que los embarques sean descargados poco después de llegar a sus destinos?			
	3.-¿El paso del vehículo es a través de zonas con alto tráfico de vehículos y/o personal?			
	4.-¿Existe un Plan de Respuesta ante Emergencia en caso de emisión o derrame de materiales?			
	5.-¿Se tiene conocimiento sobre los tiempos de mayor tráfico y se evita el envío de materiales de alta peligrosidad en estos periodos de alta actividad?			
	6.-¿Se han investigado condiciones potencialmente inseguras a través de la ruta y se han hecho ajustes donde sea posible?			
	7.-¿Se ha desarrollado una política para evaluar las condiciones de temperatura y prever sobre condiciones de retraso en el transporte?			
	8.-¿Se tiene un historial de los accidentes en la planta y en base a ellos se toman las decisiones de ruta?			
Visibilidad y Señalización				
Visibilidad y Señalización	1.-¿Se cuenta con iluminación eficiente a lo largo de la vía de noche o bajo condiciones climáticas adversas?			
	2.-¿La iluminación en la ruta está de acuerdo a los niveles mínimos señalados por la normatividad vigente?			
	3.-¿Existe una adecuada señalización a la largo de toda la ruta?			
	4.- Los puntos de mantenimiento, áreas de descanso, paradas temporales y puntos de vuelta están debidamente señalizados?			
Políticas de Ruta				
Políticas de Ruta	1.-¿La ruta seleccionada contempla el mínimo riesgo para el transporte de materiales peligrosos?			
	2.-¿Existe un conocimiento por parte de la gerencia de los riesgos asociados con el transporte de los materiales a través de las rutas?			
	3.-¿Existe un programa de seguridad en marcha para los conductores de los vehículos?			
	4.-¿Existe un programa de administración del riesgo en las operaciones de manejo de materiales peligrosos?			
	5.-¿Se tiene un fuerte compromiso con la seguridad de parte de la gerencia para las operaciones de transporte?			
	6.-¿Existe una guía de respuesta ante emergencias en transporte?			

- Condiciones de Generales de Ruta

Condiciones de Pavimento

Cuando de se cuenta con condiciones de la ruta tales como pavimentación, inclinación para evitar escurrimientos, canaletas laterales para la contención de fluidos y el que el camino carezca de irregularidades, disminuirán la probabilidad de volcaduras y el consecuente derrame de materiales o que se ocasionen daños al personal o asentamientos poblacionales.

Amplitud de Vía

Es frecuente que los caminos estén inhabilitados dentro de las locaciones para el paso de vehículos pesados, por lo que es importante considerar que la vía sea lo suficientemente amplia y carezca de zonas de angostamiento para el paso de un vehículo.

Condiciones de Vía

En este grupo se han determinado elementos tales como que la ruta sea poco sinuosa o que carezca de continuidad, que deban tomarse desviaciones o rutas alternas no acondicionadas para el paso de vehículos pesados.

Elementos Externos

En este punto, se busca analizar elementos externos a la vía de tránsito y que son elementos de riesgo. Zonas densamente pobladas, el tránsito de personal que se dirige a sus centros de trabajo o el paso a través de zonas peligrosas como lo son los procesos productivos de transformación o de almacenamiento de otros materiales peligrosos, pudieran incrementar el impacto a la zona de tránsito en caso de derrame o emisión.

- Puntos de Alto Riesgo

Zonas de Carga y Descarga

En este punto se evalúan las características de puntos de alto riesgo, como lo son las zonas de carga y descarga. El uso de diques de contención evitará que se propaguen fluidos, el adecuado señalamiento posibles colisiones con tanques que contengan una gran cantidad de materiales peligrosos a granel y la visibilidad que se cometan errores en los procedimientos de carga o descarga.

Intersecciones

De acuerdo a un gran número de estudios en transporte, una zona de alto riesgo son las intersecciones, donde pueda darse la colisión con otros vehículos. Por lo que el debido señalamiento de estos puntos y la aplicación de una correcta política en el manejo, disminuirán considerablemente los riesgos en este punto. Todos estos factores vienen en la norma NOM-050-SCT2-2001 Disposición para la señalización de cruces al nivel de caminos y calles con vías férreas. Para la metodología propuesta se tomó como base dicha norma ya tiene un sistema de clasificación a los cruces respecto a sus características.

- **Condiciones de Tráfico**

El tráfico es de gran importancia a tener en consideración, dadas las condiciones en vías altamente congestionadas por otros vehículos o personal. A este aspecto resulta muy relevante que la compañía cuenta con un Plan de Respuesta ante Emergencia en caso de emisión de materiales y que se tenga un historial de accidentes para identificar los puntos de mayor riesgo al momento de seleccionar la ruta.

- **Visibilidad y Señalización**

La visibilidad y señalización constituyen dos puntos importantes en los centros de trabajo para prevenir el riesgo, de tal forma que no constituyan un factor de riesgo para la salud y seguridad durante actividades laborales, en este aspecto la normatividad vigente de la STPS, ha establecido la NOM-025-STPS-1999 sobre condiciones de iluminación en centros de trabajo.

- **Políticas de Ruta**

Para reducir los accidentes asociados al transporte es fundamental establecer una política para el manejo seguro. Establecer una ruta segura, es sinónimo del compromiso y entendimiento de parte de la gerencia para actividades de transporte de materiales peligrosos.

3.3.1.2 Otras Características “no consideradas” en el cálculo del IRT

- **Rubro Ruta – Característica (Condiciones Ambientales)**

Las condiciones meteorológicas son particularmente importantes, pues influyen directamente en el riesgo que representa una actividad como el transporte de materiales. En algunas corporaciones existen restricciones en cuanto al manejo de materiales peligrosos en condiciones meteorológicas adversas tales como lluvia, neblina o heladas. Procurando el tránsito diurno. Sin embargo no son consideradas dentro del presente modelo por la incertidumbre que genera el desconocimiento de las condiciones climáticas para un modelo de planeación como el propuesto.

- **Rubro Personal**

El rubro personal está representado por las políticas seguidas al interior de la compañía con un enfoque a la seguridad. Está integrado por la capacitación que tienen los empleados. Las STPS en el *Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo* dice en su Capítulo Cuarto, Artículo 130, sobre la necesidad de elaborar un programa de seguridad e higiene en el trabajo que considere el cumplimiento de la normatividad en la materia, de acuerdo a las características propias de las

actividades y procesos industriales para todos sus trabajadores. Y particularmente en el caso del entrenamiento en el Artículo 139 cita: “*Los trabajadores será debidamente capacitados por el patrón para el uso adecuado y seguro de las herramientas de trabajo, así como para el cuidado, mantenimiento y almacenamiento de éstas*”. No son consideradas dentro del presente estudio, porque no están integradas en el modelo matemático, como selección de cuadrillas de trabajo.

3.3.2 Evaluación de las “características” por rúbrica

Para realizar una adecuada cuantificación del riesgo que permita realizar la optimización matemática, cada uno de los rubros es cuantificado siguiendo la metodología propuesta.

El procedimiento de cuantificación es independiente de los eventos o incidentes, depende únicamente de la comparación de las respuestas de la hoja de control o índices respectivos para el caso de los materiales y su comparación contra su respectiva rúbrica.

En el caso de cada una de las características identificadas por rubro, se ha propuesto una ponderación del **0** al **4**, identificando al menor valor como aquel que defina las características ideales que permitan disminuir el riesgo de que ocurra un evento no deseado (incidente).

La **Tabla 11** muestra el formato de las tablas comparativas, donde el usuario elegirá el valor con respecto a las situaciones descritas:

Tabla 11.- Modelo general de ponderación de riesgo por rubro

RUBRO	Nivel de Riesgo				
	No contribuye	1	2	3	4
Característica 1	0 La característica no es relevante	1 Riesgo Mínimo	2 ...	3 →	4 Riesgo Máximo
Característica 2					
Característica N					

A continuación en **Tabla 12** y **Tabla 13**, se valoran las características identificadas en las hojas de control.

Tabla 12.-Rúbrica de Transporte

Características	0	1	2	3	4
Características de etiquetado	No son consideradas las características de etiquetado	Los contenedores han sido etiquetados y marcados en un lugar visible. Para el caso de materiales peligrosos: en el etiquetado está descrita toda la información relevante del material. Los recipientes de capacidad superior a 450 litros han sido rotulados en ambos lados. Todo el procedimiento de etiquetado se ha hecho de acuerdo a las normas internacionales vigentes.	Los contenedores han sido etiquetados y marcados en un lugar visible. Los recipientes solo están rotulados en un lado y la información no es clara. El etiquetado carece de la información relevante para conocer el contenido y característica del material. El procedimiento de etiquetado no es efectuado de acuerdo a normas oficiales.	Los contenedores han sido etiquetados y marcados en un lugar visible. No hay información sobre cantidad y características. No se utiliza normativa de ningún tipo para el etiquetado.	Los contenedores no están etiquetados e identificados.
Información de Seguridad	No son consideradas las características de seguridad	El transporte cuenta con toda la documentación relacionada al manejo del producto: Hojas de seguridad, requisitos relativos a la carga, estiba, transporte, manipulación y descarga. Existe todo el equipo de seguridad necesario para el manejo del material en el vehículo, además de que el transportista está al tanto de cómo responder a una emergencia en caso de accidentes.	El transporte cuenta con documentación parcial sobre el manejo del producto: Aunque se tiene la hoja de seguridad del producto, no se cuenta con información relacionada al manejo (carga, estiba, transporte, manipulación, descarga). El vehículo tiene todo el equipo de seguridad, además El transportista conoce los procedimientos de respuesta a emergencia.	El transporte solo cuenta con la hoja de seguridad del producto o grupo de productos. El vehículo solo cuenta con el equipo de seguridad necesario, parcialmente (No está completo). El transportista no ha recibido entrenamiento formal en el manejo de respuesta a emergencia.	El transporte no cuenta con ningún tipo de documentación, ni hoja de seguridad. El transportista no tiene la menor idea de cómo responder a una respuesta ante emergencia, NO ha recibido entrenamiento de ningún tipo.
Condiciones de carga de materiales empacados	No se cuenta con materiales empacados	Los materiales han sido revisados para descubrir daños y SOLO han sido cargados los que tienen el empaque cerrado. Las mercancías son distribuidas de modo uniforme para equilibrar el centro de gravedad, son fijadas para evitar su movimiento durante el transporte, los paquetes están protegidos contra daños ambientales o accidentes (Transportes Cerrados). Los recipientes son aprobados por la normatividad oficial vigente para contener el producto.	Los materiales han sido revisados para descubrir daños, algunos no están envasados en su recipiente original o se encuentran a medio uso. Las mercancías son distribuidas de modo uniforme para equilibrar el centro de gravedad, son fijados para evitar su movimiento durante el transporte, El transporte no cuenta con protección contra las condiciones climáticas o accidentes (Transporte Abierto). Los recipientes son aprobados por la normatividad oficial vigente para contener el producto.	Los materiales son parcialmente revisados, hay paquetes o contenedores abiertos. Las mercancías son distribuidas según el espacio en el camión, sin tomar en cuenta las restricciones de peso, los materiales son fijados parcialmente. Es decir solo los paquetes más grandes, o los que están a los bordes. Los recipientes pueden estar o no aprobados por la legislación vigente para contener el material.	Los materiales no son revisados en cuanto a sus condiciones, se carga tomando como restricción el espacio únicamente.

Características		0	1	2	3	4
Separación de materiales empacados	No se cuenta con materiales empacados		Los materiales son separados por clase, es consultada su compatibilidad y en base a eso se ha distribuido la carga. Los espacios entre mercancías han sido llenados con carga compatible y se tiene un espaciamiento suficiente para prevenir el mezclado en caso de derrame.	Los materiales son separados por clase, es consultada su compatibilidad y en base a eso se ha distribuido la carga. No se rellenan los espacios entre mercancías con carga compatible, el espaciamiento es limitado.	Los materiales no son separados por clase, se intenta separar las mercancías incompatibles pero con grandes restricciones de espacio. El espaciamiento es limitado para prevenir el mezclado en caso de derrame. Los espaciamientos no son llenados con carga compatible.	Los materiales no son revisados en función a su compatibilidad, se carga tomando como restricción el espacio únicamente.
Condiciones de carga de materiales a granel	No se cuenta con materiales a granel		Los auto tanques han sido debidamente revisados en cuanto a limpieza y en cuanto a daños por corrosión y fuerza puntual. Cuentan con recubrimiento especial para el transporte de líquidos corrosivos, y cuentan con dispositivos de seguridad para liberar presión que funcionan adecuadamente. Las válvulas están debidamente señalizadas y se encuentran en óptimas condiciones de operación.	Los auto tanques han sido debidamente revisados en cuanto a limpieza, contra daños por corrosión y fuerza puntual. NO cuentan con recubrimiento especial para el transporte de líquidos. Cuentan con dispositivos de seguridad para liberar presión que funcionan adecuadamente, pero las válvulas NO están debidamente señalizadas aunque se encuentran en óptimas condiciones de operación.	Los auto tanques NO han sido revisados en cuanto a condiciones de limpieza, NO reciben mantenimiento. Los dispositivos de seguridad para liberar presión que funcionan adecuadamente. Las válvulas están parcialmente o NO señalizadas y se encuentran en condiciones relativamente aceptables de operación.	Los auto tanques tienen algún tipo de fuga. NO tienen recubrimientos, se desconoce o NO cuentan con dispositivos de seguridad para liberar presión que funcionan adecuadamente. Las válvulas NO están señalizadas y puede haber fugas a través de alguna de ellas.
Procedimientos de llenado en auto tanques	No son consideradas las características.		Existe una persona entrenada en los procedimientos de carga y descarga de material. Se tienen procedimientos y las condiciones para evitar cualquier tipo de contaminación del material, se deja un espacio libre y se usan alarmas de nivel para evitar el derrame. El material es recirculado para mantener el control y condiciones del producto.	Existe una persona entrenada en los procedimientos de carga y descarga de material. La información y condiciones durante el llenado son insuficientes para eliminar la probabilidad de contaminación del material, NO se cuenta con alarmas de nivel. El material no es recirculado para mantener el control y condiciones del producto.	Los procedimientos de llenado los efectúa el chofer mismo, no se certifica que el contenedor sea seguro para el llenado con materiales, NO se cuenta con procedimientos estandarizados para evitar la contaminación, el transporte NO cuenta con alarmas de nivel para evitar el derrame, NO existe recirculación del material.	El llenado es efectuado en un lugar y condiciones improvisadas. Las operaciones son realizadas por el chofer o por personal que trabaja en la planta pero que no están instruidos formalmente en la operación.
Operaciones de transferencia de carga	No son consideradas las características.		Las zonas de carga y descarga son de fácil acceso a los vehículos. Existe una persona capacitada, en la supervisión de carga y descarga de los materiales. Se tiene un contacto directo con los empleados cuando se hagan operaciones poco comunes. Se cuenta con material para limpieza en caso de derrame de producto.	Las zonas de carga y descarga son de ACCESO RESTRINGIDO a los vehículos. Existe una persona capacitada, en la supervisión de carga y descarga de los materiales. Se tiene POCO contacto directo con los empleados cuando se hagan operaciones poco comunes. Se cuenta con material para limpieza en caso de derrame de producto.	Las zonas de carga y descarga son de DIFÍCIL acceso a los vehículos. NO hay supervisión en los procesos de carga y descarga de los materiales. NO se tiene un contacto con los empleados cuando se hagan operaciones poco comunes. Se cuenta con material para limpieza en caso de derrame de producto.	Las zonas de carga y descarga son de DIFÍCIL acceso a los vehículos. NO hay supervisión en los procesos de carga y descarga de los materiales. NO se tiene un contacto con los empleados cuando se hagan operaciones poco comunes. NO hay material para limpieza en caso de derrame de producto.

Características		0	1	2	3	4
Procedimientos de Inspección	No son consideradas las características.	Se ha verifica que el transporte esté debidamente asegurado al pavimento con calzas previo a las operaciones de carga-descarga, Se inspeccionan válvulas, conexiones, alivios y tubería antes de la carga, se revisa la compatibilidad de los materiales con los equipos involucrados en las operaciones de transferencia, se verifica que los sistemas eléctricos estén sin corriente, se hace inspección visual a la carga, los paquetes son protegidos para evitar ruptura con las cuñas del montacargas por daño accidental o manipulación.	Se ha verifica que el transporte esté debidamente asegurado al pavimento con calzas previo a las operaciones de carga-descarga. Hay inspección VISUAL en válvulas, conexiones, alivios y tubería antes de la carga, HAY revisión a la compatibilidad de los materiales con los equipos involucrados en las operaciones de transferencia, NO se verifican sistemas eléctricos, los paquetes NO son protegidos para evitar ruptura con las cuñas del montacargas por daño accidental o manipulación.	NO TODOS LOS TRANSPORTES cuentan con calzas por lo que no son debidamente asegurados, NO hay inspección a válvulas, conexiones, alivios y tubería antes de la carga, NO se revisa la compatibilidad de los materiales con los equipos involucrados en las operaciones de transferencia, se verifica que los sistemas eléctricos estén sin corriente, se hace inspección visual a la cara, los paquetes son protegidos para evitar ruptura con las cuñas del montacargas por daño accidental o manipulación.	No son realizados procedimientos de inspección de ningún tipo, ni los vehículos son asegurados.	
Condiciones de equipos auxiliares	No se evalúan las condiciones.	Los equipos y procedimientos mostrados en la lista de revisión aplican al 100% de los casos. Se cuenta con toda la disponibilidad de equipo adecuado, conexiones, bombas, etc.	No se cuenta con equipo de transferencia propio, hay que solicitar préstamos de equipo a otros sectores del proceso de producción con los consecuentes retrasos en las operaciones y poco control en las condiciones del equipo.	El equipo requerido para hacer la transferencia es deficiente en su funcionamiento. En al menos dos de los puntos mencionados en la hoja de control.	No hay ningún tipo de equipo de transferencia, los movimientos se hacen de forma improvisada con materiales disponibles en la locación.	
Condiciones generales del transporte	No se evalúan las condiciones.	Se hace una inspección previa y posterior al vehículo por turno, el transporte cuenta con manual de operación, sistemas de seguridad funcionando adecuadamente, equipo contra volcaduras, dispositivos de alivio, sensores de temperatura y presión	Se hace una inspección previa y posterior al vehículo por turno, el transporte cuenta con manual de operación, sistemas de seguridad son limitados para ser revisados durante el viaje, NO cuenta con equipo contra volcaduras, HAY dispositivos de alivio, pero NO HAY sensores de temperatura.	Se hace una inspección previa y posterior al vehículo por turno, NO hay dispositivos de seguridad, NO cuenta con equipo contra volcaduras, NO HAY dispositivos de alivio.	No existen políticas de revisión en los transportes, previas al recorrido.	
Condiciones de Mantenimiento	No se evalúan las condiciones	Se cuenta con un programa de mantenimiento del transporte el cual es aplicado en toda la flota en al menos 3 meses. Se hace el "listado de revisión pre-operativa" previo a cada viaje y se utiliza el vehículo solo cuando hay un cumplimiento en el 100% de los puntos.	Se cuenta con un programa de mantenimiento del transporte, el cual es aplicado en toda la flota en al menos cada 6 meses. El "listado de revisión pre-operativa", es realizado al menos una vez a la semana.	Se cuenta con un programa de mantenimiento preventivo, pero no es CUMPLIDO, los vehículos SOLO son puestos fuera de circulación al requerir reparaciones mayores. NO se efectúa un "listado de revisión pre-operativa"	No se tiene un plan de mantenimiento implementado para los equipos, los transportes operan en condiciones deplorables. NO se efectúa un "listado de revisión pre-operativa"	

Tabla 13.-Rúbrica de Ruta

Características	0	1	2	3	4
Condiciones de pavimento	Las condiciones del pavimento son óptimas y NO contribuyen al riesgo	Se cuenta con pavimento de concreto, inclinación para evitar escurrimientos, canaletas laterales para contención, pavimento antiderrapante y SIN irregularidades en el camino.	Pavimento flexible (carpeta asfáltica), el terreno está acondicionado para transporte de vehículos pesados, SIN inclinación para escurrimientos, con canaletas de contención y SIN zonas irregulares en el camino.	Pavimento de tipo empedrado o pavimentado CON baches, SIN inclinación para escurrimientos, SIN canaletas laterales de contención, CON zonas irregulares	El camino NO está pavimentado, se trata de una vía de terracería. La vía NO está acondicionada para el paso de vehículos pesados, existen zonas de irregularidades a lo largo de todo el trayecto.
Amplitud de vía	La amplitud de vía es tal que las condiciones NO contribuyen al riesgo	El trazado de la vía es para la circulación de vehículos pesados exclusivamente, el camino no circula a través de zonas de angostamiento, El vehículo que circula a través de la vía cumple con las disposiciones de normatividad vigente, la amplitud del camino permite realizar SIN alto número de maniobras todas las operaciones, el camino cuanta con acortamiento debidamente señalado.	El trazado de la vía es para la circulación de vehículos pesados, el camino circula a través de zonas de angostamiento, El vehículo que circula a través de la vía cumple con las disposiciones de normatividad vigente, la amplitud del camino permite realizar CON un maniobras todas las operaciones, el camino cuanta CON acortamiento debidamente señalado.	El trazado de la vía NO está diseñado para la circulación de vehículos pesados, el camino circula a través de zonas de angostamiento, NO cuenta con ACOTAMIENTO. La amplitud del camino permite realizar CON maniobras todas las operaciones, NO cumple con la normatividad vigente.	La vía es sumamente angosta, el trazado NO está hecho para la circulación de vehículos, en el caso de manobras el tránsito es interrumpido.
Características de vía	Las características de vía NO contribuyen al riesgo	Hay continuidad en la ruta, NO hay caminos alternos o desviaciones, trayecto completamente lineal, SIN peralte en curvas, SIN trabajos de reparación, SIN elevación, SIN las características de la vía permiten el fácil acceso para actividades de limpieza o mitigación en caso de accidente.	Hay continuidad en la ruta, trayecto principalmente recto, CON etapas sinuosas con peralte, SIN grandes pendientes, SIN trabajos de reparación, el acceso para actividades de limpieza o mitigación es de fácil acceso.	No hay continuidad en la ruta es necesario tomar desviaciones, trayecto sinuoso, CON pendientes, CON trayectos en reparación, difícil acceso a actividades de limpieza o mitigación.	Trayecto MUY sinuoso, pendiente pronunciada, trayecto MUY accidentado, CON problemas de circulación por trabajos de reparación continuos a lo largo de la vía.
Elementos externos de la ruta	No existen elementos externos a considerar por lo que la característica NO contribuye al riesgo	Los vías de tránsito evitan zonas de alta densidad poblacional; tales como comedores o edificios administrativos, procesos productivos de alta peligrosidad, zonas protegidas o sensibles y cuerpos de agua. NO existe un riesgo de daño a externos durante el tránsito.	Las vías de tránsito evitan zonas de alta densidad poblacional, no obstante HAY un elemento de riesgo adicional dado el flujo de personal a través de las vías que inicia o termina labores. Las vías circulan cercanas a elementos de procesos productivos, NO obstante no se trata de procesos peligrosos en cuanto al involucramiento de altas cantidades de energía o de otros materiales peligrosos. Cuerpos de agua cercanos, sin zonas ambientalmente sensibles.	Las vías de tránsito circulan a través de proceso productivos CON liberación de energía, cercanos a puntos de alta densidad poblacional, y puede haber ALGUNAS zonas ambientalmente sensibles en el trayecto y cuerpos de agua.	Las vías de tránsito son consideradas altamente peligrosas tanto por los elementos de riesgo adicional, como por las zonas de impacto. Es decir toda la ruta cuenta con todos los elementos listados en la hoja de control.

Características		0	1	2	3	4
Características de zonas de carga y descarga	Las características correspondientes no son consideradas para el cálculo del riesgo.		Zonas debidamente delimitadas y señalizadas de fácil acceso a transportes de carga, con diques de contención. Buena visibilidad a cualquier hora del día y en cualquier condición ambiental. Se cuenta con todos los equipos para mitigación de incendios y limpieza de derrames, además de que las zonas están alejadas de proceso de liberación de calor o líneas eléctricas.	Las zonas de carga y descarga NO cuentan con diques de contención. Las zonas están PARCIALMENTE delimitadas o señalizadas, sin embargo SON de fácil acceso al transporte de carga. La visibilidad es buena. Puede haber posibles fuentes de ignición, pero han sido debidamente identificadas para evitar incidentes.	NO hay diques de contención. Las zonas están PARCIALMENTE delimitadas o señalizadas, el acceso del transporte REQUIERE de algunas maniobras y de la obstrucción parcial del tráfico. NO cuentan con equipos mínimos para mitigación de incendios y limpieza de derrames, se desconocen posibles fuentes de ignición.	Las zonas de carga y descarga son improvisadas, por lo que NO existen los elementos de seguridad mínimos. Las zonas NO están señalizadas, SON de difícil acceso al transporte.
Características de las intersecciones	Las características correspondientes no son consideradas para el cálculo del riesgo.		Intersecciones de bajo riesgo, SIN restricciones de visibilidad y CON bajo nivel de tráfico. Cruce de vías de ferrocarril a nivel del suelo pavimentado, señalamiento, semáforo de prevención, pluma automática. Las prácticas de tránsito en las instalaciones son de alto total en cada intersección.	Intersecciones de riesgo medio, con ciertas restricciones de visibilidad pero con bajo nivel de tráfico. Cruce de vías de ferrocarril a nivel del suelo pavimentado, señalamiento, SIN semáforo de prevención, SIN pluma automática. Las prácticas de tránsito son laxas, se hace un alto parcial.	Intersecciones de riesgo medio a alto, algunos impedimentos en visibilidad, CON nivel de tráfico moderado. HAY Cruce de vías de ferrocarril a nivel del suelo pavimentado, señalamiento, obstaculización de vista, SIN pluma, SIN señalamiento. Las prácticas de tránsito son laxas en las instalaciones.	Intersecciones poco visibles, con alto nivel de tráfico. Cruce de ferrocarril CON vías expuestas sobre terracería. SIN señalamientos, SIN semáforos, SIN pluma. NO hay alto por parte de los vehículos en las intersecciones. Las intersecciones cruzan vías de tránsito de peatones y tráfico NO industrial.
Condiciones de Tráfico	No son consideradas las características correspondientes		Se tiene un control de los tiempos de traslado y descarga de materiales, de manera que los transportes no deban exceder su velocidad en la entrega y sean descargados en tiempo. La frecuencia de transporte es baja, el tránsito del vehículo es través de una vía dedicada a vehículos pesados, hay poco movimiento de peatones. Se tiene un conocimiento sobre los horarios de mayor tráfico y los materiales de alta peligrosidad no son enviados en estos periodos, se tiene un historial sobre los accidente en la planta y en base a ellos se toman las decisiones de tránsito en la ruta. Se cuenta con un plan de respuesta ante emergencia y es conocido por todo el personal en caso de un incidente.	Se tiene un conocimiento de los tiempos de traslado, pero se realizan envíos a lo largo de todo el turno. La frecuencia de transporte es ALTA y la descarga de materiales CON cierta frecuencia los vehículos entorpece el tráfico en el sitio industrial. El tránsito del vehículo es través de una vía dedicada a vehículos pesados, los materiales son enviados en las horas de menor tráfico vehicular. Se tiene un conocimiento sobre los horarios de mayor tráfico y los materiales de alta peligrosidad no son enviados en estos periodos, se tiene un historial sobre los accidente en la planta y en base a ellos se toman las decisiones de tránsito en la ruta. Se cuenta con un plan de respuesta ante emergencia.	El paso del vehículo es través de altas zonas de tráfico vehicular y personal, no se tiene control sobre los envíos que se dan a lo largo de todo el turno, no existe un plan de respuesta ante emergencia en caso de incidente durante el transporte.	Las decisiones de envío no son hechas considerando el tráfico de las vías de comunicación, no se tiene idea del historial de accidentes, no hay políticas de respuesta ante emergencia y las condiciones de tránsito de equipos pesados no son respetadas.

Características		0	1	2	3	4
Visibilidad y Señalización	No son consideradas las características correspondientes		La iluminación es eficiente y clara a lo largo de toda la vía, está de acuerdo a los niveles estipulados por la normatividad vigente. Existe una adecuada señalización a lo largo de toda la ruta y se cuenta con puntos de mantenimiento y áreas de descanso debidamente señalados.	La iluminación es parcial a lo largo de toda la vía, algunas zonas no son claras. Existe una adecuada señalización en la mayor parte de la ruta y se cuenta con puntos de mantenimiento y áreas de descanso debidamente señalados.	La iluminación es deficiente a lo largo de toda la vía, NO está de acuerdo a los niveles estipulados por la normatividad vigente. Existe señalización a lo largo de toda la ruta, NO se cuenta con puntos de mantenimiento y áreas de descanso debidamente señalados.	La iluminación y señalización a lo largo de toda la ruta son particularmente deficientes. La ruta no está acondicionada bajo condiciones de restricción visual resultantes de condiciones ambientales adversas.
Políticas de Ruta	No son consideradas las características correspondientes		La ruta seleccionada contempla el menor riesgo para el transporte de materiales peligrosos, la gerencia conoce los riesgos asociados con el transporte de los materiales a través de las posibles rutas, hay un programa de seguridad en marcha para los conductores de vehículos, existe un programa de administración del riesgo en las operaciones de manejo de materiales peligrosos, existe una guía de respuesta ante emergencias.	La ruta seleccionada NO contempla condiciones de riesgo para el transporte de materiales peligrosos, la gerencia TIENE un compromiso con la seguridad pero DESCONOCE los riesgos asociados con el transporte de los materiales a través de las posibles rutas, hay un programa de seguridad en marcha para los conductores de vehículos, existe un programa de administración del riesgo en las operaciones de manejo de materiales peligrosos, existe una guía de respuesta ante emergencias.	La ruta seleccionada NO contempla condiciones de riesgo para el transporte de materiales peligrosos, la gerencia NO ha implementado un programa de seguridad en las instalaciones, existe un programa de administración del riesgo y una guía de respuesta ante emergencias pero no está difundido entre los empleados o no es aplicado en las instalaciones de trabajo.	No existe ningún tipo de política en la selección de rutas, no hay programas de seguridad, no hay compromiso de parte de la gerencia

3.3.3 Cálculo de contribuciones a la probabilidad

- **Identificación de los rubros a evaluar**

En base a los conceptos anteriormente descritos. Definamos la combinación de instancias por rubro que serán evaluadas.

P1: *Traslado de 1 Material del Almacén General al nodo Planta 1, utilizando la Ruta 1, el Camión 1 y la cuadrilla de Personal del turno 1.*

P2: *Traslado de 1 Material del Almacén General al nodo Planta 1, utilizando la Ruta 2, el Camión 2.*

- **Responder “Hoja de Control” según rubro correspondiente**

Utilizando la hoja de control respectiva a cada uno de los rubros: “Ruta”, “Transporte” y “Personal” identificados, contestar “SI”, “NO”, “NA” a cada uno de las preguntas contenidas en la “Hoja de Control” correspondiente e interpretar la información relevante de acuerdo a las “Rúbricas”, con el fin de evaluar las características identificadas. (Tabla 14 y Tabla 15)

Tabla 14.- Resumen de características de los procesos ejemplificados por Transporte
Transporte

Características	Vehículo 1	Vehículo 2
Características de etiquetado	Los contenedores han sido etiquetados y marcados en un lugar visible. Para el caso de materiales peligrosos, en el etiquetado está descrita toda la información relevante para conocer su contenido, cantidad y características. Todo el procedimiento de etiquetado se he hecho de acuerdo a las normas internacionales vigentes.	Los contenedores han sido etiquetados y marcados en un lugar visible. Para el caso de materiales peligrosos, en el etiquetado está descrita toda la información relevante para conocer su contenido, cantidad y características. Todo el procedimiento de etiquetado se he hecho de acuerdo a las normas internacionales vigentes.
Información de Seguridad	El transporte cuenta con documentación parcial sobre el manejo del producto: Aunque se tiene la hoja del producto, no se cuenta con información relacionada al manejo del producto. El transportista conoce los procedimientos de respuesta a emergencia.	El transporte solo cuenta con la hoja de seguridad del producto o grupo de productos. El transportista no ha recibido entrenamiento formal en el manejo de respuesta a emergencia.
Condiciones de carga de materiales empacados	Los materiales han sido revisados para descubrir daños, algunos de ellos no están envasados en su recipiente original o se encuentran a medio uso. Las mercancías son distribuidas de modo uniforme para equilibrar el centro de gravedad, son fijados para evitar su movimiento durante el transporte, el transporte no cuenta con protección contra las condiciones climáticas (Transporte Abierto). Los recipientes son aprobados por la normatividad oficial vigente para contener el producto.	Los materiales han sido revisados para descubrir daños, algunos de ellos no están envasados en su recipiente original o se encuentran a medio uso. Las mercancías son distribuidas de modo uniforme para equilibrar el centro de gravedad, son fijados para evitar su movimiento durante el transporte, el transporte no cuenta con protección contra las condiciones climáticas (Transporte Abierto). Los recipientes son aprobados por la normatividad oficial vigente para contener el producto.
Separación de materiales empacados	Los materiales son separados por clase, es consultada su compatibilidad y en base a eso se ha distribuido la carga. No se rellenan los espacios entre mercancías con carga compatible, el espaciamiento es limitado.	Los materiales no son revisados en función a su compatibilidad, se carga tomando como restricción el espacio únicamente.
Condiciones de carga de materiales a granel	No se cuenta con materiales a granel	No se cuenta con materiales a granel
Procedimientos de llenado en auto tanques	No son consideradas las características, dado que no se transportan materiales a granel.	No son consideradas las características, dado que no se transportan materiales a granel.

Características	Vehículo 1	Vehículo 2
Operaciones de transferencia de carga	Existe una persona encargada, en la supervisión de carga y descarga de los materiales. Pero no tiene una capacitación formal en el manejo de materiales. Se cuenta con los equipos auxiliares requeridos para las operaciones de carga y descarga. Pero son compartidos con otros procesos, por lo que no siempre son usados. Se cuenta con material de limpieza para facilitar las operaciones de limpieza en caso de Derrame.	No hay una persona encargada, en la supervisión de carga y descarga de los materiales. El transportista realiza las operaciones sin apoyo. NO se cuenta con equipos auxiliares para las operaciones de carga y descarga. NO se cuenta con material para las operaciones de limpieza en caso de Derrame.
Procedimientos de Inspección	Se ha verificado que el transporte esté debidamente asegurado al pavimento con calzas previo a las operaciones de carga-descarga. Se inspeccionan válvulas, conexiones, alívios y tubería antes de la carga, se revisa la compatibilidad de los materiales con los equipos involucrados en las operaciones de transferencia, se verifica que los sistemas eléctricos estén sin corriente, se hace inspección visual a la cara, los paquetes so protegidos para evitar ruptura con las cuñas del montacargas por daño accidental o manipulación.	No son realizados procedimientos de inspección de ningún tipo.
Condiciones de equipos auxiliares	No se cuenta con equipo de transferencia, hay que solicitar préstamos de equipo a otros sectores del proceso de producción.	No hay ningún tipo de equipo de transferencia de material.
Condiciones generales del transporte	Se hace una inspección previa y posterior al vehículo por turno, el transporte cuenta con manual de operación, los sistemas de seguridad son limitados para ser revisados durante el viaje, NO cuenta con equipo contra volcaduras, HAY dispositivos de alivio, pero no HAY sensores de temperatura	No se hace ningún tipo de inspección al transporte
Condiciones de Mantenimiento	Se cuenta con un programa de mantenimiento del transporte, el cual es aplicado en toda la flota en al menos cada 6 meses. El "listado de revisión pre-operativa", es realizado al menos una vez a la semana.	Se cuenta con un programa de mantenimiento del transporte, el cual es aplicado en toda la flota en al menos cada 6 meses. El "listado de revisión pre-operativa", es realizado al menos una vez a la semana.

Tabla 15.- Resumen de características de los procesos ejemplificados por Ruta
Ruta

Características	Ruta 1	Ruta 2
Condiciones de Pavimento	Pavimento flexible (carpeta asfáltica), terreno acondicionado para transporte de vehículos pesados, SIN inclinación para escurrimientos, con canaletas de contención y SIN zonas irregulares en el camino.	Pavimento de tipo empedrado o pavimentado CON baches, SIN inclinación para escurrimientos, SIN canaletas laterales de contención, CON zonas irregulares
Amplitud de Vía	El trazado de la vía es para la circulación de vehículos pesados, el camino circula a través de zonas de angostamiento, el vehículo que circula a través de la vía cumple con las disposiciones de normatividad vigente, la amplitud del camino permite realizar CON algunas maniobras todas las operaciones, el camino cuenta CON acortamiento debidamente señalado.	El trazado de la vía NO está diseñado para la circulación de vehículos pesados, el camino tiene zonas de angostamiento, la amplitud del camino permite realizar CON maniobras todas las operaciones, el camino NO cuenta con acotamiento debidamente señalado.
Características de Vía	Hay continuidad en la ruta, trayecto principalmente recto, etapas sinuosas con peralte, SIN grandes pendientes, SIN trabajos de reparación, el acceso para actividades de limpieza o mitigación es de fácil acceso.	No hay continuidad en la ruta es necesario tomar desviaciones, trayecto sinuoso, CON pendientes, CON trayectos en reparación, difícil acceso a actividades de limpieza o mitigación.
Elementos externos de la ruta	Las vías de tránsito evitan zonas de alta densidad poblacional, Las vías son cercanas a elementos de procesos productivos sin altas cantidades de energía o de otros materiales peligrosos. Pueden existir algunos cuerpos de agua cercanos, pero NO hay zonas ambientalmente sensibles.	Las vías de tránsito circulan son a través de proceso productivos CON liberación de energía, cercanos a puntos de alta densidad poblacional, y puede haber zonas ambientalmente sensibles en el trayecto y cuerpos de agua.
Características de zonas de carga y descarga	Las zonas de carga y descarga NO cuentan con diques de contención. Las zonas están PARCIALMENTE delimitadas o señalizadas, sin embargo SON de fácil acceso al transporte de carga. La visibilidad es buena. Puede haber posibles fuentes de ignición, pero han sido debidamente identificadas para evitar incidentes.	Las zonas de carga y descarga NO cuentan con diques de contención. Las zonas están PARCIALMENTE delimitadas o señalizadas, sin embargo SON de fácil acceso al transporte de carga. La visibilidad es buena. Puede haber posibles fuentes de ignición, pero han sido debidamente identificadas para evitar incidentes.

Características	Ruta 1	Ruta 2
Características de intersecciones	Intersecciones de riesgo medio, con ciertas restricciones de visibilidad pero con bajo nivel de tráfico. Cruce de vías de ferrocarril a nivel del suelo pavimentado, señalamiento, SIN semáforo de prevención, SIN pluma automática. Las prácticas de tránsito son laxas, se hace un alto parcial en las intersecciones.	Intersecciones de riesgo medio, con restricciones de visibilidad pero con bajo nivel de tráfico. Cruce de vías de ferrocarril a nivel del suelo pavimentado, señalamiento, SIN semáforo de prevención, SIN pluma automática. Las prácticas de tránsito en la vía son laxas, se hace un alto parcial en intersecciones.
Condiciones de Tráfico	Se tiene un conocimiento de los tiempos de traslado, pero se realizan envíos a lo largo de todo el turno. La frecuencia de transporte es ALTA y la descarga de materiales CON cierta frecuencia los vehículos entorpece el tráfico en el sitio industrial. El tránsito del vehículo es través de una vía dedicada a vehículos pesados, los materiales son enviados en las horas de menor tráfico vehicular. Se tiene un conocimiento sobre los horarios de mayor tráfico y los materiales de alta peligrosidad no son enviados en estos periodos, se tiene un historial sobre los accidente en la planta y en base a ellos se toman las decisiones de tránsito en la ruta. Se cuenta con un plan de respuesta ante emergencia.	Se tiene un conocimiento de los tiempos de traslado, pero se realizan envíos a lo largo de todo el turno. La frecuencia de transporte es ALTA y la descarga de materiales CON cierta frecuencia los vehículos entorpece el tráfico en el sitio industrial. El tránsito del vehículo es través de una vía dedicada a vehículos pesados, los materiales son enviados en las horas de menor tráfico vehicular. Se tiene un conocimiento sobre los horarios de mayor tráfico y los materiales de alta peligrosidad no son enviados en estos periodos, se tiene un historial sobre los accidente en la planta y en base a ellos se toman las decisiones de tránsito en la ruta. Se cuenta con un plan de respuesta ante emergencia.
Visibilidad y Señalización	La iluminación es parcial a lo largo de toda la vía, algunas zonas no son claras. Existe una adecuada señalización en la mayor parte de la ruta y se cuenta con puntos de mantenimiento y áreas de descanso debidamente identificadas.	La iluminación es parcial a lo largo de toda la vía, algunas zonas no son claras. Existe una adecuada señalización en la mayor parte de la ruta y se cuenta con puntos de mantenimiento y áreas de descanso debidamente identificadas.
Políticas de Ruta	La ruta seleccionada NO contempla condiciones de riesgo para el transporte de materiales peligrosos, la gerencia TIENE un compromiso con la seguridad pero DESCONOCE los riesgos asociados con el transporte de los materiales a través de las posibles rutas, hay un programa de seguridad en marcha para los conductores de vehículos, existe un programa de administración del riesgo en las operaciones de manejo de materiales peligrosos, existe una guía de respuesta ante emergencias.	La ruta seleccionada NO contempla condiciones de riesgo para el transporte de materiales peligrosos, la gerencia TIENE un compromiso con la seguridad pero DESCONOCE los riesgos asociados con el transporte de los materiales a través de las posibles rutas, hay un programa de seguridad en marcha para los conductores de vehículos, existe un programa de administración del riesgo en las operaciones de manejo de materiales peligrosos, existe una guía de respuesta ante emergencias.

- **Asignar contribuciones de acuerdo a las características**

De acuerdo a las características previamente identificadas en las Hojas de Control de la Ruta y el Transporte, asignar las contribuciones correspondientes a cada una de las características por rubro. Para el caso del ejemplo, se muestran en la **Tabla 16** las características relevantes para los rubros Transporte y Ruta

Tabla 16.- Contribución de las características de Ruta y Transporte

Rubro	Características	Vehículo 1	Vehículo 2
Transporte	Características de etiquetado	1	1
	Información de Seguridad	2	3
	Condiciones de carga de materiales empacados	2	2
	Separación de materiales empacados	2	4
	Condiciones de carga de materiales a granel	0	0
	Procedimientos de llenado en auto tanques	0	0
	Operaciones de transferencia de carga	2	4
	Procedimientos de Inspección	1	4
	Condiciones de equipos auxiliares	2	4
	Condiciones generales del transporte	2	4
	Condiciones de Mantenimiento	2	2
Ct	Contribución Total por Transporte	16	28

Rubro	Características	Ruta 1	Ruta 2
Ruta	Condiciones de Pavimento	2	3
	Amplitud de Vía	2	3
	Características de Vía	2	3
	Elementos externos de la ruta	2	3
	Características de zonas de carga y descarga	2	3
	Características de intersecciones	2	2
	Condiciones de Tráfico	2	2
	Visibilidad y Señalización	2	2
	Políticas de Ruta	2	2
Cr	Contribución Total por Ruta	18	23

- **Calcular contribución a la probabilidad**

De acuerdo a la ecuación (7), la contribución de los rubros representado por CP:

$$CP = (\sum Ct + \sum Cr) \quad (7)$$

Donde

- CP* Representa la Contribución Total a la Probabilidad de un Incidente en el Transporte.
Ct Contribuciones de las características del Transporte
Cr Contribuciones de las características de la Ruta

Para el cálculo del ejemplo:

$$CP_1 = 34$$

$$CP_2 = 51$$

3.4 Caracterización del impacto en incidentes de transporte

Como ha sido expuesto, los incidentes resultantes están en función a las características y cantidades de los materiales que se transporten. Para determinar el impacto de cada material, se propone la metodología propuesta por la *Agencia Internacional para la Energía Atómica (IAEA, 1996)*.

Los principales puntos sobre los que parte su metodología son:

- El incidente que representa cada categoría de material es el máximo posible, es decir ocurre como resultante de un evento durante el transporte y no como resultante de otro evento.
- Las consecuencias están categorizadas por tipo de material, masa y condiciones de empaque.
- Se consideran tres tipos de efecto, en función al área en el que se produce el impacto: “circular” (explosiones), “medio círculo” (nube de gas), “extendida” (dispersión).
- Las categorías de materiales considerados son: inflamables, explosivos y tóxicos.
- La metodología solo es aplicable en forma comparativa, y preeliminar.

Es importante mencionar que el radio de impacto al ser función directa del material transportado, contempla la ocurrencia de todos los eventos previamente identificados: **Derrame/Emisión, Nube de Gas, Alberca de Fuego, Fuego a Chorro, Explosión**. Para su determinación, se han hecho las siguientes consideraciones:

- La intensidad de la fuente es la máxima posible. Es decir, no es considerada la probabilidad de que una sustancia inflamable pudiera no encenderse, o una sustancia tóxica no dispersarse.
- Para los cálculos de dispersión de gases tóxicos, se ha tomado una estabilidad atmosférica clase D con una velocidad del viento de 5 m/s.
- El criterio que se utiliza para el incidente de incendio o explosión, considera el área de alcance para una radiación de 5-10 Kw/m² durante 30 minutos y que causaría la muerte del 100% de las personas que estén en esa zona.
- Para el posible incidente de nubes de gas explosivas, se considera una presión de 0.3 bar para la zona de alto riesgo.

En la **Tabla 17**, se enumeran las características de las categorías en que se dividen las sustancias contempladas por la metodología del IAEA. Esta lista solo muestra las categorías relacionadas a las actividades de transporte y en el **Anexo I**, se incluyen un listado de las sustancias más importantes por categoría.

Debido a que el modelo da como resultado el área de impacto (H_a), al identificar esta técnica se decidió asociarla con un índice adimensional denominado **Cm**. A mayor área de impacto, una contribución mayor, como se muestra en la **Tabla 18**.

Lo anterior tiene validez debido a las siguientes consideraciones:

- La ecuación (5) define que la consecuencia es función de tres valores: el área de impacto, la densidad de población, un factor de corrección.
- Debido a que se busca que el modelo sea comparativo entre distintos materiales trasladados en los mismos trayectos dentro de una instalación industrial, es factible considerar la densidad de población como constante y despreciar los efectos de un factor de corrección. Por lo que el impacto es función directa del área de impacto y esta a su vez de un índice (**Cm**).

Tabla 17.- Clasificación de Sustancias por Categorías de Efecto (IAEA, 1996)

No. Referencia	Característica	Descripción	Envasado	
3	Líquido Inflamable	Presión de Vapor < 0.3 bar. a 20 C	Empaquetado o a granel	
6		Presión de Vapor > 0.3 bar. a 20 C	Empaquetado o a granel	
7	Gas Inflamable	Licuado por presión	Empaquetado o a granel	
11		Licuado por Congelamiento	Empaquetado o a granel	
13		Bajo Presión	Cilindros (25-100 Kg.)	
14	Explosivos	Fase Líquida	A granel	
15		Fase Líquida	Empaquetado	
17	Líquidos Tóxicos	Toxicidad baja	Empaquetado o a granel	
19		Toxicidad media	Empaquetado o a granel	
23		Toxicidad alta	Empaquetado o a granel	
27		Toxicidad muy alta	Empaquetado o a granel	
30	Gas Tóxico	Licuado por presión: Baja Toxicidad	Empaquetado o a granel	
31		Toxicidad media	Empaquetado o a granel	
32		Toxicidad Alta	Empaquetado o a granel	
33		Toxicidad muy alta	Empaquetado o a granel	
34		Toxicidad Extrema	Empaquetado o a granel	
35		Licuado por Congelamiento: Baja Toxicidad	Empaquetado o a granel	
36		Toxicidad Media	Empaquetado o a granel	
37		Alta Toxicidad	Empaquetado o a granel	
38		Toxicidad Muy Alta	Empaquetado o a granel	
39		Toxicidad Extrema	Empaquetado o a granel	
40		En Tuberías: Toxicidad Media	Empaquetado o a granel	
41		Alta Toxicidad	Empaquetado o a granel	
42		Bajo presión > 25 bar: Alta Toxicidad	Empaquetado o a granel	
43		Productos de Combustión Tóxica		De pesticidas
44				De fertilizantes (con Nitrógeno)
45			De Acido Sulfúrico	

Tabla 18.-Contribución de Material (Cm) por categoría (IAEA, 1996)

No. Referencia	Cantidades (Ton)				
	0.2-1	1-5	5-10	10-50	50-200
3	0	0	0	10	40
6	0	0	0	20	50
7	0	10	40	150	600
11	0	0	0	20	50
13	0	0	20	50	150
14	10	40	40	150	150
15	5	5	20	150	150
17	0	0	0	1	5
19	0	5	20	50	50
23	20	50	50	400	400
27	50	50	400	1500	1500
30	5	20	20	20	50
31	20	50	50	50	400
32	50	50	400	400	1500
33	50	400	1500	15000	15000
34	400	1500	15000	50000	50000
35	0	0	0	5	5
36	0	5	20	50	50
37	20	50	50	400	400
38	50	400	1500	1500	15000
39	400	1500	15000	50000	50000
43	0	0	0	20	50
44	0	5	5	20	400
45	0	0	5	20	20

3.4.1 Ejemplo de cálculo del impacto resultante

Como continuación al ejemplo mostrado, se analiza la contribución al impacto por el transporte de los siguientes materiales:

Dos productos químicos peligrosos:

- 20 Ton Gas LP (En tanques de 50 Kg.)
- 20 Ton de Arsina licuada (En tanques de 25 Kg.)

Contribución de Materiales (*Cm*) o contribución al impacto (*CI*):

Productos Químicos:

Los cálculos deben hacerse de forma separada debido a que las características de ambos materiales son diferentes. De donde revisando las propiedades de las sustancias en la **Tabla 17** o en el **Anexo I**, se identifica que:

- Gas LP es un gas inflamable licuado a presión por lo que su referencia es: **7**
- La Arsina es un gas altamente tóxico y su correspondiente referencia es: **34**

Identificando ambos valores en la **Tabla 18** para la carga de 20 Ton, tenemos que:

- Gas LP tiene una contribución (*Cm o CI*): **150**
- La Arsina tiene una contribución (*Cm o CI*): **50000**

Resumiendo los resultados en la **Tabla 19**

Tabla 19.-Contribución al Impacto para los Materiales Analizados

Gas LP	Arsina
20 Ton	20 Ton
150	50000

3.5 Cálculo del Índice de Riesgo en el Transporte (IRT)

Definición

Retomando la definición presentada por las ecuaciones (2) y (5), se procederá a mostrar el cálculo del *IRT* en una red de transporte de materiales peligrosos.

La definición es presentada en términos de los valores calculados para la probabilidad (*CP*) e impacto (*CI*) en la ecuación (8).

$$IRT_s = CP_s * CI_m \quad (8)$$

Donde:

- IRT_s = Índice de Riesgo en el Transporte por segmento S
- CP_s = Contribución a la Probabilidad en el segmento S
- CI_m = Contribución al Impacto por el material M

Por lo que el *IRT* (Índice de Riesgo en el Transporte) de un proceso completo será de acuerdo a la ecuación (9).

$$IRT_p = Min \sum_{s=1}^n IRT_s \quad (9)$$

Donde:

- IRT_s = Índice de Riesgo en el Transporte por segmento S
- IRT_p = Índice de Riesgo en el Transporte por segmento S

Ejemplo de Cálculo del IRT

Habiendo identificado el cálculo del riesgo a través de un arco, el presente punto tiene como objetivo calcular el riesgo para un proceso de transporte de materiales peligrosos, entre un origen y un destino. Un proceso puede ser visto como se muestra en la **Figura 8**.

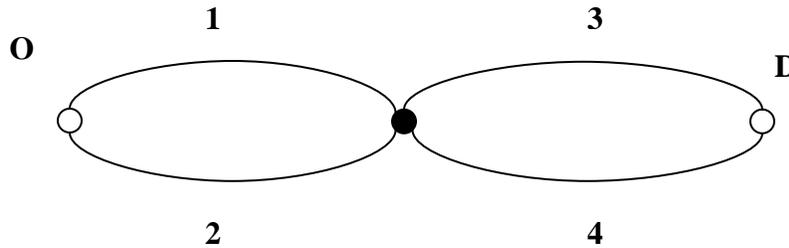


Figura 8.-Ejemplo de dependencia del arco en problemas de transporte de materiales peligrosos.

De forma análoga, la contribución a la probabilidad de los segmentos **3** y **4** son calculadas para transportar Gas LP, teniendo la **Tabla 20**:

Tabla 20.-Contribuciones a la Probabilidad e Impacto del ejemplo

Arco (S)			
CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄
34	51	28	60
Material (M)			
CI ₁			
150			

Debido a que el objetivo es calcular el segmento de ruta de menor riesgo, el cálculo del IRT por segmento es presentado en la **Tabla 21**.

Tabla 21.- Cálculo de IRT por segmentos de Ruta

IRT _s	
CP ₁ *CI ₁	2040
CP ₂ *CI ₁	3060
CP ₃ *CI ₁	1680
CP ₄ *CI ₁	3600

Por lo que las posibles opciones para transportar el producto de O a D, se resumen en los cálculos siguientes para la combinación de segmentos (IRT_i):

$$\begin{aligned} IRT_{t1} &= CP_1 * CI_1 + CP_3 * CI_1 = 2040 + 1680 = 3720 \\ IRT_{t2} &= CP_1 * CI_1 + CP_4 * CI_1 = 2040 + 3600 = 5640 \\ IRT_{t3} &= CP_2 * CI_1 + CP_3 * CI_1 = 3060 + 1680 = 4740 \\ IRT_{t4} &= CP_2 * CI_1 + CP_4 * CI_1 = 3060 + 2600 = 5660 \end{aligned}$$

El valor mínimo de los posibles es el IRT_{t1} : (**Figura 9**)

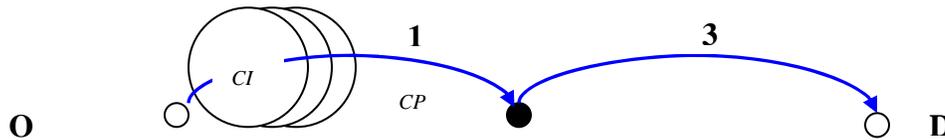


Figura 9.- Proceso Óptimo de Transporte mediante el cálculo del IRT

3.6 Integración del IRT en un modelo de planeación

Ya ha sido explicado el procedimiento y el fundamento del Índice de Riesgo en el Transporte (IRT), por lo que en la presente sección se explicará su integración y aplicación en un modelo de planeación de operaciones de logística.

En primer lugar el usuario deberá determinar el uso del modelo: Programación de materiales por turno, asignación por planta, etc.

En segundo punto, el usuario revisará que la información necesaria esté dentro de una base de datos. La información relevante para el cálculo se basa en las contribuciones que cada instancia tenga por característica.

Es importante mencionar que la información se actualizará periódicamente conforme varíen las condiciones del transporte, ruta, personal y materiales. El usuario no deberá llenar los listados de revisión, ni verificar las rúbricas cada vez que desee hacer una operación de logística a menos que exista un “cambio” en la valoración de las características identificadas. Así mismo, es de esperar que la lista de características por rubro crezca conforme se tenga un mejor entendimiento de los elementos de riesgo para el proceso evaluado.

Como último punto, el usuario actualizará los datos de demanda en cada uno de los nodos destino por periodo, con el fin de determinar el riesgo que todas las posibles combinaciones de procesos. En el siguiente capítulo se verá la integración de este modelo, dentro de un programa de optimización de transporte.

El procedimiento es explicado en la **Figura 10**, ejemplifica el modelo conceptual en el que es aplicable el IRT propuesto.

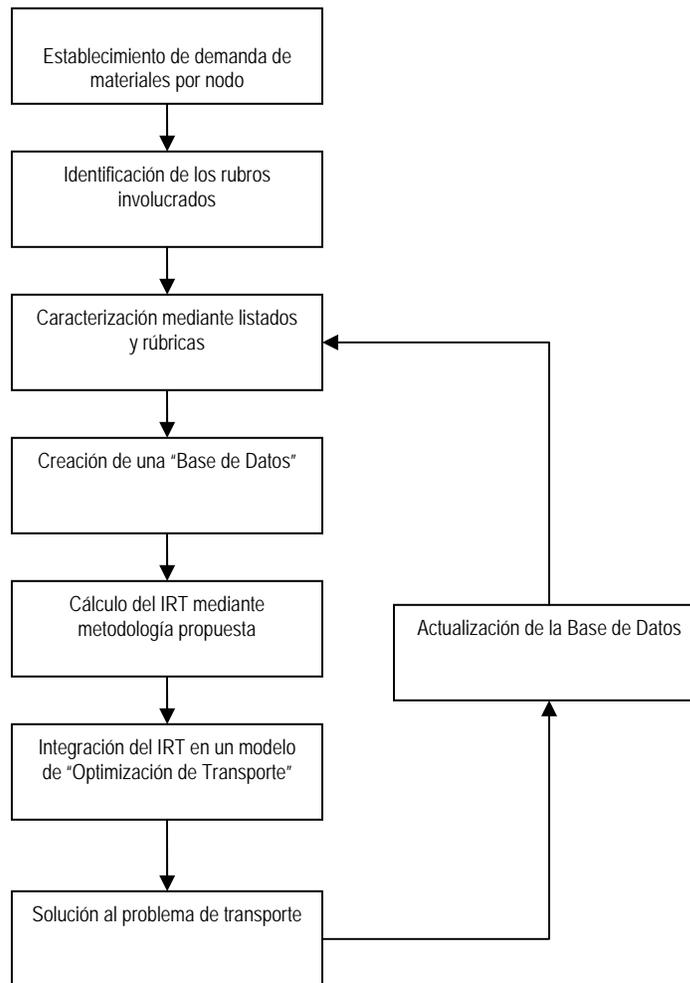


Figura 10.- Mapa Conceptual del Modelo de Riesgo en el Transporte

Capítulo 4 Evaluación del IRT en un modelo de transporte

4.1 Aplicación de programación matemática

La programación matemática se orienta a la problemática de administrar los recursos disponibles de una forma óptima. Es importante destacar que el concepto de “optimización” bajo esta perspectiva, representa el cumplimiento de una meta específica u objetivo que en la mayoría de los casos será la de “maximizar” o “minimizar” un valor de interés.

Ejemplos comunes de aplicación contemplan la “maximización de ganancias”, “minimización de costos” e inclusive “minimización de tiempos y movimientos”. En la solución de un problema de asignación de recursos, la programación matemática puede considerar un gran número de alternativas e identificar aquella que facilite al “tomador de decisiones” elegir la mejor para alcanzar su objetivo. (AICHE, 1994)

Debe recalcar que para poder resolver un problema mediante este método, el modelo debe contar con las siguientes características:

- Un número posible de alternativas
- Un objetivo definido
- Un grupo de restricciones que afecten la manera en que el tomador de decisiones elija las distintas alternativas.

Las características de un problema deberán ser descritas usando expresiones matemáticas, por lo que las restricciones y funciones objetivo deberán ser fácilmente traducidas a ecuaciones.

En el problema de distribución de materiales peligrosos que se ha propuesto resolver, se plantean dos funciones objetivo: La reducción de costos en el problema de asignación y por el otro la minimización del nivel de riesgo asociado al proceso. Las dos funciones coexisten bajo un conjunto de restricciones, la solución e interpretación de resultados es mostrada en el presente capítulo y tiene como fin la aplicación y solución a cualquier problema semejante en la industria.

4.1.1- Formulaciones de programación matemática

Todos los métodos de programación matemática, siguen la misma secuencia y requieren de datos de entrada. Lo que diferencia una técnica de otra radica en la formulación y la disponibilidad de algoritmos de solución y codificación computacional. A continuación se enumerarán las formulaciones de programación matemática más comunes y sus respectivas características y aplicaciones:

Programación Lineal

Este es el modelo de programación más utilizado, en la literatura existen cientos de ejemplos reportados donde el uso de modelos de programación lineal ha ahorrado millones de dólares a las compañías. La característica principal de un modelo de programación lineal es que ambas características del problema: la función objetivo “ f ” y las funciones de restricción “ g ” en el modelo sean *funciones lineales* de las variables de decisión.

Programación Entera

Muchas situaciones involucran decisiones, restricciones o costos que resultan de alternativas discretas. Por ejemplo, si una compañía desea saber si una planta será construida en una ciudad o en otra; este ejemplo viola el requerimiento de *divisibilidad* para la programación lineal ordinaria, ya que al no existir la posibilidad de construir entre un “entre un lugar y otro” la planta debe ser localizada en la ciudad “X” o en la ciudad “Y”. Por lo que las alternativas discretas deben ser consideradas una rama de la programación matemática.

Cuando todas las variables son representadas con variables enteras, la técnica es conocida como “**Programación Entera Pura**”, si alguna o algunas de las variables de decisión son permitidas para cantidades continuas, entonces se define como un modelo de “**Programación Entera Mixta**”. Las variables de decisión solo pueden tomar valores binarios (0,1).

Este tipo de problemas presentan la problemática de tener mayor complejidad de solución que los modelos de programación lineal simple, ya que aunque las restricciones de tipo entero resultan en un menor número de posibles soluciones, dan como resultado un mayor número de variables en el modelo, dificultando el procedimiento de solución.

Programación Multiobjetivo

La programación multiobjetivo contempla que al mismo tiempo se puede tener más de un objetivo, posiblemente compitiendo entre si para satisfacer el criterio de optimalidad. Esta técnica, por su naturaleza puede ser considerada más como una variante de la programación lineal.

Bajo el esquema planteado, el modelo de transporte de materiales peligrosos será de tipo Entero Mixto (MILP por sus siglas en inglés); debido a la naturaleza de restricciones lógicas para modelar las variables identificadas, y ya que es requerido un enfoque con dos funciones objetivo, será de tipo multiobjetivo. Analizando las opciones bajo perspectivas de costo y riesgo.

4.1.2- Aplicación de programación matemática en análisis de riesgo

La aplicación de programación matemática al campo del análisis de riesgo en transporte no es nueva, se cuenta con un gran número de publicaciones que utilizan la herramienta, valiéndose de información estadística existente sobre incidentes en el proceso de transporte. Algunos de los ejemplos más relevantes, son los siguientes:

- **Caso 1.- “Modelación del riesgo de transporte de materiales peligrosos”** (*Erkut y Verter, 1997*)

En el estudio, los autores reportan un análisis a una red de carreteras en los Estados Unidos; utilizando diferentes modelos de riesgo para encontrar vías óptimas de transporte para un cargamento de materiales peligrosos entre un origen y un destino. El caso plantea el uso de programación matemática para la optimización de dos objetivos: Minimizar la probabilidad de incidentes y la exposición de la población por donde se traslada el vehículo analizado. El análisis muestra que la búsqueda de la ruta más corta, puede no ser una buena elección para el transporte de materiales peligrosos, utilizando el software PC*HazRoute. Los accidentes y probabilidad de emisión son determinadas por tipo de camino y el radio de impacto puede ser seleccionado por punto de origen-destino.

- **Caso 2. “Modelación de la equidad de riesgo en la transportación de materiales peligrosos”** (*Gopalan, Kolluri, Batta & Karwan, 1989*)

Los autores desarrollan y analizan un modelo para generar un grupo equitativo de rutas para el traslado de materiales peligrosos. El objetivo es determinar el grupo de rutas que minimizara el riesgo total de viaje y la diseminación de equidad de riesgo entre las zonas de la región geográfica un la cuales la red de transporte sea implementada, cuando una gran cantidad de viajes sean necesarios de un origen a un destino. Una formulación de programación entera es propuesta, proponiendo una heurística que repetidamente resuelve problemas de viajes sencillos mediante aproximación Lagrangiana Dual.

Las principales diferencias entre los modelos de riesgo presentados en la literatura, y el que es propuesto en este capítulo, radica en la aplicación del índice de riesgo (IRT) y el enfoque económico a un problema en sitio. Los datos estadísticos de probabilidad de ruta no son utilizados de forma convencional como se vio en el capítulo anterior, por el contrario se genera la información de entrada.

4.1.3 Formulación del problema de transporte en el manejo de materiales peligrosos

Los problemas de logística han sido investigados a conciencia, desde la formulación del primer modelo de programación lineal. Por lo que se han revisado los problemas típicos en el campo de investigación de operaciones.

Tapia (1995), ha propuesto un modelo para la solución del transporte de materiales como una extensión y/o combinación de tres problemas clásicos:

- 1) *El problema de transporte simple* (“Transport Problem”).
- 2) *El problema de la mochila para varios productos* (“Knapsack Problem”).
- 3) *El problema del vendedor viajero* (“Travelling Salesman’s Problem”).

Definiendo una flota de vehículos cualesquiera, la cual puede estar compuesta de un número de vehículos tales como: auto tanques, planas, camiones, vagones de tren o aeroplanos. Los vehículos pueden ser clasificados en diferentes tipos de acuerdo a sus atributos:

- Capacidades de carga
- Costos de operación
- Riesgo asociado al transporte
- Compatibilidad de materiales

La flota de vehículos deberá diseñarse para cubrir ciertas “rutas” en una red de nodos representando diferentes clientes con demandas específicas para diferentes productos. La ruta del transporte a definir será una vía compuesta de arcos o segmentos entre nodos adyacentes donde cada vehículo parte de un nodo específico (Nodo Inicial) y puede terminar en un nodo diferente o en el de donde partió (Nodo Terminal).

1) Modelo de transporte simple

Un ejemplo crítico de la aplicación de programación lineal es el llamado problema de transporte el cuál es descrito a continuación. Si se tienen m locaciones de origen y n destinos. Las cantidades a_1, \dots, a_m de un cierto tipo de producto serán transportadas de cada locación y recibidas en cantidades b_1, \dots, b_n en cada una de los nodos destino.

Donde:

c_{ij} = Costo de transporte por producto de un Origen i (ciudad) a un destino j .

Por lo que:

x_{ij} = Representa la cantidad para ser transportada de cada par origen-destino, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$.

La cual deberá satisfacer los requerimientos de transporte y minimizar el costo total. (

Figura 11)

x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	a_1
x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	a_2
.
.
x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mn}	a_m
b_1	b_2	...	b_n	

Figura 11.-Matriz de Transporte

Función Objetivo (10)

$$\text{Minimizar el costo total } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (10)$$

Restricciones: Oferta (11), Demanda (12), Cantidad Transportada (13)

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \begin{matrix} i=1, \dots, m; \\ j=1, \dots, n \end{matrix} \quad (13)$$

Aplicación al problema de transporte de materiales peligrosos

Dado que la demanda para cada producto deberá ser cubierta por cada nodo o cliente en la red, el problema de determinación de distribución de los productos puede ser visto como una extensión de problema de transporte simple..

2) Problema de la mochila para varios productos.

El problema de la mochila (*Knapsack problem*) es de tipo combinatorio y deriva su nombre de la elección de posibles cosas que caben dentro de una bolsa (*de peso máximo*) y que pueda ser llevada en un viaje. Dado un grupo de artículos cada uno con un respectivo costo, deberá determinarse el número de items a ser incluido en una colección tal que el costo total se minimice y el número total de productos cargados sea tan grande como sea posible.

La forma en la que las variables de decisión, son interpretadas como: “Puede un valor de al menos V ser alcanzado sin exceder el costo C ?”.

Dada una n clase de items, $x_1 \dots x_n$. Cada item x_j tiene un valor p_j y el peso w_j . El peso máximo que puede ser cargado en la bolsa es C .

El problema 0-1 restringe el número de variables de cada item a cero o uno. Donde matemáticamente puede ser expresado con las siguientes ecuaciones:

Función Objetivo: (14)

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^n p_j x_j \quad (14)$$

Restricciones: Peso máximo (15)

$$\sum_{j=1}^n w_j x_j \leq c \quad \text{donde } x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, j=1, \dots, n. \quad (15)$$

Aplicación al problema de transporte de materiales peligrosos

Dado que un problema inherente en la distribución de productos múltiples es la determinación de la carga para cada vehículo por segmento de ruta. Un vehículo representa un número de recursos limitados por lo que no deben ser excedidos. Cada recurso tal como la capacidad del vehículo (en términos de peso máximo y capacidades volumétricas) deben ser utilizadas óptimamente para asegurar que la mejor combinación de unidades de cada tipo de productos sean cargadas en un vehículo y transportadas a través de un segmento de ruta.

El problema para determinar la estrategia de carga óptima para productos múltiples por vehículos a través de su ruta puede ser visto como una extensión del problema de la mochila (*Knapsack Problem*).

3) Problema del Vendedor Viajero (TSP)

Dado un número de ciudades y costos de viaje entre dos puntos. El problema plantea el cálculo del menor costo, para una ruta en un viaje con retorno que visita cada ciudad exactamente una vez y regresa a la ciudad de partida. Este caso es de considerable importancia práctica, aparte de la evidente aplicación a los problemas de transporte y logística.

La solución, sin aplicar modelación matemática consiste en probar las permutaciones posibles desde un punto de vista de costo y determinar la más económica. Pero dado que el número de permutaciones es equivalente a $n!$ (el factorial del número de ciudades, $n!$), esta solución puede resultar impráctica.

Formalmente el problema, puede ser representado por un gráfico $G = (V, E)$ donde V representa los nodos, o dicho de otro modo las ciudades, y E es el grupo de rutas que conectan a los nodos V . Cada ruta tiene un valor asignado d_{ij} , la cual es la distancia de la ruta $(i, j) \in A$, lo que significa que las distancias entre las ciudades “ i ” y “ j ” respectivamente, con $i, j \in N$.

El problema del vendedor viajero (TSP) desde una perspectiva matemática consiste en encontrar la mínima distancia de un ciclo Hamiltoniano de la gráfica. Para problemas simétricos, la distancia entre las ciudades es independiente de las direcciones atravesadas entre los arcos, esto es $d_{ij} = d_{ji}$, para cada par de nodos. El grupo de arcos $T \subseteq A$ es una solución para el TSP de su ciclo simple de longitud $|V|$ en G .

Matemáticamente esto puede ser representado bajo las siguientes ecuaciones:

La Función Objetivo: (16)

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=j+1}^n d_{ij} x_{ij} , \quad (16)$$

$$\text{donde } x_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ si el TSP incluye (i,j) o no}$$

Restricciones: (14), (15)

$$\sum_{k=1}^{i-1} x_{ki} + \sum_{k=i+1}^n x_{ik} = 2, \quad \forall i \in V \quad (17)$$

$$\sum_{i,j \in Z} x_{ij} < |Z|, \quad 0 \subset Z \subset V \quad (18)$$

En la **Figura 12** se muestra un esquema del problema del TSP y su solución:

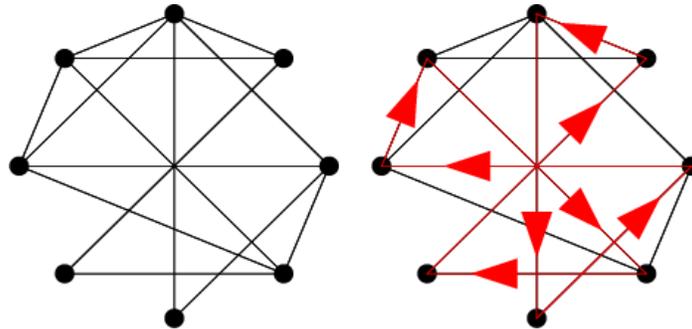


Figura 12.- Formulación y Solución al Problema Típico del Vendedor Viajero (TSP)

Aplicación al problema de transporte de materiales peligrosos

La aplicación del “Problema del Vendedor Viajero”, permite encontrar la secuencia de rutas desde las perspectivas de costo y riesgo.

Según las definiciones del problema de ruteo propuesto, la formulación del modelo resulta de la combinación de los tres problemas anteriormente expuestos (“Transporte”, “Mochila” y “Vendedor Viajero”), con el objetivo de encontrar la asignación de transporte, ruta y carga óptimas para cumplir con dos funciones objetivo: Minimización de Costo y minimización de riesgo, tal que las demandas en los nodos destino sean cumplidas. A continuación se plantea el modelo a codificarse.

4.2 Planteamiento del modelo de transporte

Para el modelo en particular, se han identificado dos tipos de restricciones:

Las restricciones relacionadas con capacidad y requerimiento de operación y las restricciones asociadas con la normatividad vigente para el manejo de materiales peligrosos.

- **Restricciones de operación**

En el primer caso, se establecen relaciones que dependen exclusivamente de parámetros del modelo a analizar tales como:

- La demanda y oferta de productos.
- Nodos de envío o proveedores.
- Capacidad del transporte.
- Requerimiento de entregas por orden de prioridad.
- Rutas de entrega.

- **Restricciones de norma**

En el capítulo anterior se revisaron de forma específica, todas las características que para los rubros de ruta y transporte incrementan el riesgo de un incidente. Sin embargo, no todas las características mencionadas, han sido contabilizadas. Existen, algunos elementos que por su naturaleza simplemente no pueden ser permitidos dentro un sistema de transporte. Ya se ha hecho mención de los estándares correspondientes dentro de la normatividad vigente a nuestro, sin embargo vale la pena mencionar que el modelo propuesto vincula restricciones en base a esta normativa.

Dentro de las características identificadas que constituyen restricciones específicas del modelo, tenemos las siguientes:

1. Disposiciones de Compatibilidad y Segregación de Materiales (NOM-010-SCT2/2003).
2. Peso y Dimensiones Máximas con lo que pueden circular los vehículos de autotransporte (NOM-012-SCT2/2003).
3. Requisitos que deben cumplir las unidades de transporte terrestre y ferroviario para el transporte de residuos y materiales peligrosos (REGLAMENTO PARA EL TRANSPORTE TERRESTRE DE MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS)

A continuación serán descritos los términos utilizados en la formulación del modelo.

4.2.1 Subíndices del modelo de transporte

Los subíndices representan los elementos de un proceso sobre los cuales se evalúa el modelo de transporte, donde cada uno de los elementos consta de un conjunto de posibles instancias a ser consideradas.

En el caso particular del ejemplo resuelto, cada uno de los materiales es representado por el subíndice m , los vehículos utilizados por t , los puntos de distribución o “nodos” son representados por n (con una particular distinción de la función del nodo, pues un nodo puede ser proveedor s o consumidor c), en tanto que el subíndice p representa los periodos de tiempo en los cuales es evaluado el modelo (**Tabla 22**)

Tabla 22.- Subíndices del Modelo de Transporte Propuesto

Subíndice	Concepto	Instancias
m	Materiales	(Mat1, Mat2,...M)
t	Vehículos de Transporte	(T1, T2, T3,...T)
n	Puntos de Distribución	(Refinery, Depot 1, Depot 2, Depot 3, Depot 4,...N)
$s(n)$	Proveedores	(Refinery,... S)
$c(n)$	Consumidores	(Depot 1, Depot 2, Depot 3, Depot 4,...C)
p	Periodos	(p1,...P)
l	Nivel de Carga	(L1, L2, L3, L4, L5)

4.2.2 Parámetros del modelo de transporte

Al modelo deben alimentarse parámetros de operación constantes bajo los cuales, se restringirá la solución particular resultante.

- **Parámetros de Operación**

El usuario deberá introducir la información concerniente a los materiales a ser transportados m . La demanda para cada uno de los nodos consumidores c , deberá ser establecida mediante el parámetro $Demand_{m,c,p}$, en cada uno de los periodos p a considerar.

En tanto que la densidad ($Density_m$) de cada uno de los materiales es requerida para establecer una equivalencia con la capacidad de peso del transporte y el volumen límite por cada tipo de transporte.

El programa requiere que la distancia entre nodos se introduzca como una matriz ($Dist_{n,n}$), si no existiera la posibilidad de viaje entre dos nodos, la distancia deberá ser representada con un 0. (**Tabla 23**)

Tabla 23.- Parámetros de Operación

Nomenclatura	Concepto	Unidades
$Density_m$	Densidad del material m para líquidos y sólidos	(Ton/m ³)
$Demand_{m,c,p}$	Demanda del material m en el nodo c en el periodo p	(Ton)
$Dist_{n,n'}$	Distancia del nodo n al nodo n'	(km)

- **Parámetros de Costo**

Los parámetros de costo, están en función a dos factores: Costo variable en función a la cantidad de material m cargada por transporte t ($LCS_{m,t}$) y el costo fijo por kilómetro (FCS_t). (Tabla 24)

Tabla 24.- Parámetros de Costo

Nomenclatura	Concepto	Unidades
FCS_t	Costo fijo de flete por distancia recorrida por el transporte t	(\$/km)
$LCS_{m,t}$	Costo de carga del material m en el transporte t	(\$/ Ton.Km)

- **Parámetros de Riesgo**

Los parámetros de riesgo según el modelo son: Los límites de carga de material de los que depende la contribución de material (C_m) del IRT y las contribuciones a la probabilidad (C_p), según ha sido explicado en el capítulo anterior para cada uno de los transportes y rutas seleccionadas. (Tabla 25)

Tabla 25.- Parámetros de Riesgo

Nomenclatura	Concepto	Unidades
$Liminf_l$	Limite inferior del nivel de carga l	(Ton)
$Limsup_l$	Limite superior del nivel de carga l	(Ton)
$Cp_{l,n,n',p}$	Contribución a la probabilidad de un incidente en un transporte t de n al nodo n' en el periodo p .	(Adimensional)
$Multip_{m,t,l}$	Contribución al impacto por el transporte del material m en el transporte t con el nivel de carga l	(Adimensional)

- **Parámetros de Restricción**

Los parámetros de restricción son aquellos que limitan los rangos de operación en el transporte. Es decir, pueden definirse como los valores máximos de: Capacidad de transporte en peso (Ton_t), volumen (Vol_t), tipo de transporte ($TAM_{m,t}$), compatibilidad de materiales ($CoM_{m,m'}$) y restricción de peso máximo a través de alguna ruta ($Maxw_{n,n'}$). (Tabla 26)

Tabla 26.- Parámetros Restrictivos

Nomenclatura	Concepto	Unidades
Ton_t	Capacidad en peso del transporte t	(Ton)
Vol_t	Capacidad volumétrica del transporte t	(m ³)
$Maxw_{n,n'}$	Restricción de peso máximo a ser transportado entre n y n'	(Ton)
$TAM_{m,t}$	Matriz de asignación de transporte, material m en t	(Binario 1,0)
$CoM_{m,m'}$	Matriz de compatibilidad de materiales entre m y m'	(Binario 1,0)

4.2.3 Variables del modelo de transporte

Las variables son clasificadas en función al valor numérico que puedan tomar durante la modelación, por lo que son presentadas en dos grupos: Binarias y Continuas.

- **Variables de Carga-Descarga (Variables Continuas):**

Para el modelo de transporte, han sido planteadas las siguientes variables continuas:

- La cantidad de materiales cargada por el transporte cuando parte del nodo fuente (proveedor) a cada uno de los nodos destino (consumidores), representadas por el parámetro $Load_{m,t,n,n',p}$.
- La cantidad descargada en cada uno de los nodos destino (consumidores), representado por la variable $Unload_{m,t,c,p}$.
- La contribución al impacto calculada en función a la carga de material por el modelo con la variable $CIM_{m,t,n,n',p}$
- Dado que la contribución de material ($CIM_{m,t,n,n',p}$) es la de mayor rango que se transporte según el material, se introduce otra variable que asigna el mayor valor $CI_{t,n,n',p}$. (**Tabla 27**)

Tabla 27.- Variables de Carga-Descarga

Nomenclatura	Concepto	Unidades
$Load_{m,t,n,n',p}$	Cantidad de Material m a ser trasladada por t del nodo n al nodo n' en el per p	(Ton)
$Unload_{m,t,c,p}$	Cantidad de Material m a ser descargadas por t para el consumidor c en p	(Ton)
$CIM_{m,t,n,n',p}$	Contribución al impacto por el material m en t de n a n' en el periodo p	(Adimensional)
$CI_{t,n,n',p}$	Contribución al impacto dada por el valor máximo de $CIM_{m,t,n,n',p}$	(Adimensional)

- **Variables Lógicas (Variables Binarias):**

Para considerar los aspectos y condiciones del sistema de transporte es necesario utilizar variables lógicas, las cuales cuentan con la característica de solo tomar valores binarios (0,1). (**Tabla 28**) El modelo de transporte contempla dos variables lógicas que representan lo siguiente:

- El factor de uso de un transporte a través de una ruta, representado con la variable $y_{t,n,n',p}$ donde la variable tomará el valor de **1** si un transporte utiliza la ruta de n a n' en el periodo p o **0** de lo contrario.
- El factor de uso de un transporte para trasladar cada uno de los productos representado con la variable $z_{m,t,p}$ donde la variable tomará el valor de **1** si un transporte t lleva el material m en el periodo p o **0** de lo contrario.

- El factor de carga de un transporte para cada uno de los materiales m con el nivel de carga l en t de n a n' en el periodo p . La variable $w_{m,t,n,n',l,p}$ tomará el valor de **1** en caso de existir o **0** de lo contrario.

Las variables binarias son relacionadas con las variables continuas por medio de las ecuaciones de restricción, y repercuten directamente en los resultados de la función objetivo.

Tabla 28.-Variables de Decisión

Nomenclatura	Concepto	Unidades
$y_{t,n,n',p}$	Factor de uso o no de transporte t para la ruta n a n' en el periodo p .	(Binario 1,0)
$z_{m,t,p}$	Factor de transporte del material m en el transporte t en el periodo p .	(Binario 1,0)
$w_{m,t,n,n',l,p}$	Factor de carga en un transporte t por llevar el material m de n a n' con el nivel l en p .	(Binario 1,0)

4.2.4 Modelo de programación lineal entera

En el presente subtema es planteado el modelo de programación propuesto, con una descripción de las funciones objetivo y restricciones asociadas.

4.2.4.1 Funciones objetivo del modelo

Existen dos funciones objetivo que serán resueltas de forma independiente con el fin de obtener la solución desde dos perspectivas: El menor costo y el menor riesgo asociados a cada proceso. En función a las variables antes descritas, se explican las ecuaciones resultantes

- **Función de minimización de costo**

En la ecuación (19) se representan los dos componentes de costo. El primer término corresponde al costo variable dependiente de la carga $LCS_{m,t}$ que lleva cada uno de los transportes t y el segundo al costo fijo FCS_t , dependiente de la distancias cubiertas por los transportes que circulan a través de la ruta entre dos nodos n, n' . Es decir, el costo total de transporte es directamente proporcional a: La variable continua $Load_{m,t,n,n',p}$ (carga total de todos los materiales m a ser transportado por t , de n a n' en p) y la variable lógica $y_{t,n,n',p}$ de uso de un transporte a través de la ruta n, n' .

$$COST = \sum_{m,t,n,n',p} (Load_{m,t,n,n',p})(Dist_{n,n'})(LCS_{m,t}) + \sum_{t,n,n',p} (Dist_{n,n'})(y_{t,n,n',p})(FCS_t) \quad (19)$$

- **Función de minimización de riesgo**

En la ecuación (20) se incorpora el índice de riesgo “IRT”, en unidades adimensionales, como ha sido presentado en el capítulo anterior, depende del cálculo de la contribución a la probabilidad (C_p) y de la contribución al impacto (C_i).

$$IRT = \sum_{t,n,n',p} C_p * C_i \quad (20)$$

4.2.5 Restricciones del modelo

Demanda

La ecuación (21) plantea que la suma de la demanda de cada producto m , en los nodos de consumo c para cada periodo p , deberá ser cubierta por la sumatoria de la carga de todos los transportes, contenidos en la variable $Load_{m,t,c,p}$.

$$\sum_t Load_{m,t,c,p} \geq Demand_{m,c,p} \quad \forall m,c,p \quad (21)$$

Restricción única de destino

Como se mencionó en la definición de variables binarias $y_{t,n,n',p}$. Se plantean las ecuaciones (22a) y (22b), con el fin de plantear que para todos los nodos destino n un transporte t , ha salido del proveedor s o del consumidor c , esta variable podrá tomar el valor de 1 si el trayecto es usado ó 0 de lo contrario.

$$\sum_n y_{t,s,n,p} \leq 1 \quad \forall t,s,p \quad (22a)$$

$$\sum_n y_{t,c,n,p} \leq 1 \quad \forall t,c,p \quad (22b)$$

Entrada – Salida del transporte

Mediante la ecuación (23), se plantea la necesidad de salida de un transporte t que ha llegado a un nodo c , con el fin de visitar otro nodo n . Esto es a través de la definición de la variable binaria $y_{t,n,n',p}$.

$$\sum_n y_{t,n,c,p} = \sum_n y_{t,c,n,p} \quad \forall t,c,p \quad (23)$$

Balance de descarga de producto

Con el fin de determinar la descarga del producto m , para cada uno de los transportes t , en los nodos de consumo c , para todos los periodos p . La ecuación (24) efectúa un balance de materia con las variables $Load_{m,t,n,c,p}$ y $Unload_{m,t,c,p}$ recalculado la

carga que sale del nodo c al destino n para todos los materiales m , transportes t , nodos de consumo c y periodos p .

$$\sum_n Load_{m,t,n,c,p} - Unload_{m,t,c,p} = \sum_n Load_{m,t,c,n,p} \quad \forall m,t,c,p \quad (24)$$

Restricción de viaje a trayectos existentes

La ecuación (25), permite eliminar como opciones de transporte, todas aquellas donde no exista una ruta posible de viaje entre dos nodos n, n' . La restricción es útil en el caso de nodos iguales (el transporte no puede viajar del nodo n al mismo nodo n), o cuando la ruta entre dos nodos no sea posible. En otras palabras, al ser 0 la distancia, la variable binaria de transporte $y_{t,n,n',p}$ es 0 .

$$y_{t,n,n',p} \leq Dist_{n,n'} \quad (25)$$

Restricción de capacidad de transporte

Mediante las ecuaciones (26a) y (26b) se limita la capacidad del transporte un peso máximo Ton_t o volumen máximo Vol_t , según sea el estado físico en que se carguen los materiales m . Es decir, La suma de todos los materiales m a ser transportados a todos los nodos n debe ser menor o igual a la capacidad de carga en peso Ton ó volumen Vol por tipo de transporte t .

$$\sum_m \sum_n Load_{m,t,s,n,p} \leq Ton_t \quad \forall t,s,p \quad (26a)$$

$$\sum_m \sum_n \frac{Load_{m,t,s,n,p}}{Density_m} \leq Vol_t \quad \forall t,s,p \quad (26b)$$

Restricción de carga de transporte a vehículos en tránsito

La carga de material, representada por la variable continua $Load_{m,t,n,n',p}$ solo podrá ser asignada a vehículos en tránsito, dados por la variable binaria de decisión de transporte $y_{t,n,n',p}$. Las ecuaciones (27a) y (27b), representan este elemento de decisión.

$$Load_{m,t,n,n',p} \leq (y_{t,n,n',p})(Ton_t) \quad (27a)$$

$$\frac{Load_{m,t,n,n',p}}{Density_m} \leq (y_{t,n,n',p})(Vol_t) \quad (27b)$$

Restricción de carga de transporte por naturaleza del material

La carga de material es asociada con la variable lógica $z_{m,t,p}$ con el fin asegurar que solo los materiales compatibles con el transporte t , de acuerdo a la matriz binaria $TAM_{m,t}$ sean cargados. Esta variable es muy útil, cuando se tienen transportes que no

pueden llevar cualquier tipo de material, por su estado físico o embalaje y es representado mediante las ecuaciones (28a) y (28b).

$$Load_{m,t,n,n',p} \leq (z_{m,t,p})(Ton_t)(TAM_{m,t}) \quad (28a)$$

$$\frac{Load_{m,t,n,n',p}}{Density_m} \leq (z_{m,t,p})(Vol_t)(TAM_{m,t}) \quad (28b)$$

Restricción de carga debido a condiciones de ruta

La restricción de carga (29), limita a que se cumpla la condición de que través de la ruta n a n' , un transporte no circule con mayor carga que la estipulada por la matriz $Maxw_{n,n'}$.

$$\sum_m Load_{m,t,n,n',p} \leq (y_{t,n,n',p})(Maxw_{n,n'}) \quad \forall t, n, n', p \quad (29)$$

Restricción de retorno al almacén de abastecimiento con carga cero

La restricción planteada en la ecuación (30), plantea que un vehículo debe retornar al almacén de abastecimiento o proveedor s sin carga.

$$Load_{m,t,n,s,p} = 0 \quad (30)$$

Restricción de asignación de carga solo si el transporte está en tránsito

Como se ha expuesto, el modelo contempla el uso de dos variables binarias “y” y “z” que estar interrelacionadas en el modelo. Mediante la ecuación (31) se ha planteado la restricción para unirlos. La variable $z_{m,t,p}$ existe siempre y cuando el transporte t esté en ruta, representado por la variable $y_{t,n,n',p}$ para todos los periodos p analizados.

$$\sum_m z_{m,t,p} \leq |m| * \sum_n \sum_{n'} z_{t,n,n',p} \quad \forall p \quad (31)$$

Restricción de carga de materiales compatibles

Dado que el material m es transportado en t , la variable $z_{m,t,p}$ solo existe si la compatibilidad entre dos materiales es distinta de 0 . Esta restricción es representada mediante la matriz binaria $CoM_{m,m'}$. Incluida en la ecuación (32)

$$Z_{m,t,p} \leq 1 - Z_{m',t,p} + CoM_{m,m'} \quad (32)$$

Restricciones del modelo de riesgo

Las ecuaciones (33), (34) y (35) representan las restricciones de la variable binaria asignada al nivel de carga $w_{m,t,n,n',p}$ y la forma en la que es ligada a las variables binarias “y” “y” “z”.

$$\sum_l w_{m,t,n,n',p} \leq 1 \quad \forall m,t,n,n',p \quad (33)$$

$$\sum_l w_{m,t,n,n',p} \leq |l| * Z_{m,t,p} \quad \forall m,t,n,n',p \quad (34)$$

$$\sum_l w_{m,t,n,n',p} \leq |l| * Y_{t,n,n',p} \quad \forall m,t,n,n',p \quad (35)$$

Las ecuaciones (36a) y (36b) representan los límites inferior y superior de peso para asignar la contribución de material (Cm) por nivel de carga.

$$load_{m,t,n,n',p} \leq \limsup_{l1} * w_{m,t,n,n',l1,p} + \limsup_{l2} * w_{m,t,n,n',l2,p} + \limsup_{l3} * w_{m,t,n,n',l3,p} + \limsup_{l4} * w_{m,t,n,n',l4,p} + \limsup_{l5} * w_{m,t,n,n',l5,p} \quad (36a)$$

$$load_{m,t,n,n',p} \leq \liminf_{l1} * w_{m,t,n,n',l1,p} + \liminf_{l2} * w_{m,t,n,n',l2,p} + \liminf_{l3} * w_{m,t,n,n',l3,p} + \liminf_{l4} * w_{m,t,n,n',l4,p} + \liminf_{l5} * w_{m,t,n,n',l5,p} \quad (36b)$$

Las ecuación (37) asigna la contribución de material (Cm), según el valor de carga obtenido por el modelo para el material m , la ecuación (38) revisa entre las diferentes contribuciones de materiales asignados a un vehículo t , para asignar como contribución al impacto la mayor Cm.

$$Cm_{m,t,n,n',p} = \sum_l Multip_{m,t,l} * w_{m,t,n,n',l,p} \quad \forall m,t,n,n',p \quad (37)$$

$$Ci_{t,n,n',p} \geq Cm_{m,t,n,n',p} \quad (38)$$

4.3 Aplicación del modelo de transporte a un problema simple

4.3.1 Planteamiento del problema

Se desea conocer la asignación óptima para el cubrir la demanda de dos productos químicos, bajo los siguientes supuestos:

- La disponibilidad de materiales es ilimitada y solo se cuenta con un nodo proveedor, identificado como “REFINERY”. El problema plantea cubrir la demanda total en cada uno de los nodos consumidores “DEPOT” en un solo periodo de tiempo. Las restricciones de operación son presentadas en la **Tabla 29**.
- Se cuenta con una flotilla de tres transportes, con diferentes costos y capacidades, se prevé que cada uno de los transporte retorne al nodo de partida “REFINERY”, sin productos.
- De acuerdo a la normatividad vigente se han planteado las matrices de asignación planteadas en la **Tabla 30**.
- De acuerdo a la metodología de cálculo del IRT, se presentan los datos en la **Figura 13**.

Tabla 29.- Restricciones de Operación

	Materiales	DEPOT 1	DEPOT 2	DEPOT 3	DEPOT 4	TOTAL
Demanda (Ton)	Mat 1	100	100	50	100	350
	Mat 2	100	100	70	250	520

Distancias (Km)	REFINERY	DEPOT 1	DEPOT 2	DEPOT 3	DEPOT 4
REFINERY	0	5	11	10	8
DEPOT 1	5	0	6	8	8
DEPOT 2	11	6	0	4	7
DEPOT 3	10	8	4	0	6
DEPOT 4	8	8	7	6	0

Transporte	Capacidad (Ton)		
T1	600		
T2	800		
T3	1500		
Costo Carga (\$/Km-Ton)	T1	T2	T3
Mat 1	10	6	120
Mat 2	4	8	200
Costo Transporte (\$/Km)	T1	T2	T3
	10	6	150

Tabla 30.- Restricciones de acuerdo a norma
Matriz de Compatibilidad de Materiales

Materiales	Mat 1	Mat 2
Mat 1	✓	✓
Mat 2	✓	✓

Matriz de Restricción de Carga por Ruta

Carga (Ton)	REFINERY	DEPOT 1	DEPOT 2	DEPOT 3	DEPOT 4
REFINERY	0	5000	11000	10000	1000
DEPOT 1	1000	0	6000	8000	2000
DEPOT 2	1100	6000	0	4000	1000
DEPOT 3	1000	8000	4000	0	2000
DEPOT 4	1000	2000	1000	2000	0

Matriz de Compatibilidad por Transporte

Materiales	T1	T2	T3
Mat 1	✓	✓	✓
Mat 2	✓	x	✓

Tabla 31.- Contribuciones al IRT
Matriz de Contribución a la Probabilidad (CP)

Transporte 1	CP	Transporte 2	CP	Transporte 3	CP
T1.REFINERY.DEPOT1	56	T2.REFINERY.DEPOT1	46	T3.REFINERY.DEPOT1	16
T1.REFINERY.DEPOT2	53	T2.REFINERY.DEPOT2	53	T3.REFINERY.DEPOT2	23
T1.REFINERY.DEPOT3	68	T2.REFINERY.DEPOT3	38	T3.REFINERY.DEPOT3	38
T1.REFINERY.DEPOT4	78	T2.REFINERY.DEPOT4	28	T3.REFINERY.DEPOT4	48
T1.DEPOT1.REFINERY	50	T2.DEPOT1.REFINERY	30	T3.DEPOT1.REFINERY	10
T1.DEPOT1.DEPOT2	67	T2.DEPOT1.DEPOT2	57	T3.DEPOT1.DEPOT2	27
T1.DEPOT1.DEPOT3	70	T2.DEPOT1.DEPOT3	60	T3.DEPOT1.DEPOT3	30
T1.DEPOT1.DEPOT4	50	T2.DEPOT1.DEPOT4	40	T3.DEPOT1.DEPOT4	40
T1.DEPOT2.REFINERY	63	T2.DEPOT2.REFINERY	53	T3.DEPOT2.REFINERY	13
T1.DEPOT2.DEPOT1	77	T2.DEPOT2.DEPOT1	57	T3.DEPOT2.DEPOT1	27
T1.DEPOT2.DEPOT3	49	T2.DEPOT2.DEPOT3	49	T3.DEPOT2.DEPOT3	39
T1.DEPOT2.DEPOT4	56	T2.DEPOT2.DEPOT4	46	T3.DEPOT2.DEPOT4	46
T1.DEPOT3.REFINERY	67	T2.DEPOT3.REFINERY	57	T3.DEPOT3.REFINERY	17
T1.DEPOT3.DEPOT1	70	T2.DEPOT3.DEPOT1	60	T3.DEPOT3.DEPOT1	20
T1.DEPOT3.DEPOT2	49	T2.DEPOT3.DEPOT2	49	T3.DEPOT3.DEPOT2	39
T1.DEPOT3.DEPOT4	55	T2.DEPOT3.DEPOT4	55	T3.DEPOT3.DEPOT4	45
T1.DEPOT4.REFINERY	63	T2.DEPOT4.REFINERY	53	T3.DEPOT4.REFINERY	13
T1.DEPOT4.DEPOT1	77	T2.DEPOT4.DEPOT1	57	T3.DEPOT4.DEPOT1	27
T1.DEPOT4.DEPOT2	46	T2.DEPOT4.DEPOT2	46	T3.DEPOT4.DEPOT2	36
T1.DEPOT4.DEPOT3	55	T2.DEPOT4.DEPOT3	55	T3.DEPOT4.DEPOT3	45

Matriz de Contribución al Impacto por Material (CI)

Material	L1	L2	L3	L4	L5
Mat1	50	50	400	400	1500
Mat2	0	5	20	50	50

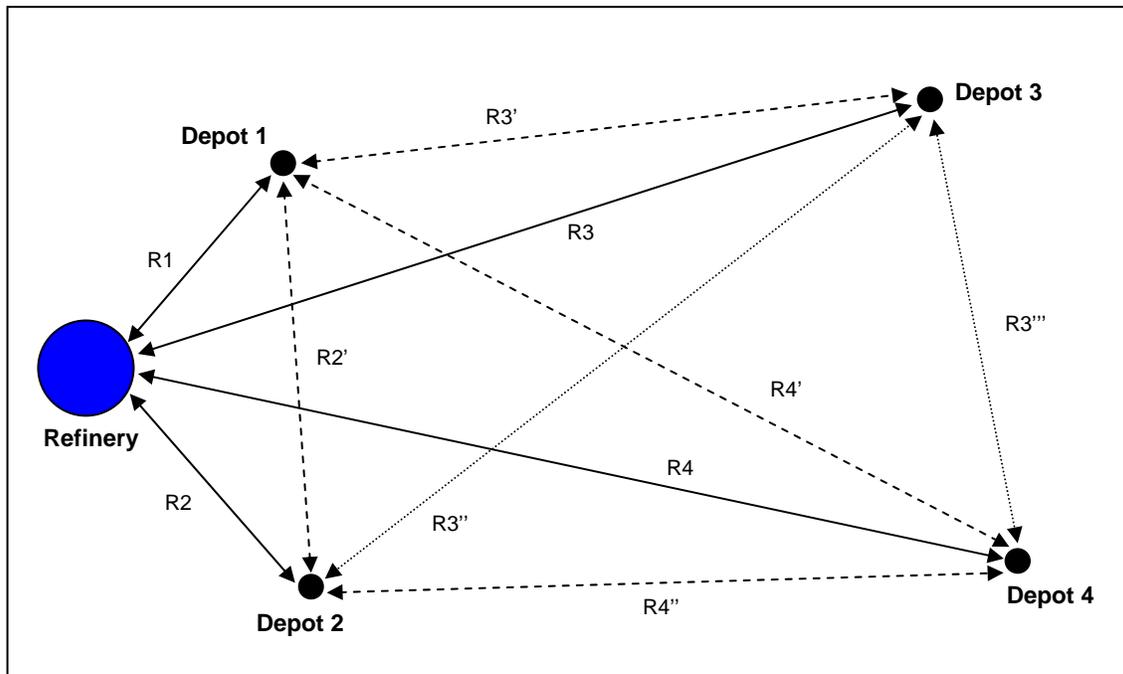


Figura 13.-Diagrama de rutas posibles

4.3.2 Solución al problema propuesto

Con el software CPLEX 9.0, mediante la interfase con GAMS v22.0, el problema ha sido como un modelo matemático de programación mixta entera (MILP). Y se ha resuelto bajo dos posibles funciones objetivo, obteniendo los siguientes resultados:

Minimización de costo

Para la función objetivo de minimización de costo con los datos anteriormente descritos, GAMS genera 1912 ecuaciones, 401 variables reales y 831 variables discretas.

- Secuencia de ruta

T1

Refinery → Depot 4 → Depot 3 → Depot 2 → Refinery

T2

Refinery → Depot 4 → Refinery

T3

Refinery → Depot 1 → Depot 2 → Refinery

- Carga inicial de producto en el nodo proveedor REFINERY (**Tabla 32**)

Tabla 32.- Carga de Materiales por Transporte vs. Capacidad

Material (Ton)	T1	T2	T3
Mat 1	200		150
Mat 2	200	200	120
Capacidad de T	600	800	1500

- Cantidad óptima de descarga entre nodos

T1

Refinery →	Depot 4→	Depot 3→	Depot 2→	Refinery
Mat1	100 Ton	50 Ton	50 Ton	0 Ton
Mat2	50 Ton	70 Ton	80 Ton	0 Ton

T2

Refinery →	Depot 4→	Refinery
Mat2	200 Ton	0 Ton

T3

Refinery →	Depot 1→	Depot 2→	Refinery
Mat1	100 Ton	50 Ton	0 Ton
Mat2	100 Ton	20 Ton	0 Ton

- **Función objetivo**

Costo Óptimo	\$321,766.00
Índice de Riesgo “IRT” (Suma de los índices de todos los procesos)	1.915×10^7

De las rutas propuestas puede concluirse que al minimizar el costo de traslado, el modelo propuesto asigna la ruta más larga al transporte: T1. El modelo haría lo mismo para T2, pero cuenta con la restricción de no poder enviar el Mat2 por su incompatibilidad con Mat1. El Transporte T3 al ser de mayor costo que los anteriores lleva una porción menor de carga y va a los destinos más cercanos para cubrir la demanda.

El riesgo total asociado a la solución de minimización de costo es presentado, como la suma total de los índices de riesgo de todos los procesos existentes, no tiene un significado específico, por lo que con el fin de analizar el problema bajo la perspectiva de peligrosidad vale la pena recalcular los datos con una función de minimización de riesgo y tener un panorama más amplio bajo este enfoque.

- Análisis de valores duales o marginales

A partir de los resultados obtenidos por el simulador, se han obtenido los valores duales de las variables de demanda que son mostrados en la 1 tonelada adicional de demanda, (**Tabla 33**), la representación de este tipo de datos en el contexto del problema representa el aumento en costo (\$), si la cantidad demandada por nodo se incrementara en

una tonelada. El resultado es válido, siempre y cuando las demás variables permanezcan constantes.

Mediante estos datos, tenemos una noción de la sensibilidad asociada con el proceso y con diferentes cambios que pudieran presentarse a lo largo del tiempo en cada uno de los almacenes de consumo.

Los valores presentados en la tabla representan los valores mínimos de demanda, en la columna LEVEL, el valor de demanda cubierta y en la columna MARGINAL el costo marginal asociado por 1 tonelada adicional de demanda

Tabla 33.- Valores marginales para demanda de acuerdo al modelo

DEMANDA	LOWER	LEVEL	MARGINAL
Mat1.DEPOT1.P1	100	100	600
Mat1.DEPOT2.P1	100	100	1320
Mat1.DEPOT3.P1	50	50	1280
Mat1.DEPOT4.P1	100	100	1220
Mat2.DEPOT1.P1	100	100	1000
Mat2.DEPOT2.P1	100	100	2200
Mat2.DEPOT3.P1	70	70	2184
Mat2.DEPOT4.P1	250	250	2160

Minimización de riesgo

- Secuencias de Ruta

T1

Refinery → Depot 4 → Depot 1 → Depot 2 → Refinery

T2

Refinery → Depot 1 → Depot 4 → Depot 2 → Refinery

T3

Refinery → Depot 3 → Depot 2 → Depot 1 → Depot 4 → Refinery

- Carga inicial de producto en el nodo proveedor REFINERY (**Tabla 34**)

Tabla 34.- Carga de Materiales por Transporte vs. Capacidad

Material (Ton)	T1	T2	T3
Mat 1	150		200
Mat 2	200	150	170
Capacidad de T	600	800	1500

- Cantidad óptima de descarga entre nodos

T1

Refinery →	Depot 4→	Depot 1→	Depot 2→	Refinery
Mat1	100 Ton	50 Ton	0 Ton	0 Ton
Mat2	200 Ton	0 Ton	0 Ton	0 Ton

T2

Refinery →	Depot 1→	Depot 4→	Depot 2→	Refinery
Mat1	0 Ton	0 Ton	0 Ton	0 Ton
Mat2	100 Ton	50 Ton	0 Ton	0 Ton

T3

Refinery →	Depot 3→	Depot 2→	Depot 1→	Depot 4→	Refinery
Mat1	50 Ton	100 Ton	50 Ton	0 Ton	0 Ton
Mat2	70 Ton	100 Ton	0 Ton	0 Ton	0 Ton

- **Función Objetivo**

Índice de Riesgo “IRT” Óptimo (Suma de los índices de todos los procesos) 1.069×10^7
 Costo Total \$805,516.00

El modelo se basa en la elección de los transportes y rutas con menor riesgo.

Discusión de Resultados

A continuación se muestra el Gráfico de Pareto (**Figura 14**) para los valores de ambas funciones objetivo, con el fin de determinar la solución más factible desde ambos puntos de vista.

Comparativo de Resultados

Comparativo de Resultados

Costo Total	\$321,766.00	\$805,516.00
Riesgo Total	1.915×10^7	1.0619×10^7

Costo Total	322	344	344	343	323	346	327	359	356	415	460	639	806
Riesgo Total	1.92	1.90	1.88	1.85	1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.06

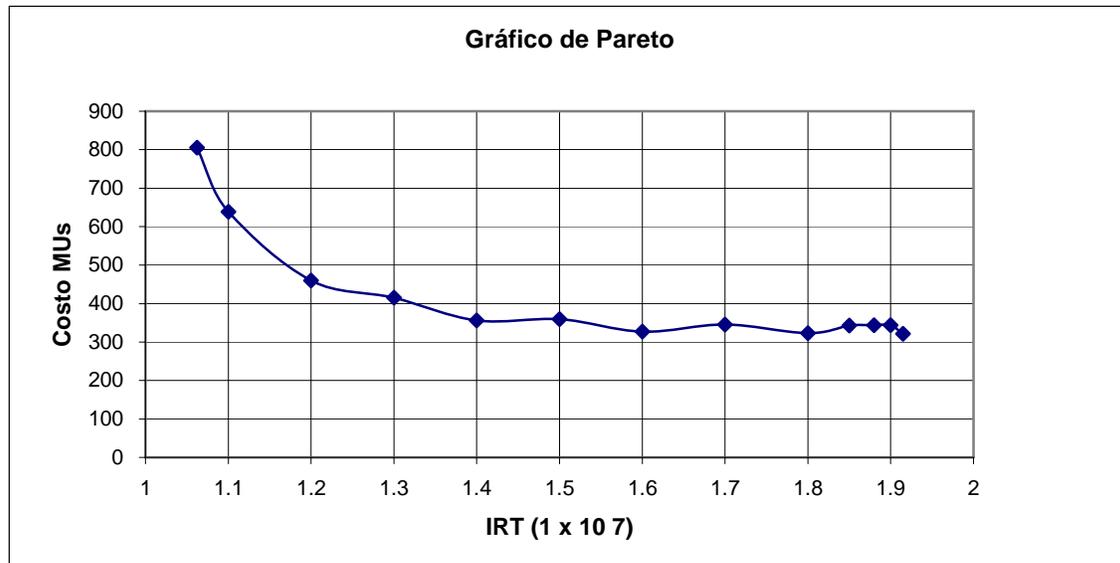


Figura 14.- Gráfico de Pareto

4.4 Aplicación del modelo a ejemplo motivador

4.4.1 Planteamiento del problema

Se requiere establecer la planeación del modelo de transporte propuesto en el **Capítulo 1**, para ello se cuenta con los datos de demanda establecidos en la tabla , considerando una prioridad de entrega inmediata y una disponibilidad total de los productos en el almacén general. A continuación se establecen las restricciones adicionales (**Tabla 35**) que se requieren para solucionar el problema.

Tabla 35.- Restricciones adicionales al modelo

Compatibilidad de materiales							
Material	Acido Acrílico	Peróxido de Dibenzoilo	Metil-Etil Cetona	Acido Clorosulfónico	Acido Acético	Diesel	Água
Acido Acrílico	1	1	1	1	1	1	1
Peróxido de Dibenzoilo	1	1	1	0	1	1	0
Metil-Etil Cetona	1	1	1	1	1	1	1
Acido Clorosulfónico	1	0	1	1	1	1	0
Acido Acético	1	1	1	1	1	1	1
Diesel	1	1	1	1	1	1	1
Água	1	0	1	0	1	1	1

Compatibilidad por Transporte

Material	TA	TB	TC
Acido Acrílico	1	0	1
Peróxido de Dibenzoilo	0	0	1
Metil-Etil Cetona	1	0	1
Acido Clorosulfónico	0	1	0
Acido Acético	0	1	1
Diesel	1	0	1
Água	1	0	1

Restricción de Ruta.

Peso Máximo (T)	Almacén General	Planta Polimeros 1	Planta Polimeros 2	Planta Polimeros 3	Planta Alcoholes	Mtto	Planta Extrusión	Almacén Producto Terminado	Planta Inyección
Almacén General	0	100	50	30	20	600	800	100	200
Planta Polimeros 1	100	0	200	300	20	50	30	400	150
Planta Polimeros 2	50	200	0	100	400	200	300	600	100
Planta Polimeros 3	30	300	100	0	200	40	600	70	800
Planta Alcoholes	20	20	400	200	0	200	30	400	500
Mtto	600	50	200	40	200	0	600	90	170
Planta Extrusión	800	30	300	60	30	600	0	400	200
Almacén Producto Terminado	100	400	600	70	40	90	400	0	20
Planta Inyección	200	150	100	800	500	170	200	20	0

4.4.2 Solución al problema propuesto

El modelo de solución, es resuelto con 67656 ecuaciones, 42932 variables simples y 29961 variables discretas con un tiempo de ejecución de 1000 segundos, obteniendo los siguientes valores para las funciones objetivo.

Comparativo de resultados

Comparativo de Resultados

Costo Total	\$4056	\$11685
Riesgo Total	2.46×10^6	1.12×10^5

Capítulo 5 Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

El “Índice de Riesgo en el Transporte (IRT)”:

- Cumple con el objetivo propuesto ser un modelo semicuantitativo de medición del riesgo. La definición permite la evaluación comparativa entre más de dos opciones.
- El IRT está basado y justificado en modelos y cuantificaciones reportados en la literatura. Donde ha sido modificado para su uso en un modelo de optimización matemática.
- Propone una metodología en base a “hojas de control” y “rúbricas” para identificar y cuantificar la probabilidad de eventos de peligros, cuando no se cuente con información estadística.
- La información provista es factible de almacenarse en una base de datos y permitir su actualización conforme cambien las condiciones en ruta y/o transporte.

El “Modelo de Transporte”:

- El modelo de transporte propuesto incluye restricciones de tipo normativo y operativo ya sea como prohibiciones (compatibilidad entre materiales, compatibilidad en el transporte) o limitantes de control (capacidad del transporte, capacidad de ruta) que deben cumplirse para obtener una solución óptima.
- Para la proposición del modelo, se ha utilizado la formulación de un problema de transporte simple y se ha incluido el cálculo del IRT en base a restricciones lógicas.
- Cumple con el objetivo propuesto de resolver el problema de transporte y asignación de carga bajo dos criterios: Costo y Riesgo.
- El modelo matemático es factible de aplicarse a un software comercial para el transporte de materiales.

5.2 Trabajos futuros

Índice de riesgo

- **Revisión al peso de contribuciones:**

Hasta el momento se han cuantificado de igual modo todas las características por rubro, el peso de cada característica no difiere para el incremento en la probabilidad de un evento de peligro por parte de las condiciones de ruta y del transporte.

Por lo que se propone hacer un análisis a detalle, revisando los valores reportados de probabilidad real en el transporte para categorizar entre características, es decir de forma similar a como se ha hecho para el cálculo del impacto de los materiales.

- **Integración de “rubros” adicionales**

Al incorporar almacenes y personal, se podrán analizar otros eventos que incidan en ambos rubros y que faciliten la integración de un modelo de planeación en base a riesgo para toda la instalación industrial.

- **Aplicación de la metodología del IRT en un índice de sustentabilidad**

Debido a que la metodología de cálculo cumple con la definición formal de riesgo y a su enfoque semicuantitativo, la metodología pudiera aplicarse no solo en base al impacto causado por causa de materiales peligroso, sino en base a daños económicos y sociales. Por lo que constituiría la base de un Índice de Sustentabilidad.

Modelo de transporte

- **Solución al problema de transporte en distintos periodos**

El ejemplo propuesto solo contempla la solución en un periodo de tiempo, sin embargo, es de esperar que el riesgo sea distinto en función los turnos, por lo que la solución en distintos periodos de tiempo permitirá incorporar la restricción realista de “envío por orden de prioridad”.

- **Análisis de Incertidumbre**

Analizar parámetros de incertidumbre por factores económicos y de riesgo en el transporte.

- **Solución Multiobjetivo**

Integración de modelos adicionales al de transporte para formular un sistema completo de planeación industrial, incorporando un número “n” de funciones objetivo para optimizar la planeación desde una perspectiva económica y ambiental.

Bibliografía

- **AIChE/CCPS (1990)** *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, second edition, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- **AIChE/CCPS (1995)** *Guidelines for Safe Storage and Handling of Reactive Materials*, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- **AIChE/CCPS (1995)** *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis*, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- **APELL Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level (2001)**. *Guidance for Dangerous Goods Transport: Emergency Planning in a Local Community*. <http://www.uneptie.org/pc/apell> (Acceso 1 de Noviembre 2006)
- **Batelle (2001)** “*Comparative Risks of Hazardous Materials and Non-Hazardous Materials Truck Shipment Accidents/Incidents*”, prepared for Federal Motor Carrier Safety Administration. <http://www.fmcsa.dot.gov/documents/hazmatriskfinalreport.pdf> (Acceso 15 de Septiembre del 2006)
- **Berdica, K. (2002)**. “*An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done*”, *Transport Policy* 9(2): 117-127.
- **Brookhaven National Laboratory, BNL (2005)** *Hazardous Material Transportation Manual*. https://sbms.bnl.gov/sbmsearch/ProgDesc/HazMat/HazMat_PD.cfm (Acceso 15 de Septiembre del 2006)
- **Code of Federal Regulations, 49 CFR Department of Transport**, United States of America, 2004. <http://www.access.gpo.gov/nara/cfr> (Acceso 15 de Septiembre del 2006)
- **Crowl, D.A., & Louvar, J.F. (2002)**. *Chemical process safety fundamentals with applications*. 2nd edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR.
- **DOW Chemical (1994a)**. *Dow's Fire and Explosion Index – Hazard Classification Guide*, 7th edition. CEP Technical Manual, American Institute of Chemical Engineers.
- **DOW Chemical (1994b)**. *Dow's Chemical Exposure Index Guide*, (1994). CEP Technical Manual, American Institute of Chemical Engineers.

-
- **Erkut E, Verter V. (1998)** “*Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials*”. Operations Research, Vol. 46, No. 5, 625-642.
 - **Fabiano, B., F. Curro, E. Palazzi and R. Pastorino (2002)**. "A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous good transportation." Journal of Hazardous Materials 93(1): 1-15.
 - **Gopalan R., Kolluri K., Batta R., Karwan M. (1990)** “*Modeling Equity of Risk in the Transportation of Hazardous Materials*”. Operations Research, Vol. 38, No.6, 961-973.
 - **Heikkila, A.M. (1999)**. “*Inherent safety in process plant design: an index based approach*”. PhD Dissertation, Technical Research Center of Finland, VTT, Espoo: Finland.
 - **Helmerts E.N and L.C. Schaller (1982)** “*Calculated Process Risk in Hazardous Management*”.
 - **International Atomic Energy Agency, IAEA (1996)**. “*Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries*” IAEA-TECDOC-727.
 - **ICI (Imperial Chemical Industries) (1985)**. *The Mond Index*, 2nd Edition. ICI PLC, Explosion Hazard Section. Technical Department. Winnington, Northwick, Cheshire, England.
 - **INE (2006)**. *Introducción a la prevención de accidentes químicos y síntesis*. <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/132/introduccion.html> (Acceso 15 de Septiembre del 2006)
 - **Kaplan, S., & Garrick, B.J. (1981)**. *On the quantitative definition of risk*, Risk Analysis, vol.1, no. 1.
 - **Khan F.I., Sadiq R. & Amyotte P.R. (2003a)**. *Evaluation of available indices for inherently safer design options*. Process Safety Progress, 22 (2), 83-98.
 - **Lavell, A. (1996)**. “*Degradación Ambiental*”, Riesgos Urbanos y Desastres. Ciudades en Riesgo. M. A.Fernandez. Peru, USAID: 30.
 - **Lawler E. K, Lenstra J.K., Rinnoy Kan A.H.G. (1985)** “*The Traveling Salesman Problem*”, A Guided Tour of Combinatorial Optimization. John Wiley & Sons Ltd.
 - **Lees, F.P. (1980)** “*Loss Prevention in the Process Industries*’. Butterworths. London and Boston.

- **Marshall, V.C. (1987)** “*Major Chemical Hazards*”. Wiley, New York
- **Okrent, D. (1981)** “*Industrial risks*”. Proceedings of the Royal Society of London A376, pp.133-148.
- **Rhyne, W.R. (1994)**”*Hazardous Materials Transportation Risk Analysis: Quantitative Approaches for Truck and Train*”; Van Nostrand Reinhold. New York, NY.
- **Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1997)** “*Reglamento sobre peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*” SCT, México.
- **Secretaría de Gobernación** “*Ley General de Protección Civil*” Diario Oficial de la Federación reformado el 12 de mayo del 2000. México.
- **Tapia, CG. (1995)** “*A Mixed-Binary Linear Model for Fleet Routing and Multiple Product-types Distribution*”, Philippine Management Review Vol. 6 No. 1 pp. 75-86.

ANEXO I

Número de Referencia	Tipo de Material	Material (Ejemplo)
3	Líquido inflamable, presión de vapor < 0.3 bar a 20°C, (punto de inflamación 20°C)	Acetal
		Acetaldehído
		Acetato de etilo
		Acetato de isobutilo
		Acetato de metilo
		Acetato de propilo
		Acetato de vinilo
		Acetona
		Acetonitrilo
		Acrilato de etilo
		Benceno
		Butanediona
		Butanol
		Butanona
		Butil formato
		Ciclohexano
		Cloruro de bencilo
		Cloruro de butilo
		Dicloroetano
		Dicloropropano
		Dietil cetona
		Dietilamina
		Dimetil carbonato
		Dimetilciclohexano
		Dioxano
		Etanol
		Eter isopropilico
		Etil formato
		Etilbenceno
		Heptano
		Hexano
Metanol		
Metil isobutil cetona		
Metil metacrilato		
Metil propionato		
Metil vinil cetona		
Metilciclohexano		
Octano		
Piperidina		
Piridina		
Tolueno		
Trietilamina		

Número de Referencia	Tipo de Material	Material (Ejemplo)
3	Líquidos inflamables con presión de vapor <0.3 bar a 20°C, (punto de inflamación > 20°C)	Acetato de etilglicol
		Alcohol arílico
		Alcohol isoamílico
		Anilina
		Benzaldehído
		Butanol
		Cloruro de bencilo
		Combustóleo (fuel oil)
		Diclorobenceno
		Dicloropropano
		Diesel
		Dietyl carbonato
		Diglicol butil
		Dimetilformamida
		Estireno
		Etanolamina
		Etil formato
		Etilenclorohidrina
		Etilenglicol
		Fenol
		Furfural
		Furil carbinol
		Isobutanol
		Isopropanol
		Metil butil cetona
		Metil glicol
		Metil glicol acetato
		Naftaleno
		Nitrobenceno
		Petróleo
Silicato de etilo		
Trioxano		
Xileno		

Número de Referencia	Tipo de Material	Material (Ejemplo)
6	Líquidos inflamables, presión de vapor >0.3 bar a 20°C	Alcohol isopropílico
		Bromuro de etilo
		Ciclopentano
		Dietyl éter
		Disulfuro de carbono
		Gas natural condensado
		Gasolina
		Isopropeno
		Metil formato
		Nafta
		Oxido de propileno
		Pentano
		Propanol
		7
Butano		
Buteno		
Ciclobutano		
Ciclopropano		
Cloruro de etilo		
Cloruro de vinilo		
Difluoroetano		
Dimetil éter		
Etano		
Floruro de etilo		
Floruro de vinilo		
Gas L.P		
Isobutano		
Isobutileno		
Metil éter		
Metil fluoruro		
Monóxido de carbono		
Óxido de etileno		
Propadieno		
Propano		
Propileno		

Número de Referencia	Tipo de Material	Material (Ejemplo)
11	Gas Inflamable licuado por Congelación	Eteno
		Gas Natural
		Hidrógeno
		Metano
		Metil Acetileno
13	Gas inflamable en cilindros	Acetileno
		Butano
		Gas L.P
		Hidrógeno
		Propano
14, 15	Explosivos	Nitrato de amonio
		Nitroglicerina
		Peróxidos orgánicos (tipo B)
		Trinitrotolueno
17	Líquidos de baja toxicidad	Alilamina
		Bromuro de alilo
		Cloruro de acetilo
		Cloruro de alilo
		Cloruro de fenil carbilamina
		Cloropicrina
		Diclorodietil eter
		Dimetilhidrazina
		Dimetilsulfato
		Dimetilsulfuro
		Epiclorohidrina
		Etanotiol
		Etil isocianato
		Etiltriclorosilano
		Pentacarbonil hierro
		Isopropilamina
		Metacroleina
		Metil hidracina
		Tetróxido de osmio
		Perclorometilmercaptano
		Perclorometiltiol
		Oxicloruro de fósforo
		Tricloruro de fósforo
Cloruro de sulfurilo		
Tetraetilo de plomo		
Tetrametilo de plomo		
Triclorosilano		
Cloruro de vinilideno		

Número de Referencia	Tipo de Material	Material (Ejemplo)
19	Líquidos de mediana toxicidad	Ácido hidrofúrico
		Ácido nítrico fumante
		Ácido sulfúrico fumante
		Acrilonitrilo Acroleína
		Bromo
		Cianuro de bromo
		Cloroacetaldehído
		Clorometiléter
		Dimetildiclorosilano
		Etilcloroformato
		Etilenimina
		Isobutilamina
		Metilcloroformato
		Metildiclorosilano
		Metiltriclorosilano
		Óxido de propileno
		Propilenimina
Soluciones de formaldehído		
Sulfuro de carbono		
Tetracloruro de estaño		
23	Líquidos altamente tóxicos	Cianuro de hidrógeno
		Dióxido de nitrógeno
		Tetrautil amina
27	Líquidos muy altamente tóxicos	Carbonil níquel
		Metil isocianato
		Pentaborano Pentafluoruro de azufre
30	Gases de baja toxicidad	Cloruro de vinilo
		Etilamina
		Óxido de etileno
31	Gases de mediana toxicidad	Ácido fluorhídrico
		Amoniaco
		Bromuro de vinilo
		Dimetilamina
		Dióxido de azufre
		Flúor
		Fluoruro de perclorilo
		Metilbomide
		Monóxido de carbono
		Silano
		Tetrafluoruro de silicón
		Trifluoruro de cloro
Trifluoruro de nitrógeno		
Trimetilamina		

Número de Referencia	Tipo de Material	Material (Ejemplo)
32, 37, 41, 42	Gases altamente tóxicos	Ácido bromhídrico
		Ácido clorhídrico
		Ácido sulfhídrico
		Cloro
		Cloruro de metilo
		Dicloroacetileno
		Dióxido de cloro
		Fluoruro de sulfurilo
		Formaldehído
		Germanio
		Hexafluoroacetona
		Monóxido de nitrógeno
		Sulfuro de carbonilo
		Tetrahidruro de estaño
Tetróxido de dinitrógeno		
Tricloruro de boro		
33, 38	Gases muy tóxicos	Ácido selenhídrico
		Boroetano
		Ceteno
		Cianógeno
		Cloruro de carbonilo
		Cloruro de nitrosilo
		Difluoruro de oxígeno
		Estibina
		Flúor
		Fluoruro de carbonilo
		Fosfina
		Fosgeno
		Hexafluoruro de telurio
		Tetrafluoruro de azufre
34, 39	Gases extremadamente tóxicos	Ácido selenhídrico
		Arsina
		Hexafluoruro de selenio
		Ozono