

# COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS VEHÍCULOS DE CARGA PESADA EN EL CANTÓN DE SAN JOSÉ (2011-2012)

Fecha de recepción: 10/09/12

Fecha de aprobación: 17/01/13

Ing. Carlos Roberto Gúmez Shedden  
Consejo de Seguridad Vial (COSEVI)  
San José, Costa Rica  
carlosgomez@gmail.com

## RESUMEN

En esta investigación se estudiaron algunos problemas de seguridad vial asociados al movimiento de los vehículos de carga pesada en ciertos sectores del cantón de San José, enfatizando el análisis en algunos puntos de la carretera General Cañas (ruta N° 1) y la Circunvalación (ruta N° 39), haciendo análisis cualitativo y cuantitativo de la conducción de tales vehículos y relacionándolo con las características geométricas y topográficas de los lugares seleccionados y con los tipos de accidentes que se presentaron en la región, tomando en consideración las características mecánicas de algunos vehículos de carga pesada. Entonces se lograron identificar algunas oportunidades para mejorar la seguridad vial que implican hacer modificaciones geométricas de algunos elementos viales como rotondas y rampas de acceso. Además, se comprobó que los conductores de los vehículos de carga pesada no poseen problemas de visibilidad y distancias de frenado en los tramos de carretera seleccionados. Finalmente, un análisis cuantitativo de la estabilidad de algunos vehículos de carga pesada indicó que, bajo condiciones normales de conducción, estos no deberían tener problemas de estabilidad en las curvas en las que se presentaron volcamientos.

**Palabras claves:** Accidentes de tránsito, vehículos de carga pesada, comportamiento dinámico, maniobrabilidad, distancia de frenado, estabilidad.

## ABSTRACT

*This research addressed some road safety problems related to the motion of heavy vehicles in some places of the San José county, focusing the analysis on some locations of the No.1 and No.39 highways. This was made by relating a qualitative and quantitative analysis of the heavy vehicles' maneuverability with the geometric and topographic characteristics of some selected places, with the traffic accidents, and with the mechanical characteristics of some heavy vehicles. Hence, the possibility of implementing some road safety improvements was identified, improvements that are related to the modification of the design of some*

*roundabouts and an access ramp. Besides, it was proved that the heavy vehicle drivers do not have stopping sight distance conflicts on some road segments chosen. Finally, a quantitative analysis of the stability of some heavy vehicles pointed out that, under normal driving conditions, those vehicles should not have stability problems on the horizontal curves where some rollovers occurred.*

**Key words:** Traffic accidents, heavy vehicles, dynamic behaviour, maneuverability, stopping distance, stability.

## INTRODUCCIÓN

En ocasiones se generan congestionamientos viales porque los conductores de los vehículos de carga pesada no poseen suficiente espacio para circular por ciertos sectores, teniendo que realizar varias maniobras para poder avanzar, lo cual puede generar molestias a otros usuarios de las vías, quienes a veces piensan que tales vehículos simplemente no deberían circular por dicha zona, sin considerar que el rol que ellos cumplen podría ser vital para la economía del lugar. Ese es solo un ejemplo cotidiano de los problemas que se pueden presentar cuando los vehículos de carga pesada deambulan por lugares que no fueron aptos para ello. El diseño de las carreteras puede estar asociado con la manera en que se mueven los vehículos que transitan por ellas, por lo que a la hora de diseñarlas se debe tomar en consideración el tipo de vehículos que van a circularlas, entre otros aspectos. No obstante, al permitir la circulación de nuevos tipos de vehículos se podrían generar problemas de seguridad vial, ya que las características de las carreteras pueden no ser apropiadas para su conducción, por lo que se deben realizar algunos análisis que permitan determinar si las carreteras o algunos de sus elementos viales deben ser modificados, o si se puede permitir o restringir el paso de ciertos vehículos. El objetivo

de esta investigación es determinar si existen problemas de seguridad vial asociados al comportamiento dinámico de ciertos vehículos de carga pesada que circulan por algunas carreteras del cantón central de San José, problemas que pudieron haber surgido como consecuencia de los cambios en las normativas de pesos y dimensiones que se dieron. Para ello se realizó un análisis del comportamiento dinámico de los vehículos de carga basado en su maniobrabilidad, sus distancias de frenado y su estabilidad.

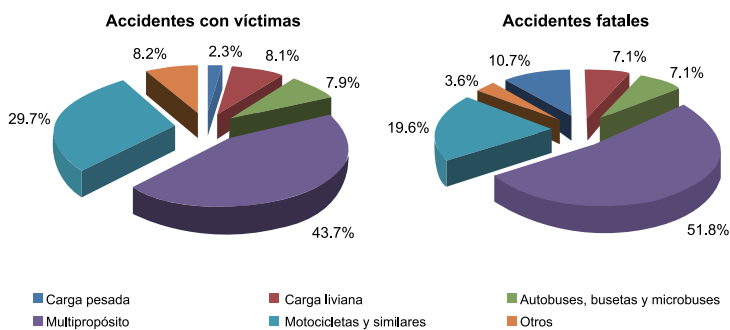
## DEFINICIONES

- Vehículo de carga pesada: vehículo utilizado para la carga de bienes y productos, cuyo peso total es mayor o igual a 8 toneladas.
- COSEVI: Consejo de Seguridad Vial.
- Accidente de tránsito con víctimas: son los accidentes de tránsito en los que al menos una persona resultó con heridas leves. Por lo tanto, esta clasificación incluye tanto a los accidentes con heridos leves y graves, como a los accidentes con fallecidos.
- Vehículos multipropósito: vehículos principalmente destinados al transporte de personas, que incluyen a los sedanes, coupe, convertibles, familiares y rurales.
- Comportamiento dinámico: comportamiento asociado al movimiento.
- NHTSA: Administración Nacional del Tráfico en Carreteras, por sus siglas en inglés.
- Distancia de visibilidad: es la longitud que se encuentra entre un objeto y el punto de ubicación del conductor en el momento en que él logra divisar el objeto.
- Distancia de frenado: es la distancia requerida para detener un vehículo por completo, partiendo de una velocidad inicial dada.
- MSHA: Administración de la Seguridad y Salud Mineras, por sus siglas en inglés.
- Tiempo de percepción y reacción ( $t_r$ ): es el tiempo que transcurre desde el momento en que un conductor se percata de algo y decide qué maniobra debe realizar.
- LanammeUCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- GVW: peso bruto vehicular, por sus siglas en inglés.
- SAE: Sociedad de Ingenieros Automotrices, por sus siglas en inglés.
- AASHTO: Asociación Americana de Autopistas Estatales y Oficiales del Transporte, por sus siglas en inglés.
- Masa amortiguada: la masa amortiguada de un vehículo es la masa total soportada por el sistema de suspensión.
- Tándem: un eje compuesto de 2 ejes de forma tal que para efectos de análisis se les considera como uno solo.
- Trídem: un eje compuesto de 3 ejes de forma tal que para efectos de análisis se les considera como uno solo.
- PMV: peso máximo vehicular.
- PMA: peso máximo autorizado.
- FMVSS: Estándares Federales de Seguridad Vehicular, por sus siglas en inglés.
- C.FR: Código de Regulaciones Federales, por sus siglas en inglés.
- C2: vehículo de carga unitario (no posee articulaciones) de 2 ejes.
- C3: vehículo de carga unitario de 3 ejes.
- C4: vehículo de carga unitario de 4 ejes.
- T3S2: vehículo de carga articulado que consta de un tractocamión de 3 ejes con un semirremolque de 2 ejes.
- T3S3: vehículo de carga articulado que consta de un tractocamión de 3 ejes con un semirremolque de 3 ejes.
- ARRB: Junta de Investigación Vial de Australia, por sus siglas en inglés.

## ANTECEDENTES

Usualmente los vehículos de carga pesada no se encuentran en grandes proporciones en los accidentes de tránsito, sin embargo estos vehículos son de especial interés porque los accidentes en los que participan pueden presentar altos porcentajes de mortalidad, en comparación con los accidentes de otros tipos de vehículos como los sedanes. De acuerdo a las bases de datos de accidentes del COSEVI, entre los años 2006 al 2010 ocurrieron 3,589 accidentes con víctimas en el cantón de San José, de los cuales sólo en el 2.3% de ellos se encontraron involucrados los vehículos de carga pesada, sin embargo ellos participaron en el 10.7% de los accidentes fatales (de un total de 56 accidentes fatales), teniendo una tasa de mortalidad casi 4 veces mayor que la de los vehículos multipropósito, como lo muestra el gráfico 1.

Gráfico 1. Distribución porcentual de los vehículos involucrados en los accidentes de tránsito en el cantón de San José.



Esta información se obtuvo de la base de datos de los partes oficiales de los accidentes con heridos y/o muertos que se registraron de forma manual durante los años 2006 y 2007, y de la base de datos de los accidentes que se registraron utilizando el sistema de Hand Held o "HH" durante los años 2008-2010. Por COSEVI

A pesar de que los vehículos de carga pesada pueden presentar altas tasas de mortalidad, en ocasiones no se llevan a cabo estudios para determinar si se presentan problemas de seguridad vial asociados a su comportamiento dinámico; y además, las normas de pesos y dimensiones costarricenses casi no toman en cuenta los aspectos asociados al movimiento de los camiones, salvo el radio de giro. Esto podría aumentar la posibilidad de que se estén presentando problemas de seguridad vial relacionados a su movimiento. No obstante, las normas de pesos y dimensiones han presentado ciertas variaciones a lo largo del tiempo, ya que de acuerdo con Arce (s.f), antes del año 2003 teóricamente en Costa Rica se regían las normativas estipuladas en el Acuerdo Centroamericano sobre la Circulación por Carretera, que permitían vehículos cuya longitud y peso máximo eran 18 m y 25 ton respectivamente, pero al implementarse el Reglamento sobre la Circulación por Carretera con base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga, la longitud y peso máximo fueron incrementados a 21 m y 56 ton, lo cual implica que algunas de las carreteras pudieron haber sido construidas utilizando vehículos de diseño más pequeños y livianos, lo que puede ocasionar problemas de seguridad vial.

## METODOLOGÍA

Este estudio se llevó a cabo en los tramos de la carretera General Cañas (ruta 1) y la Circunvalación (ruta 39) que se ubican dentro del cantón de San José, debido a que ese lugar ha sido clasificado como uno de los cantones de alto riesgo del país en cuanto a materia de seguridad vial se refiere. La evaluación del comportamiento dinámico de los vehículos de carga pesada se enfocó en los aspectos de la maniobrabilidad, de las distancias de frenado y de la estabilidad, los cuales fueron estudiados como sigue:

## A. Maniobrabilidad

Los problemas de maniobrabilidad se estudiaron simplemente comparando las características geométricas y constructivas de algunas rotondas y curvas horizontales especialmente diseñadas para acomodar vehículos de carga pesada, con algunas de las rotondas y curvas horizontales encontradas en los tramos de carretera en estudio y donde se identificó que existían dificultades para maniobrar vehículos de carga pesada o donde había concentración de accidentes con tales vehículos.

Los problemas de maniobrabilidad de algunos vehículos de carga pesada en estos elementos viales se pueden asociar al desvío del eje trasero que se produce cuando están circulando en trayectorias curvilíneas a baja velocidad, lo cual hace que requieran mayor espacio para transitar, como se puede apreciar en la figura 5.

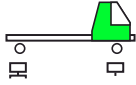
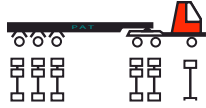

Cabe destacar que para analizar las rampas de acceso se hizo necesario conocer sus dimensiones. Para ello, se realizaron algunas mediciones de campo para obtener el ancho de los carriles y las otras dimensiones se aproximaron utilizando los trazos de la red vial del Departamento de Gestión Catastral y Geografía de la Municipalidad de San José. En cambio, el análisis de las rotondas fue netamente descriptivo.

## B. Distancias de frenado

Los ojos de los conductores de los vehículos de carga pesada se encuentran a mayor altura que los ojos de los conductores de los vehículos multipropósito, por lo que los primeros usualmente no tienen problemas de visibilidad. No obstante, de acuerdo con Transportation Research Institute (1997), en las carreteras pueden existir zonas en las que la visibilidad de los conductores de los vehículos de carga pesada se ve limitada por algún motivo, como el tope de una pendiente (p.13), pudiendo generar conflictos con la distancia de frenado puesto que éstos vehículos pueden requerir más tiempo para detenerse por completo. El hecho de que la distancia de frenado de los vehículos de carga pesada pueda ser mayor que la distancia de frenado de los vehículos multipropósito se debe en parte a su peso y en parte al tiempo de respuesta de los sistemas de frenos.

Usualmente los vehículos de carga pesada utilizan sistemas de frenos de aire comprimido, este sistema se caracteriza porque antes de que los frenos se vuelvan efectivos se deben llenar unas cámaras de aire, por lo que su tiempo de respuesta está asociado a la rapidez de llenado de las cámaras. Además, los tiempos de respuesta dependen del tipo de vehículo, ya sea un camión unitario o articulado, y dependen de la cantidad de remolques o semirremolques que puedan poseer, como se puede apreciar en la tabla 1.

Tabla 1. Tiempo de respuesta de los sistemas de frenos de diferentes tipos de vehículos de carga, de acuerdo al FMVSS 121.

TIPO DE VEHÍCULO	COMPONENTE			
		CAMIÓN	REMOLQUE 1	REMOLQUE 2
Camión unitario		0.45	-	-
Camión articulado con un remolque o semirremolque		0.35	0.60	-
Camión articulado con 2 remolques o semirremolques		0.35	0.50*	0.60
		0.35	0.55*	0.60

\*En estos casos el tiempo de respuesta puede variar según sea el tipo de articulación que se utilice para unir los remolques o semirremolques. De acuerdo al FMVSS 121, el tiempo de respuesta del sistema de frenos se define como el tiempo que duran todas las cámaras del sistema de frenos en alcanzar una presión de 60 psig, el cual se mide desde el momento en que se inicia el movimiento del pedal. Modificada de "Air Brake Systems," 49 C.F.R. 571.121.

Para evaluar las distancias de frenado primero se determinaron los puntos en los que se concentraron en mayor medida las colisiones entre vehículos por detrás y en las que participaron los vehículos de carga pesada. Luego se midieron las distancias de visibilidad que poseía un conductor de un sedán, y se utilizaron simplemente como una referencia para evaluar las distancias de frenado de los vehículos de carga pesada.

Posteriormente se llevaron a cabo mediciones de las velocidades a las que circulan los vehículos por ciertos tramos de carreteras rectas, y se asumió que la velocidad de los vehículos de carga pesada era igual al percentil 85 de la velocidad a la que circulan los vehículos, la cual es mayor a la velocidad a la que comúnmente son conducidos tales camiones.

Una vez obtenidas las velocidades de conducción y las distancias de visibilidad, se calcularon las distancias de frenado por medio de 3 métodos:

Método 1: considera que los conductores tienen suficiente tiempo para reaccionar al suponer que su tiempo de percepción y de reacción es de 2.5 segundos, el cual es el tiempo de diseño utilizado por la AASHTO (como fue citado por MSHA, 1999, p.7). Luego se calculó la distancia recorrida mientras reacciona el sistema de frenos de los vehículos de carga pesada, y posteriormente se asumió que las llantas se bloquean por lo que ocurre el deslizamiento sobre el pavimento húmedo. Similarmente

al método utilizado por MSHA (1999), se calculó la distancia de frenado (D) como se muestra a continuación:

Primero se calculó la distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción del conductor ( $D_r$ ) usando la ecuación (1), donde  $V_i$  es la velocidad inicial (que se supone constante) a la que viaja el vehículo y  $t_r$  es su tiempo de percepción y reacción.

$$D_r = V_i \cdot t_r \quad (1)$$

Segundo, se usó la ecuación (2) para determinar el cambio de velocidad producido por el efecto de la inclinación de la carretera ( $V_{RSF}$ ) mientras transcurre el tiempo de reacción del sistema de frenos del vehículo (TRSF). En esta ecuación  $\alpha$  es la pendiente de la carretera,  $V_i$  es la velocidad inicial y  $g$  es la gravedad. Cabe destacar que en este paso, basándose en los tiempos de respuesta del FMVSS 121, se asumió un tiempo de respuesta de 0.45 segundos para el caso de los camiones unitarios y 0.60 segundos para los camiones articulados, pero no se consideraron los tiempos de respuesta de cada uno de sus componentes (ver tabla 1).

$$V_{RSF} = V_i + g \cdot \text{sen } \alpha \cdot TRSF \quad (2)$$

Tercero, se calculó la distancia recorrida mientras reacciona el sistema de frenos del vehículo ( $D_{RSF}$ ).

$$D_{RSF} = \frac{V_i + V_{RSF}}{2} \cdot TRSF \quad (3)$$

Una vez calculada la distancia ( $D_{RSF}$ ), se determinó la distancia recorrida mientras ocurre el deslizamiento ( $D_d$ ), donde "a" es la desaceleración y  $\mu_D$  es el coeficiente de fricción. Cabe destacar que en esta etapa se utilizaron los coeficientes de fricción de los tramos de carretera estudiados, los cuales fueron medidos por el Lanamme siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E 1859.

$$a = -g \cdot \mu_D \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

$$D_s = -\frac{(V_{RFS})^2}{2 \cdot a} \quad (5)$$

Finalmente se calcularon las distancias de frenado en los sectores seleccionados sumando las distancias  $D_r$ ,  $D_{RSF}$  y  $D_s$ .

$$D = D_r + D_{RSF} + D_s \quad (6)$$

**Método 2:** A diferencia del primer método, aquí se supuso que los camiones se detienen sin que ocurra el deslizamiento. Para ello se fijó el tiempo de reacción nuevamente en 2.5 segundos y se supuso una desaceleración de frenado constante de  $-3.69 \text{ m s}^{-2}$ , sumando o restando el componente asociado a la aceleración obtenida en una pendiente (ver ecuación (8)), según sea el caso. La desaceleración de  $-3.69 \text{ m s}^{-2}$  se obtuvo al calcular la desaceleración requerida para detener completamente, en una distancia de 67 m, un vehículo de carga pesada que inicialmente viaja a una velocidad de  $80 \text{ km/h}^{-1}$ , según el requerimiento especificado en el artículo 5 del Reglamento Técnico para la realización de estudios de conversión y/o modificación de vehículos de carga, para lo que se utilizó la ecuación (7).

$$a = \frac{-v^2}{2 \cdot D} \quad (7)$$

$$a = -3.69 \pm g \cdot \text{sena} \quad (8)$$

En este método no se tomó en consideración el tiempo de respuesta del sistema de frenos, sino que se supuso una aceleración constante desde el momento en que el sistema de frenos es accionado, por lo que la distancia de frenado se calculó como

$$D = D_r + D_s \quad (9)$$

donde  $D_s$  se calculó por medio de la ecuación (5).

**Método 3:** De forma similar al primer método, la distancia de frenado de emergencia se calculó por medio de las ecuaciones (1-6). No obstante, se supuso que el tiempo de percepción y reacción de los conductores durante una emergencia es de 1 segundo, según lo especificado por Transportation Research Institute (1997).

## C. Estabilidad

Para evaluar la estabilidad se realizó una simulación para estimar el coeficiente de transferencia de carga lateral (CTCL), el cual permite determinar la proporción de las fuerzas verticales que se están transfiriendo entre las llantas de un mismo eje, como se puede apreciar en la figura 1. Cuando un vehículo está a punto de volcarse, las llantas de un lado del eje dejan de tener contacto con el suelo, por lo que todo el peso se transfiere a las llantas de un solo lado del vehículo. Por lo tanto, si se determina que en cierto momento el CTCL de un vehículo es 1, este está próximo a volcarse.

En la simulación que se realizó para estimar el CTCL se tomaron en cuenta varias variables, entre las que se encuentran velocidad de conducción (se utilizó el percentil 85 de la velocidad a la cual viajan los vehículos por los tramos rectos de carretera ubicados antes o después de las curvas, velocidad que usualmente es mayor a la velocidad de circulación de los vehículos de carga, como lo muestra la tabla 7), el ángulo de peralte, el radio de curvatura y algunas de las características vehiculares que afectan el comportamiento dinámico (ver tablas 2, 3 y 4 y las figuras 2 y 3). Cabe destacar que los radios de las curvas y los ángulos de peralte fueron aportados por el Departamento de Diseño Geométrico del MOPT, características que son de suma importancia para relacionar el comportamiento dinámico de los vehículos de carga con la geometría de las vías.

Una vez obtenidas las características deseadas, se supuso que la aceleración lateral del vehículo es equivalente a la aceleración centrífuga  $A_y$ , la cual se calculó por medio de la ecuación (10), en la que  $v$  es la velocidad y  $\rho$  es el radio de la curva. Como las carreteras cuentan con varios carriles, se asumió que los vehículos de carga pesada circulaban por la mitad del carril con el menor radio de curvatura, esto con el fin de representar los vehículos que experimentan la mayor fuerza centrífuga en las curvas en estudio, ya que a menor radio mayor es la aceleración lateral.

$$A_y = \frac{v^2}{\rho} \quad (10)$$

Además, de forma similar a Imine y Dolcemascolo (2007), se expresó la variación del ángulo de volcamiento por medio de una ecuación diferencial que se obtiene al realizar la suma de los momentos alrededor del centro de rotación de la suspensión, pero ella se realizó considerando solo las cargas que se aplican sobre la masa amortiguada del vehículo. Análogamente a Kamnik, Boettiger y Hunt (2003), para simplificar el modelo no se tomó en cuenta la deformación del chasis, por lo que se supone que el ángulo de volcamiento es constante a lo largo de cada parte del vehículo y se despreció el efecto dinámico de las masas no

amortiguadas dado que éstas son muy pequeñas en comparación con la magnitud de las masas amortiguadas. Además, en el caso de los vehículos articulados no se tomó en cuenta el ángulo que se forma entre el tractocamión y el semirremolque, y no se consideró el eje delantero del tractocamión, ya que normalmente en tales ejes se utiliza una suspensión relativamente suave y el peso que soportan es menor que el de los otros ejes, por lo que las llantas del eje delantero pueden mantenerse adheridas al pavimento cuando se inicia la inestabilidad del vehículo (pp.987-989). Entonces, al hacer tales suposiciones la ecuación del ángulo de volcamiento queda como se muestra en la ecuación 11.

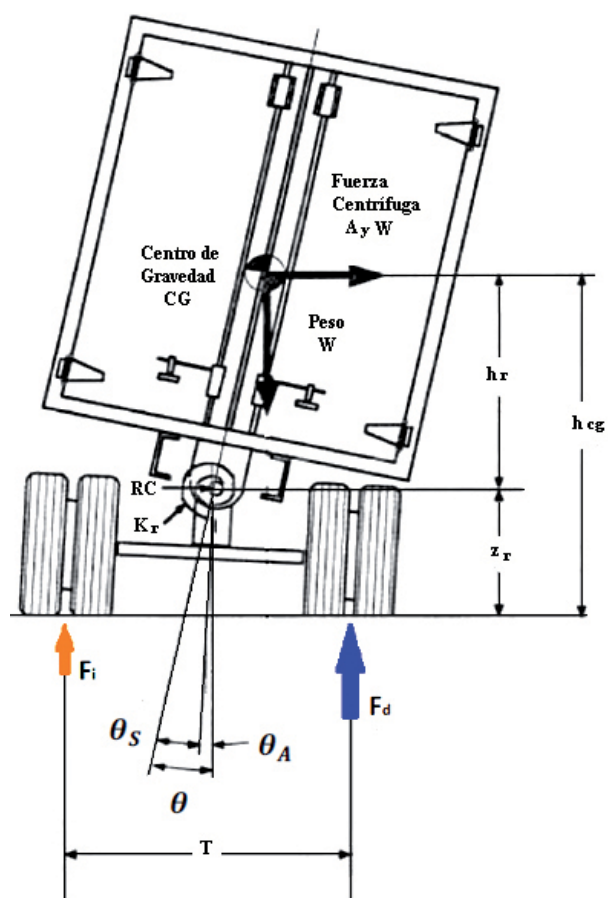
En la ecuación 11  $I_{xx}$  representa el momento de inercia con respecto a un eje longitudinal que pasa por el centro de rotación de la suspensión,  $\theta_s$  es el ángulo de volcamiento,  $m_s$  es la masa amortiguada total (del semirremolque o del camión según sea el caso),  $g$  es la gravedad,  $h_r$  es la altura del centro de gravedad con respecto al centro de rotación de la suspensión (la cual se asumió como la altura promedio entre las suspensiones del eje trasero y el tándem del tractocamión o el eje delantero de un camión unitario según sea el caso),  $\vartheta$  es el ángulo de peralte,  $C_r$  es el amortiguamiento torsional total de la suspensión y  $k_r$  es la rigidez torsional total de la suspensión. Cabe destacar que en el modelo se consideró la variación del ángulo de peralte a lo largo de las curvas y en el caso de las curvas que están diseñadas adecuadamente, o sea, el peralte es tal que se contrarresta en cierta medida la fuerza centrífuga. Por otro lado, se supuso que la suspensión presenta un comportamiento lineal, por lo que el valor de la rigidez torsional se considera constante, simplificación que de acuerdo con Sampson (2000) es válida cuando el sistema se encuentra en un estado transitorio y porque en el caso de las suspensiones de aire, en términos porcentuales, las variaciones producidas por el comportamiento no lineal son muy pequeñas (p.34), suspensiones cuyas características fueron utilizadas para realizar la simulación puesto que su rigidez torsional (salvo en los casos de las suspensiones de aire de alta rigidez) tiende a ser más pequeña que la de las suspensiones hechas de ballestas. Además, en los ejes delanteros de los camiones unitarios se utilizaron las propiedades de las suspensiones típicas de ballestas.

Dado que la ecuación (11) es una ecuación cuya solución analítica es muy difícil de obtener, se supuso que la diferencia entre el ángulo de peralte y el ángulo de volcamiento era tan

pequeña que se pudo realizar la linealización que se presenta en la ecuación 12.

Una vez obtenido el ángulo de volcamiento, se determinó la diferencia entre las cargas laterales entre uno y otro lado del vehículo por medio de la ecuación (13), la cual según Kamnik, Boettiger y Hunt (2003) es válida para cada uno de los ejes (p.990). Esta ecuación se obtiene al realizar la suma de los momentos de las fuerzas que actúan sobre las masas no amortiguadas, pero la suma de momentos se realiza alrededor del punto medio del vehículo a nivel del suelo, lo que permite obviar el efecto de las fuerzas de fricción laterales. Además, para simplificar el modelo no se consideraron las deformaciones verticales ni laterales que sufren las llantas.

Figura 1. Transferencia de la carga lateral / Aquí la flecha anaranjada indica el peso que se va perdiendo del lado izquierdo, mientras que la flecha azul muestra el peso que se va recargando del lado derecho, lo cual se debe al efecto de la fuerza centrífuga. Nótese que tal movimiento se realiza principalmente a partir del centro de rotación de la suspensión (RC). Modificada de "A factbook of the mechanical properties of the components of single units and articulated heavy trucks," por Fancher, Ervin, Winkler y Gillespie, 1986, p.55.



$$(11) \quad I_{xx} \cdot \ddot{\theta}_s = m_s \cdot g \cdot h_r \cdot \sin(\theta_s + \vartheta) + m_s \cdot A_y \cdot h_r \cdot \cos(\theta_s + \vartheta) - C_r \cdot \dot{\theta}_s - k_r \cdot \theta_s$$

$$(12) \quad I_{xx} \cdot \ddot{\theta}_s = m_s \cdot g \cdot h_r \cdot (\theta_s + \vartheta) + m_s \cdot A_y \cdot h_r - C_r \cdot \dot{\theta}_s - k_r \cdot \theta_s$$

Tabla 2. Propiedades inerciales de los camiones unitarios C2 y C3

PROPIEDAD VEHÍCULO	VALOR	
	C2	C3
Masa amortiguadora total (kg)	13.483	19.426
Altura del centro de gravedad con respecto al suelo (m)	2.12	2.26
Ancho (m)	2.60	2.60
Masa amortiguadora en eje frontal (kg)	4.526	5.013
Masa amortiguadora en el tandem (kg)	8.956	14.412
Momento de inercia rotacional con respecto al centro de gravedad (kg m <sup>2</sup> )	19.483	28.253

Las propiedades inerciales de los camiones unitarios C2 y C3 fueron calculadas a partir de la información del camión unitario de tres ejes utilizado por Fancher y otros (1986, pp.163-183) y por Fancher y Mathew (1987, pp.58-59). Posteriormente se realizó el cálculo de la carga útil que el vehículo puede transportar de manera que cumpla con las normas de pesos y dimensiones de Costa Rica; y finalmente, se asumió que la carga está uniformemente distribuida a lo largo y ancho del cajón.

$$(F_{z,d} - F_{z,i}) \cdot \frac{T}{2} = k_{r,e} \cdot \theta_s - m_{s,e} \cdot z_{r,e} \cdot A_y \cdot \cos\theta + m_{s,e} \cdot g \cdot z_{r,e} \cdot \sin\theta \quad (13)$$

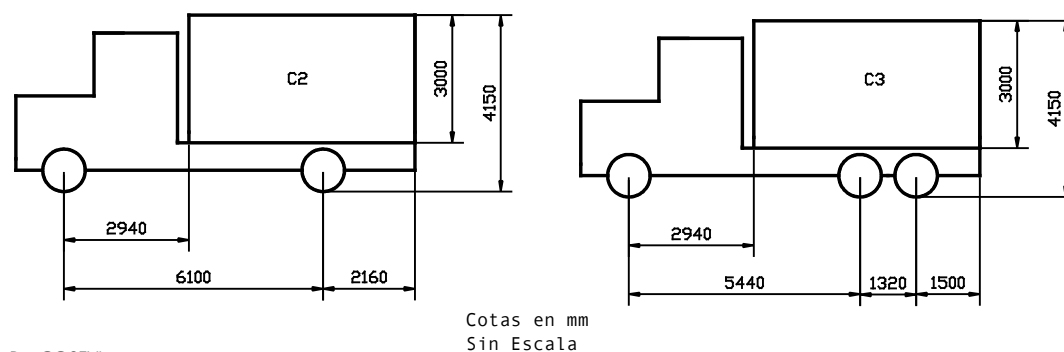
Cabe destacar que este método difiere del utilizado por Kamnil, Boettiger y Hunt por el hecho de que en la ecuación se incorporó el ángulo del peralte y porque ellos utilizaron otro conjunto de ecuaciones para diseñar controladores, lo cual no era el objetivo de este análisis. En la ecuación (13)  $F_{z,d}$  y  $F_{z,i}$  representan las fuerzas verticales aplicadas en las llantas del lado derecho e izquierdo respectivamente,  $T$  es la separación entre las llantas,  $k_{r,e}$  es la rigidez torsional de la suspensión de cada eje,  $m_{s,e}$  es la masa amortiguada soportada por cada eje y  $z_{r,e}$  es la altura del

centro de rotación de la suspensión con respecto al suelo de cada uno de los ejes (ver figura 1).

Por último, al determinar la diferencia entre las fuerzas verticales aplicadas en cada llanta de los ejes, el CTCL se calculó por medio de la ecuación (XIV), donde  $F_{T,e}$  es la fuerza total soportada por cada uno de ellos.

$$CTCL = \frac{|F_{z,d} - F_{z,i}|}{F_{T,e}} \quad (14)$$

Figura 2. Dimensiones de los camiones unitarios utilizados en el modelo

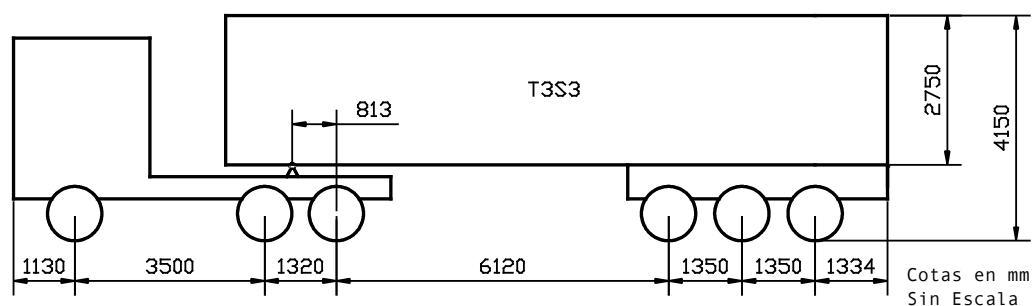


Por COSEVI.

Los tipos de camiones que fueron sometidos a objeto de estudio fueron los T3S3, C2 y C3, y se supuso ellos que poseían un cajón rectangular para transportar la carga, permitiendo así facilitar el análisis. En todos los casos se asumió que la altura del camión era de 4.15 m, la cual según el artículo 9 del Reglamento de circulación por carretera con base en el peso y las dimensiones de

los vehículos de carga pesada, es la altura máxima permitida para los vehículos de carga en Costa Rica. También, para efectos de simplificar el modelo se supuso que la carga estaba uniformemente distribuida a lo largo, alto y ancho del cajón de los vehículos, permitiendo así obtener centros de gravedad altos en cada uno de los camiones, haciéndolos más propensos a volcarse.

Figura 3. Dimensiones del camión T3S3



Por COSEVI.

Tabla 3. Propiedades inerciales del camión unitario T3S3

PROPIEDAD	VALOR
Masa amortiguada de semirremolque junto con la carga útil (kg)	32.600
Masa amortiguada del tractocamión (kg)	6.400
Altura del centro de gravedad del semirremolque con respecto al suelo (m)	2.49
Altura del centro de gravedad del tractocamión con respecto al suelo (m)	1.30
Ancho total	2.60
Masa no amortiguada en el eje frontal (kg)	600
Masa no amortiguada en el eje tándem (kg)	2.000
Masa no amortiguada en el eje trídem (kg)	27.846
Momento de inercia rotacional del tractocamión con respecto a su centro de gravedad (kg m <sup>2</sup> )	8.133

Las propiedades del vehículo fueron aportadas por el grupo de ARRB. En este caso se supuso que la carga útil está uniformemente distribuida a lo largo y ancho del contenedor.

Tabla 4. Propiedades de la suspensión de los vehículos utilizadas para las simulaciones

PROPIEDAD TIPO DE VEHÍCULO	EJE FRONTAL	SEGUNDO EJE			TERCER EJE
	C2, C3 y T3S3	C2	C3	T3S3	T3S3
Tipo de eje	Simple	Simple	Tándem	Tándem	Trídem
Tipo de suspensión	Suspensión típica de resortes	Suspensión de aire típica	Suspensión de aire típica	Suspensión de aire típica	Suspensión de aire típica
Altura del centro de rotación con respecto al eje de las llantas (m)	0.10	0.190	0.190	0.187	0.19
Rigidez rotacional (Nm/deg)	3.720	13,261	26.523	11.124	39.784
Amortiguamiento rotacional (Ns/m)	5.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Espaciamiento entre los resortes (m)	0.425	0.916	0.916	0.916	0.916
Separación entre las llantas (m)	2.03	1.83	1.83	1.83	1.83

\* Nótese que aquí la altura del centro de rotación de la suspensión está referida con respecto a la altura del eje de las llantas, la cual, basándose en mediciones del diámetro de las llantas realizadas en algunos camiones de varias empresas transportistas, se asumió que es de 0.52 m en todos los casos. Los valores de las propiedades inerciales de las suspensiones fueron recomendados por la ARRB.



## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### A. Problemas de maniobrabilidad

De acuerdo a la ubicación geográfica de los accidentes de tránsito con vehículos de carga pesada, las rotondas fueron puntos en los que se tuvieron concentraciones de colisiones laterales en el mismo sentido y colisiones de costado. Uno de los problemas es que cuando los vehículos de carga pesada circulan por ellas, en ocasiones tales camiones tienden a ocupar más de un carril, y el riesgo de colisiones se puede incrementar debido a que en algunas rotondas se presentaron deficiencias de demarcación.

Actualmente algunas rotondas se diseñan con una superficie de ruedo, hecha especialmente para la circulación de los ejes posteriores de los vehículos de carga pesada (ver figura 4). Esto ayuda a evitar que los vehículos de carga pesada tengan que ocupar más de un carril cuando transitan por el carril interno de las mismas, reduciendo así el riesgo de que se produzcan colisiones laterales con ellos. Cabe destacar que dicha superficie de ruedo debe estar diseñada con materiales que permitan diferenciarla fácilmente y que desincentiven a los conductores de otros vehículos a circular sobre ella. Al comparar este tipo de rotondas con las rotondas ubicadas en las rutas en estudio se puede apreciar que debido que la rotonda de Las Garantías Sociales, la de la Y Griega,

Figura 4. Ronda con superficie de ruedo



Rotonda con una superficie de ruedo para las llantas del eje trasero de los vehículos de carga pesada. Modificada "de How to drive a roundabout, Derechos Reservados 2013, por the Washington State Department of Transportation, Washington. Usada con permiso."

Figura 5. Ejemplo de Rotondas en San José.



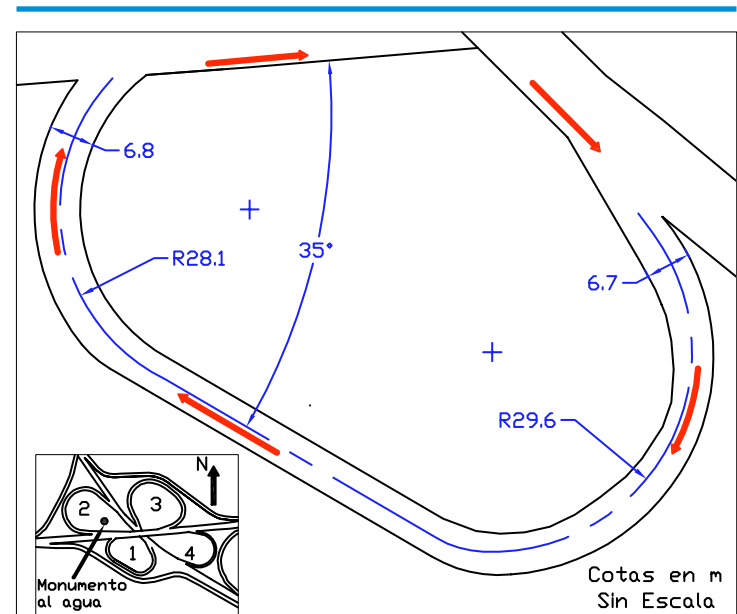
Esta figura muestra como en la rotonda de Paso Ancho (1) posee espacio en su isla central que se podría aprovechar para incorporar una superficie de ruedo especialmente hecha para la circulación de los ejes posteriores de los vehículos de carga pesada. Por el contrario, rotonda del puente Juan Pablo II (2), posee elementos en su isla central que imposibilita la construcción de tal superficie de ruedo. Por COSEVI.

la de Paso Ancho y la de Alajuelita, poseen un islote central libre de ciertos obstáculos, podría evaluarse la posibilidad de incorporar en ellas superficies de ruedo para la circulación de las llantas traseras de los vehículos de carga pesada. Por el contrario, el islote central de la rotonda de San Sebastián y de la rotonda Juan Pablo II posee elementos estructurales que imposibilita la implementación de tales superficies. En la figura 5 se puede apreciar un par de ejemplos de las rotondas aquí mencionadas.

Además de analizar las rotondas, también se llevó a cabo el análisis de la rampa 1 del intercambio que comunica la carretera General Cañas con la Circunvalación, cuyas dimensiones aproximadas se pueden apreciar en la figura 6. Por varios motivos esta rampa de acceso no está adecuada para la circulación de los vehículos de carga pesada. Primero, a pesar de que ella tiene suficiente espacio para permitir que se generen 2 carriles, esto se convierte en un peligro, puesto que se pueden dar colisiones laterales ya que los vehículos de carga pesada largos deben abarcar ambos carriles al dejarla. Segundo, ella no permite que el eje trasero de los vehículos largos pueda seguir una curva cerrada por lo que éstos no solo deben ocupar ambos carriles, si no que en ocasiones caen dentro del caño, provocando presas de vehículos y daños a la infraestructura también. Tercero, ella no permite que los vehículos ingresen de forma tangencial a la autopista lo que también aumenta el riesgo de que se presenten colisiones de costado y puede producir congestionamientos. Algunos ejemplos de estos problemas se pueden apreciar en las figura 7.

En la figura 8 se muestra una plantilla de diseño para rampas de acceso, basada en vehículos articulados de 21 m de longitud, la cual está hecha de forma que se eviten todos los problemas antes señalados. Cabe destacar que dicha curva se generó a partir de varios radios, en la que el radio máximo es cercano a los 14 m, el cual es 2 veces menor al radio central de la curva mostrada en la figura 6.

Figura 6. Rampa de acceso 1.



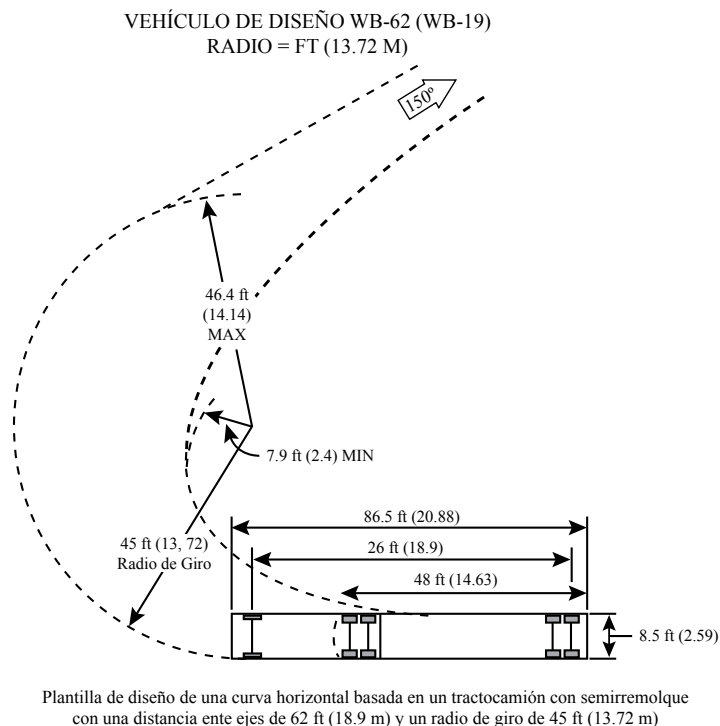
Medidas aproximadas de la rampa 1. Por conveniencia en esta figura se muestra el ángulo agudo de  $35^\circ$ , pero el ángulo que se utiliza como referencia para efectos del análisis geométrico es el suplementario, el cual tiene un valor de  $145^\circ$ . Este plano no está a escala. Por COSEVI.

Figura 7. Ancho de carril de una de la rampa 1



En esta figura se aprecia un camión articulado, con una longitud que ronda entre los 18 m y los 21 m, circulando por la rampa de acceso 1, rampa cuya geometría produce ciertos problemas de maniobrabilidad. Aquí se puede observar que el sobreancho de la curva es tal que se presta para que se formen 2 carriles de circulación, produciendo el riesgo de que ocurran colisiones laterales. Por COSEVI.

Figura 8. Plantilla de diseño para curvas horizontales



Esta figura muestra una plantilla de diseño de una curva horizontal con un ángulo agudo de 30° (su ángulo suplementario es de 150°), por la que algunos vehículos articulados de aproximadamente 21 m pueden circular sin dificultad. Modificado "de A policy on geometric design of highways and streets, Derechos Reservados 2011, por the American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. Usada con permiso." Traducido por Carlos Roberto Gúémez Shedden.

## B. Distancias de visibilidad y de frenado

En varias zonas de la carretera General Cañas y de la Circunvalación se presentaron principalmente colisiones por detrás, por lo cual se decidió llevar a cabo el análisis de las distancias de frenado en algunos puntos, pero en ninguna zona se tuvieron conflictos con las distancias de visibilidad y de frenado, como se aprecia en la tabla 5. Ni siquiera hubo problemas en una zona ubicada en la carretera General Cañas, cerca del hotel San José Palacio, en donde inicialmente se creyó que la visibilidad era insuficiente, puesto que ella se ve en cierto modo restringida por la estructura de un puente, por lo que la altura de los ojos de los conductores deja de tener un papel importante (ver figura 9). Además, cabe destacar que el hecho de que las distancias de frenado bajo condiciones normales nunca superó la distancia de visibilidad, también implica que por cuestiones de diseño vial, no debería inducirse a los conductores de los vehículos de carga pesada a aplicar los frenos de forma tan severa que ocurra el deslizamiento.

A causa de que no se presentaron conflictos entre la distancia de visibilidad y la distancia de frenado, los accidentes que se registraron pudieron haber sucedido por otros motivos, como por ejemplo algunos de los vehículos pudieron circular sobrecargados comprometiendo así la capacidad de frenado de los sistemas de frenos, que de algunos otros las llantas se encontraban en mal estado o que los frenos estaban mal ajustados, ya que algunos sistemas de frenos poseen un ajustador de holgura manual y puede ser que en ocasiones los vehículos anden con los frenos desajustados. En las regulaciones en carretera que se realizan en algunos otros países no solo se verifica el estado de las llantas y el peso que transportan los vehículos de carga pesada, sino que las autoridades también revisan que los frenos estén bien ajustados, aspecto que no se toma en cuenta en las inspecciones en carretera aquí en Costa Rica. Entonces, puede ser que sea necesario establecer controles más minuciosos sobre el estado de las llantas y el peso que transportan los vehículos de carga pesada, y también se deberían establecer procedimientos para que los oficiales verifiquen el ajuste de los sistemas sus sistemas de frenos.

Los aspectos antes mencionados no son los únicos que pueden influir en la cantidad de colisiones entre vehículos en las que se ven involucrados los vehículos de carga pesada, sino que hay dos aspectos más a considerar, los cuales están asociados a las distancias de frenado bajo condiciones de emergencia. Como se puede observar en la tabla 6, las distancias de frenado de emergencia de los vehículos de carga pesada pueden alcanzar valores que oscilan entre 57 y los 68 m, bajo las condiciones estudiadas. El primer aspecto es el diseño y el estado de algunos elementos de las carreteras. En algunos sectores, el diseño de las carreteras y el estado de algunos de sus elementos puede promover que los conductores de otros vehículos se interpongan súbitamente en el camino de los vehículos de carga pesada, como se aprecia en la figura 10, pudiendo provocar situaciones en las que los conductores deben frenar de emergencia. El segundo aspecto es que no existen normativas que regulen la distancia de separación que debe existir entre los vehículos de carga pesada con respecto al vehículo que circula delante de ellos, por lo que los conductores de los vehículos de carga pesada pueden acercarse peligrosamente al vehículo que los antecede, o los conductores de otros vehículos pueden interponerse de forma peligrosa cuando realizan maniobras de adelantamiento, por lo que puede ser necesario establecer controles que permitan regular la distancia de separación entre los vehículos.

**Tabla 5. Cuadro comparativo entre las distancias de frenado de los vehículos de carga pesada y las distancias de visibilidad de los vehículos livianos en diversos puntos de las rutas estudiadas**

RUTA - KILÓMETRO	SECTOR	PERCENTIL 85 DE LA VELOCIDAD (km/h)	COEFICIENTE DE FRICCIÓN PROMEDIO	DISTANCIA DE VISIBILIDAD (m)	**DISTANCIA DE FRENADO POR TIPO DE VEHÍCULO, SUPONIENDO QUE OCURREN DESLIZAMIENTOS		***DISTANCIA DE FRENADO BAJO CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN
					UNITARIO ARTICULADO	UNITARIOS Y ARTICULADOS	
39-7	Cruce de Hatillo 4 (sentido Z-U)	74.7	0.66	D > 250	96	99	124
39-7	Cruce de Hatillo 4 (sentido U-Z)	66.9	0.56	D > 164	86	89	93
39-6	Cruce de Hatillo 6 (sentido Z-U)	66.0	0.59	D > 342	85	87	92
39-6	Cruce de Hatillo 6 (sentido U-Z)	68.3	0.59	D > 365	87	90	96
39-5	Ingreso desde la radial a Alajuelita (sentido Z-U)	70.7	0.59	D > 223	91	93	97
39-5	Ingreso desde la radial a Alajuelita (sentido U-Z)	69.3	0.59	D > 176	89	93	104
39-5	Cruce de Hatillo 8 (sentido Z-U)	70.7	0.59	D > 530	92	95	105
1-5	Denny´s (sentido SJ-A)	67.7	*0.59	D > 165	89	89	95
1-5	2da entrada desde la ruta 39 (sentido A-SJ)	68.9	*0.59	D = 120	88	90	93

En todos los cálculos se supuso que el tiempo de percepción y reacción de los conductores fue de 2.5 s.

\*No se disponían mediciones los coeficientes de fricción del kilómetro 5 de la ruta 1, por lo que se asumió que su valor era equivalente al valor promedio de los coeficientes de fricción de toda la ruta.

\*\*Estas distancias de frenado se calcularon tomando en cuenta los tiempos de reacción de los sistemas de frenos y que en algún momento sucedió el deslizamiento.

\*\*\*En esta tabla las distancias de frenado bajo condiciones normales de operación fueron calculadas utilizando la aceleración que adquieren los vehículos de carga cuando viajan en pendientes, junto con la desaceleración que deben impartir sus sistemas de frenos, la cual se calculó a partir de una distancia de frenado de 67 m cuando viajan a 80 km/h, como lo estipula el inciso 5 del Reglamento técnico para la realización de estudios de conversión y/o modificación de los vehículos de carga.

El sentido Z-U significa Zapote-Uruca y viceversa.

El sentido A-SJ significa Alajuela-San José y viceversa.

Por COSEVI.

Figura 9. Obstrucción de la visibilidad a causa de la estructura de un puente



En este punto de la carretera General Cañas la estructura del puente y la forma de la curvatura obstruyen la visibilidad, por lo que la altura del ojo del conductor deja de ser un factor importante a la hora de determinar la distancia de visibilidad. Por COSEVI.

Tabla 6. Distancias de frenado de emergencia de los vehículos de carga pesada

RUTA	KILÓMETRO	SECTOR	PERCENTIL 85 DE LA VELOCIDAD (km/h)	COEFICIENTE DE FRICCIÓN PROMEDIO	TIPO DE VEHÍCULO DE CARGA	
					UNITARIO	ARTICULADO
39	7	Cruce de Hatillo 4 (sentido Z-U)	74.7	0.66	64	68
39	7	Cruce de Hatillo 4 (sentido U-Z)	66.9	0.56	58	61
39	6	Cruce de Hatillo 6 (sentido Z-U)	66.0	0.59	57	60
39	6	Cruce de Hatillo 6 (sentido U-Z)	68.3	0.59	59	61
39	5	Ingreso desde la radial a Alajuelita (sentido Z-U)	70.7	0.59	61	64
39	5	Ingreso desde la radial a Alajuelita (sentido U-Z)	69.3	0.59	61	64
39	5	Cruce de Hatillo 8 (sentido Z-U)	70.7	0.59	62	65
1	5	Denny´s (sentido SJ-A)	67.7	*0.59	58	61
1	5	2da entrada desde la ruta 39 (sentido A-SJ)	68.9	*0.59	59	62

Esta tabla es un resumen de los cálculos de las distancias de frenado de emergencia.

\*No se disponían mediciones de los coeficientes de fricción del kilómetro 5 de la ruta 1, por lo que se asumió que su valor era equivalente al valor promedio de los coeficientes de fricción de toda la ruta.

Figura 10. Ejemplos de defectos de diseño que pueden aumentar las posibilidades de que los conductores realicen frenados de emergencia.



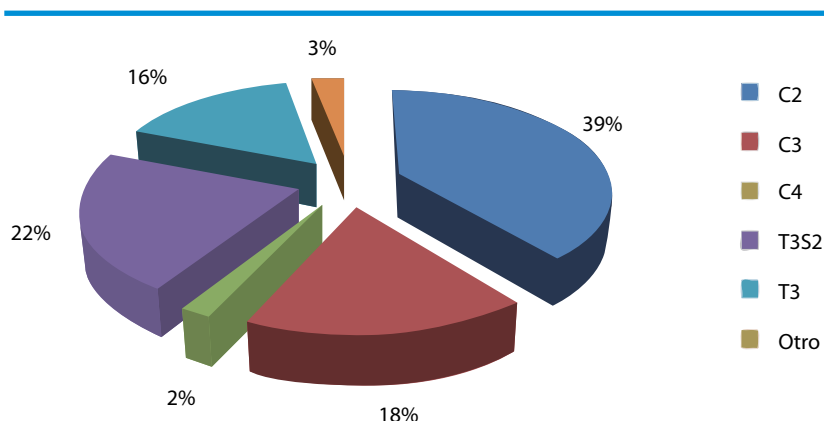
Intersección de Hatillo 4 (sentido Zapote – Uruca). Esta figura muestra como la cantidad de carriles de la calle se reduce a 2, a causa de que la base del puente peatonal está colocada prácticamente en el tercer carril, cerca de la rampa de acceso de los vehículos a la carretera. Este tipo de defectos de diseño vial puede aumentar las probabilidades de que se den colisiones entre vehículos. Por COSEVI.

### C. Estabilidad

Entre los accidentes con víctimas de los vehículos de carga pesada se encontraron tres volcamientos, los cuales sucedieron todos en las curvas ubicadas entre los kilómetros 3 y 4 de la carretera General Cañas, accidentes en los que participaron un camión C2, un C3 y un T3S2, los cuales son los tipos de vehículos de carga que se encontraron con mayor frecuencia en los accidentes de tránsito (ver gráfico 2). Debido a ello se decidió evaluar la estabilidad de algunos de los vehículos de carga pesada que circulan por dicha carretera; sin embargo, también se realizó el análisis en algunas

de las curvas de la Circunvalación, a fin de tener un parámetro de comparación. Como se puede apreciar en la tabla 7, la curva N° 1, que se ubica en el kilómetro 6 de la Circunvalación es la que podría presentar las peores condiciones de estabilidad puesto que ella tiene el radio de curvatura más pequeño, se asumió que la velocidad de circulación es mayor en dicha zona y el peralte promedio es menor, por lo que ella fue seleccionada como parámetro de comparación (la ubicación geográfica de las diferentes curvas se puede apreciar en el mapa 1).

Gráfico 2. Distribución porcentual de las configuraciones de los vehículos de carga involucrados en los accidentes de tránsito con víctimas en el cantón de San José.

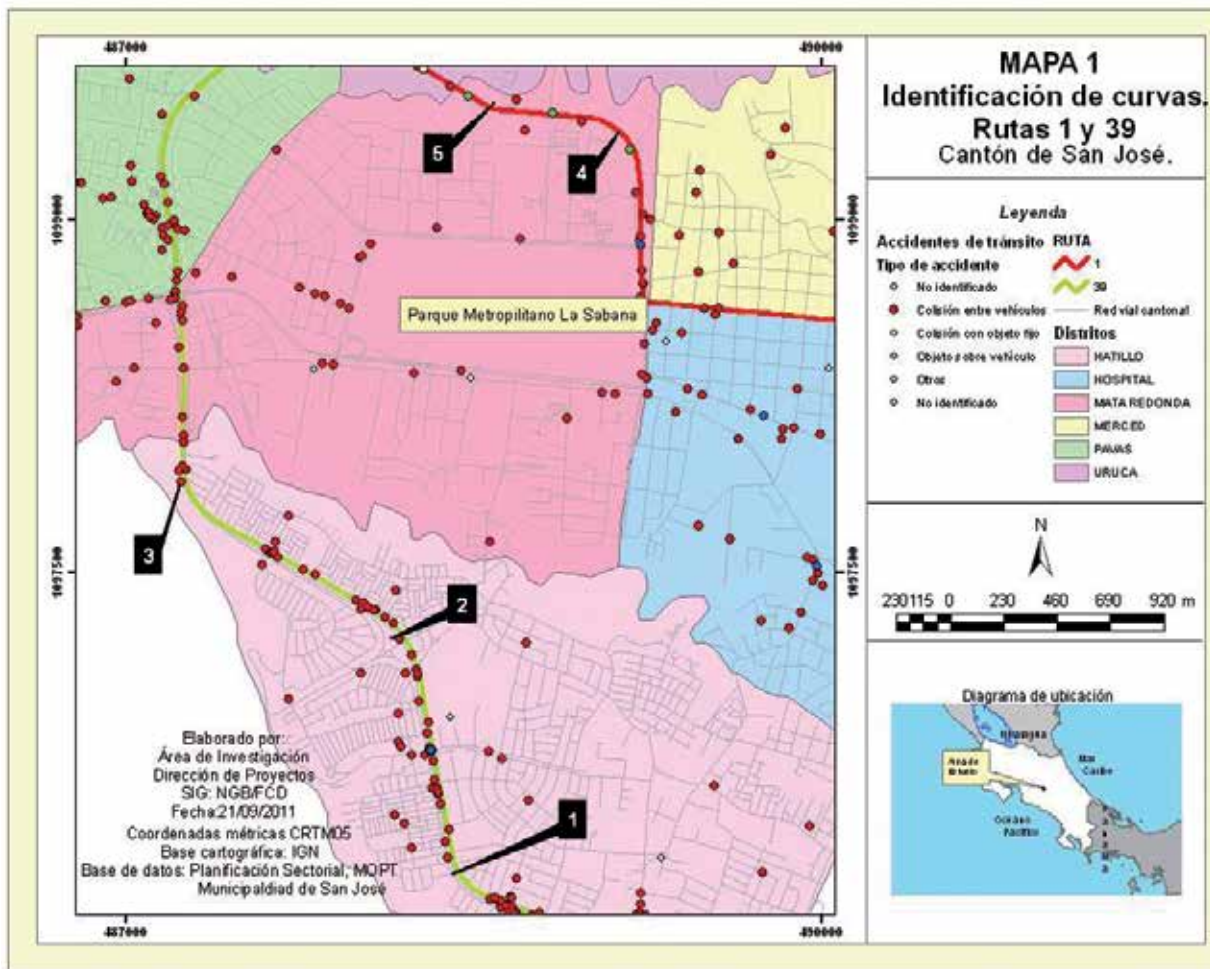


De la base de datos de accidentes del COSEVI y la información de las tarjetas de circulación y los diagramas de pesos y dimensiones suministrada por el Departamento de Pesos y Dimensiones

Tabla 7. Características de las curvas analizadas.

CURVA N°	RADIO MÍNIMO (m)	PERALTE PROMEDIO (°)	PERCENTIL 85 DE LA VELOCIDAD (km/h)	VELOCIDAD MÁXIMA OBSERVADA EN LOS VEHÍCULOS DE CARGA PESADA (km/h)
1	243	2.59	74.7	62
2	294	3.93	70.7	55
3	295	3.42	70.7	55
4	245	6.64	70.3	61
5	341	3.10	70.3	61

La ubicación geográfica de las curvas se puede apreciar en el mapa 1.  
El radio mínimo de curvatura corresponde al arco circular que atraviesa la mitad del carril con el radio mínimo.  
Hecha por COSEVI, con base en los datos de las características geométricas de las curvas, aportadas por el Departamento de Diseño Geométrico del MOPT.

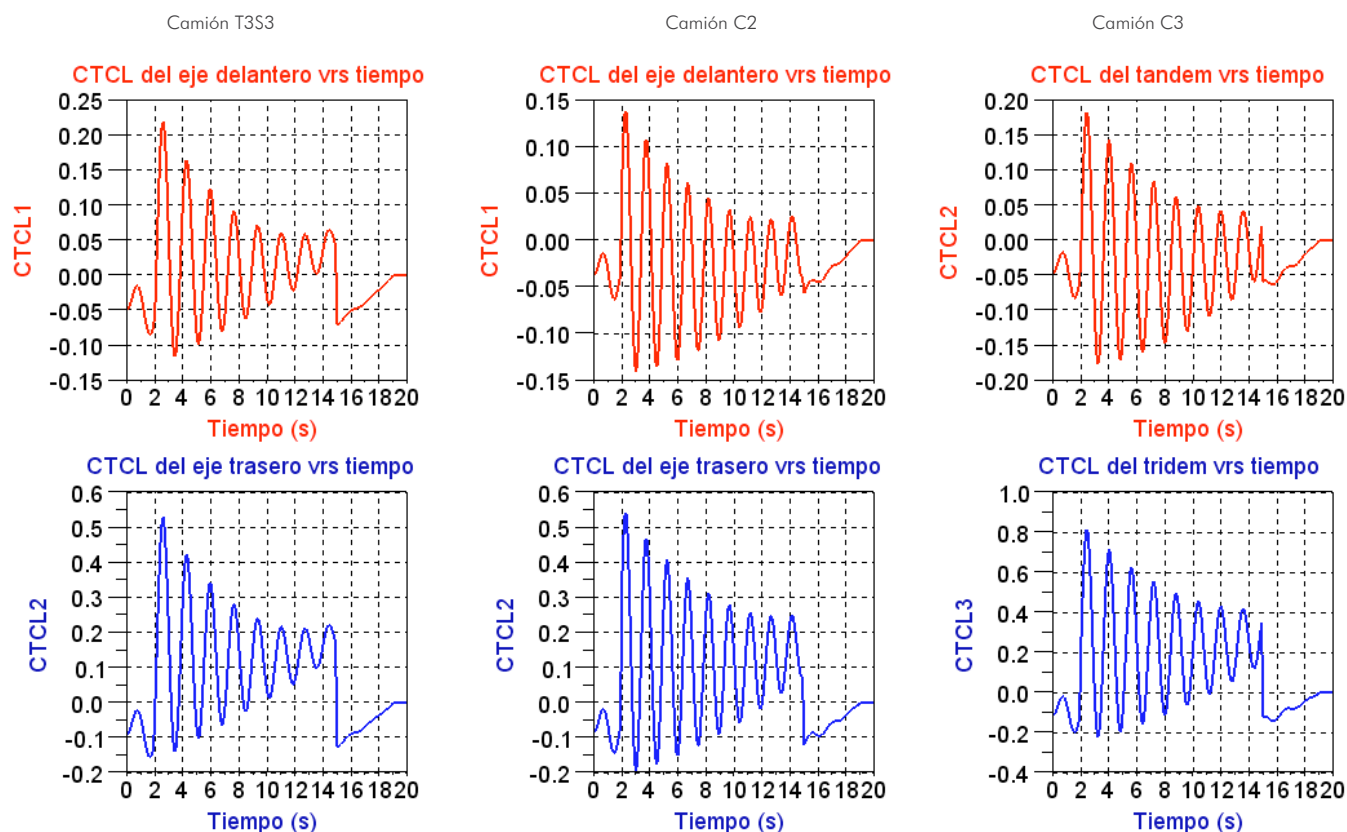


Al aplicar el modelo, el volcamiento de los vehículos se presentó de forma oscilatoria (ver figura 11). Nótese que el CTCL tendió a subir súbitamente y luego buscó estabilizarse reduciendo su valor. Es posible que dicho comportamiento no suceda exactamente de esa manera puesto que en este modelo no se tomaron en consideración las fuerzas laterales que se aplican sobre las llantas cuando un vehículo viaja sobre una trayectoria curva, no se consideró el ángulo de giro de la manivela y tampoco se incluyó el ángulo que forma el cabezal con respecto al remolque, en el caso de los vehículos articulados, por lo que la fuerza centrífuga se aplicó súbitamente una vez que los vehículos ingresaron a la curva, produciendo dicho incremento del CTCL. Tal vez si se hubieran considerado todos los factores antes mencionados, se hubiera podido modelar la aplicación de la aceleración lateral del vehículo de forma incremental, aminorando el efecto que la fuerza centrífuga ejerce sobre el vehículo, teniendo así resultados más realistas, por lo que hace falta comparar los resultados del modelo con una simulación por computadora o con mediciones de campo para verificar la veracidad de los resultados. A pesar de eso, sí se puede suponer que los resultados son conservadores

puesto que la forma en que se aplicó la fuerza lateral hace que el cambio del CTCL sea muy abrupto. Además, al analizar los picos obtenidos al correr la simulación se puede observar que en ningún momento el CTCL alcanzó el valor de 1 que es el requisito para que los vehículos estén próximos a volcarse (como lo muestra la tabla 8), por lo que se puede concluir que los vehículos modelados no presentan problemas de estabilidad asociados al diseño de las curvas y a la velocidad de conducción asumida.

A pesar de que el modelo puede producir resultados del CTCL más elevados de lo que en realidad sucedería, los vehículos modelados no presentaron problemas de estabilidad en la curva N° 1 (como se aprecia en la tabla 8), la cual es la curva que presentaba las peores características geométricas y en la que se supuso que la velocidad de conducción era mayor. Por lo tanto, en las demás curvas los vehículos tampoco presentaron problemas de estabilidad. Entonces, los vuelcos ocurridos en la carretera General Cañas pudieron haber sucedido por otros factores tales como un mal acomodo de la carga que puede producir un desbalance del vehículo, o transportar una carga que se mantiene oscilando,

Figura 11. Resultados del modelado del ángulo de volcamiento y del CTCL de un camión T3S3, C2 y C3 circulando por la curva N° 1.



Esta figura muestra los resultados del modelado del ángulo de volcamiento y del CTCL de los camiones T3S3, C3 y C2 descritos anteriormente, suponiendo que circulan por la curva N° 1 ubicada en la Circunvalación. Estas curvas se generaron considerando la variación del ángulo del peralte; no obstante, no fueron consideradas las fuerzas laterales aplicadas en las llantas. Por COSEVI.

reduciendo su estabilidad. Sin embargo surge la interrogante ¿porqué en la carretera General Cañas ocurrieron vuelcos y en la Circunvalación no, siendo la última la que presenta la curva en la cual los vehículos presentan mayor tendencia a volcarse? Es posible que en los vuelcos en la carretera General Cañas hayan sucedido como consecuencia de la realización de maniobras evasivas en conjunto con el exceso de velocidad para tales condiciones, ya que, como se aprecia en la figura 12 las características geométricas de esta carretera pueden generar condiciones en las que los conductores se sienten más confiados a conducir más rápido, pero en algunos puntos cerca de las curvas se encuentran accesos a la pista en los que deberían haber señales de “CEDA EL PASO” para regular el ingreso de los vehículos a ella o tales señales simplemente presentan poca visibilidad, pero en algunos tramos de ciertos carriles también se producen embotellamientos, lo cual podría generar condiciones en las cuales los conductores deban realizar maniobras evasivas, perdiendo así el control del vehículo, o tales circunstancias también pueden promover que los conductores deban realizar maniobras de adelantamiento peligrosas, nuevamente provocando

Tabla 8. CTCL de diferentes vehículos de carga pesada

CONFIGURACIÓN	MASA TOTAL (Kg)	CTCL MÁXIMO		
		EJE 1	EJE 2	EJE 2
T3S3	44.000	-	0.17	0.80
C3	22.057	0.14	0.55	-
C2	15.069	0.22	0.53	-

Los resultados aquí mostrados corresponden a los valores del CTCL de unos ejemplos de vehículos de carga pesada, cuando son conducidos a través de la curva No.1. Por COSEVI.

que se deba incurrir en maniobras evasivas. Por el contrario, antes de ingresar a la curva N° 1, ubicada sobre la Circunvalación, se encuentran elementos viales como semáforos e intersecciones, que más bien promueven que los conductores desaceleren, por lo que posiblemente la velocidad de circulación de los vehículos por tales curvas puede ser menor y también tales elementos pueden hacer que los conductores sean más cautelosos al realizar maniobras de adelantamiento (ver figura 13).



Figura 12. Características de la carretera General Cañas.



En esta figura se aprecia como la geometría de la carretera General Cañas puede incentivar a los conductores a viajar rápido, pero en ciertas zonas se presentan accesos que no poseen señalización o ella está en mal estado, accesos que en ocasiones se encuentran cerca de las curvas. Estas características pueden motivar a algunos conductores a realizar adelantamientos o realizar otras acciones que pueden provocar que los conductores de los vehículos de carga pesada deban realizar maniobras evasivas. Por COSEVI.

Figura 13. Características de las cercanías a la curva N° 1, en la Circunvalación.



En esta figura se muestra que en la entrada de la curva N° 1, en la Circunvalación, se encuentran ciertos elementos viales que incentivan a los conductores a reducir la velocidad, tales como los semáforos y la intersección. Por COSEVI.

## CONCLUSIONES

Al analizar diversos aspectos asociados al comportamiento de algunos de los vehículos de carga pesada permitidos, se puede ver que sí existen problemas de seguridad vial asociados a sus características y a la geometría de la carretera. En primera instancia, los ejemplos de los problemas de maniobrabilidad revelan que el diseño de las carreteras en algunas zonas no es adecuado para su circulación, puesto que no facilita que tales vehículos puedan acomodarse convenientemente cuando circulan por las rotondas o algunas de las rampas de acceso a las carreteras. Por el contrario, no se hallaron conflictos entre las distancias de frenado y la distancia de visibilidad. Como las colisiones entre vehículos no fueron producto de conflictos con las distancias de visibilidad y las distancias de frenado, ellas pudieron haber sido provocadas por otros factores como el mal estado de las llantas, mal ajuste del sistemas de frenos, sobrepeso y cercanía de los vehículos cuando transitan por las carreteras, lo

cual evidencia que hace falta establecer o reforzar las políticas y controles en carretera que busquen regular tales aspectos. Por último, no deberían presentarse problemas de estabilidad cuando vehículos similares o más estables a los modelados aquí circulan por los tramos curvos de las carreteras estudiadas, por lo que posiblemente los volcamientos registrados fueron producidos por la influencia de otros factores o por la realización de maniobras evasivas que podrían haber sido inducidas por las mismas características de las carreteras.

## RECOMENDACIONES

Los estudios del comportamiento dinámico no solo sirven para evaluar problemas de seguridad vial asociados a la conducción de los vehículos de carga pesada, sino que también se pueden aplicar para evaluar si es posible aumentar la altura máxima de aquellos vehículos que son utilizados para transportar productos de baja densidad, o para establecer clasificaciones de rutas para

determinar por donde pueden circular ciertos tipos de vehículos, o los puntos en los que se deberían realizar modificaciones viales para asegurar que sean conducidos de forma segura. Inclusive se podrían realizar estudios para evaluar si es factible implementar el uso de autobuses articulados en ciertos sectores. No obstante para ello se hace necesario incorporar en las normas de pesos y dimensiones aspectos asociados al comportamiento dinámico de los vehículos de carga pesada, tales como la amplificación de aceleración lateral y el umbral de volcadura, por lo que se recomienda realizar estudios pertinentes que permitan establecer tales normativas.

También se recomienda evaluar la posibilidad de modificar la forma de la rampa 1 (ver figura 6) de forma que se permita que los vehículos de carga pesada de 21 m o más puedan circular

adecuadamente por ella, como lo indica la plantilla de diseño mostrada en la figura 8.

Además se recomienda evaluar la posibilidad de establecer controles en carretera para regular el ajuste de los frenos de los vehículos de carga pesada. Así mismo, se recomienda reforzar los controles sobre el peso de los vehículos y el estado de sus llantas.

En el caso de las rotondas se recomienda evaluar la posibilidad de implementar superficies de rueda especialmente diseñadas para la circulación de los ejes traseros de los vehículos de carga pesada en el islote central de rotonda de las Garantías Sociales, en la de la Y Griega, en la de Paso Ancho y en la de Alajuelita.

Por último, se recomienda llevar a cabo la validación del modelo utilizado para estimar el CTCL, ya sea comparando los resultados con simulaciones o realizando experimentos para ello.

## REFERENCIAS

Acuerdo Centroamericano Sobre la Circulación por Carretera. (1949).

Air Brake Systems, 49 C.F.R. §571 (2012).

Arce, H. (s.f). Consideraciones sobre la normativa de pesos y dimensiones para vehículos y transporte de carga en Costa Rica. Recuperado el 26-04-2011 de [http://www.mopt.go.cr/planificacion/centrotransferencia/RTM\\_06/Pesos%20y%20Dimensiones.pdf](http://www.mopt.go.cr/planificacion/centrotransferencia/RTM_06/Pesos%20y%20Dimensiones.pdf)

Bendix Spicer Foundation Brake LLC. (2012). The federal stopping distance mandate: Impact and solutions. Recuperado el 28-06-2012 de [http://www.foundationbrakes.com/media/documents/The\\_Federal\\_Reduced\\_Stopping\\_Distance\\_Mandate\\_Impact\\_and\\_Solutions\\_March2012.pdf](http://www.foundationbrakes.com/media/documents/The_Federal_Reduced_Stopping_Distance_Mandate_Impact_and_Solutions_March2012.pdf)

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2011). Reglamento técnico para la realización de estudios de conversión y/o modificación de los vehículos de carga. San José, Costa Rica.

Department of Transportation. (s.f). How to drive a roundabout. Estado de Washington: Estados Unidos de América. Recuperado el 04-11-2011 de <http://www.wsdot.wa.gov/safety/roundabouts/>

Fancher, P, Ervin, R., Winkler, C. y Gillespie, T. (1986). A factbook of the mechanical properties of the components for single-unit and articulated heavy vehicles. Michigan: The University of Michigan Transportation Research Institute.

Fancher, P y Mathew, A. (1987). A vehicle dynamics handbook for single-unit and articulated heavy trucks. Michigan: The University of Michigan Transportation Research Institute.

Imine, H. y Dolcemascolo, V. (2007). Rollover risk prediction of heavy vehicles using sliding mode observer. International Journal of Heavy Vehicles Systems, 14(3), 294-307.

Kamnik, R., Boettiger, F. y Hunt, K. (2003). Roll dynamics and lateral load transfer estimation in articulated freight vehicles. Journal of Automobile Engineering, 217(D). 985-997.

Manitoba Public insurance. (s.f.). Air Brake Manual. Recuperado el 24-10-2011 de <http://www.mpi.mb.ca/PDFs/AirBrakeManual/AirBrakeManualComp.pdf>

Mark, A. y Marek, P. (2010, Mayo). Roadway Design Manual. Recuperado el 08-12-2011 de [http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/rdw/minimum\\_designs\\_truck\\_bus\\_turns.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/rdw/minimum_designs_truck_bus_turns.htm)

MOPT. (2003). Reglamento de circulación por carretera con base en el peso y las dimensiones de los vehículos de carga pesada. La Gaceta. N° 182 del 23/09/2003.

MSHA. (1999). Haul Road Inspection Handbook. Estados Unidos de América. U.S Department of Labor.

Sampson, D. (2000, Setiembre). Active roll control of articulated heavy vehicles (Tesis de Doctorado, Universidad de Cambridge, 2000). Recuperado el 18-04-2012 de <http://www.sampson.id.au/david/work/phd.pdf>

Transportation Research Institute. (1997, Febrero). Stopping sight distance and decision sight distance. Oregon State University.