

Evaluación de la longitud crítica de pendiente en el diseño geométrico de un corredor vial en montaña, implementando los criterios de diseño vertical invias 2008.

Evaluation of the slope's critical length in the geometrical design of a mountain hallway road by implementing the vertical design standards invias 2008.

Sherly Johana Guarnizo Cascavita¹, Herbert Giovanni Ortiz Pinzón², Daniel Alberto Zuluaga Astudillo³

¹Especialista en Diseño y Construcción de vías y Aeropistas, Escuela de Ingenieros Militares, Ingeniero topográfico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. sherlyguarnizo@yahoo.es

²Especialista en Diseño y Construcción de vías y Aeropistas, Escuela de Ingenieros Militares, Ingeniero topográfico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. giovanniortizp@hotmail.com

³Magister en Ingeniería Civil, Docente Investigador Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá Colombia. jwinnorth@gmail.com

FECHA DE RECEPCIÓN DEL ARTÍCULO: 03/04/2017 FECHA DE ACEPTACIÓN DE ARTÍCULO: 10/07//2017

RESUMEN

Esta investigación se desarrolló con el fin de evaluar la incidencia de la longitud crítica de pendiente en el diseño geométrico de un corredor vial en montaña, con pendientes superiores al 3%, condición en la cual los vehículos desarrollan una longitud crítica de pendiente antes de terminar su recorrido dentro del ascenso, disminuyendo su velocidad de operación e impactando la velocidad de la vía; por lo cual el Instituto Nacional de Vías de Colombia recomienda brindar tramos de recuperación de pendiente aumentando la longitud y el tiempo de recorrido.

Luego de establecer la población a evaluar, se realizó el nuevo diseño geométrico, se determinó el aumento promedio en la longitud del trazado final 38% y la evaluación del criterio mencionado.

PALABRAS CLAVE

Longitud crítica de pendiente, perfil montañoso, diseño geométrico, recorrido de ascenso, velocidad de operación.

ABSTRACT

This research was conducted in order to assess the impact of the slope's critical length in the geometrical design of a mountain hallway road with slopes higher than 3%, condition in which the vehicles develop a critical slope length before finishing its route in the rise, lowering its operating speed and impacting the speed of the track; therefore the Colombian National Roads Institute recommends to provide outstanding recovery sections by increasing the length and time of travel.

After establishing the population to be evaluated, it was done the new geometrical design, it was determine the average length increase of the final outline 38% and the evaluation of the mentioned criteria.

KEYWORDS

Critical slope length, mountainous profile, geometric design, travel ire, speed of operation.

INTRODUCCIÓN

El diseño geométrico de vías a partir del criterio de la longitud crítica de pendiente se realizó integrando los lineamientos para el diseño

establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en planta y perfil, brindando en el trazado tramos de recuperación de pendiente al 1% con longitudes iguales a las de las tangentes que se encontraban en longitud crítica de pendiente, lo cual conllevó al aumento de la longitud del diseño de la vía, el tiempo de recorrido para los usuarios de la misma

El instituto nacional de vías (INVIAS) mediante el documento denominado “manual diseño geométrico del año 2008” ha establecido los criterios para el diseño de carreteras en Colombia, dicho documento incluye el diseño vertical y a su vez la longitud crítica de pendiente, la cual busca que en un terreno montañoso y escarpado los vehículos pesados no operen a velocidades sostenidas en rampa durante distancias considerables. [1]

Aunque INVIAS en el manual indica que los diseños geométricos de carreteras deben brindar en el trazado tramos de recuperación de pendiente con el fin de garantizar a los usuarios un servicio de operación óptimo. Este criterio conlleva al aumento en la longitud inicial del proyecto, mayor tiempo de recorrido y discordancia entre los diferentes parámetros geométricos de diseño como por ejemplo:

- La consistencia en los diseños geométricos viales deben incluir el comportamiento del conductor en diversos aspectos como por ejemplo la velocidad de operación, visibilidad disponible o el concepto probabilístico del riesgo. Existen varios criterios de consistencia asociados a estas variables las cuales influyen en diferentes elementos del trazado geométrico. Sin embargo, el cómo integrar estos elementos de ingeniería es aún una tarea pendiente. [2]
- El porcentaje de reducción de velocidad de operación y la longitud de ascenso en la cual se origina éste, obedece a varios factores tales como: Relación peso/potencia de los vehículos pesados, Pendiente óptima para operar los vehículos pesados, Velocidad con la cual se inicia el ascenso, Velocidad mínima aceptada en la pendiente.
- En vehículos pesados, la influencia de las pendientes de subida es significativa por el atraso que genera a otros vehículos, especialmente en carreteras con altos

volúmenes de tráfico, ya que la velocidad de estos vehículos se reduce tanto en bajada como en subida [3].

Como estos factores son variables especialmente en países como Colombia, donde el parque automotor es tan heterogéneo, es de suma importancia en la definición del corredor vial y del diseño geométrico del mismo: entender, definir y solucionar los anteriores aspectos. [4]

La red de carreteras construidas en Colombia a principio del siglo XX sigue funcionando pero se debe tener en cuenta que las mismas no fueron concebidas para el tráfico y las necesidades actuales del país y que tampoco cuentan con condiciones técnicas apropiadas, no cuentan con aspectos como radios de curvatura horizontal ni un diseño espiralizado, buenas longitudes de curvas horizontales y entre tangencias adecuadas que permitan una transición del peraltado cómoda y bajas pendientes en su rasante [5], [6]. Debido a lo anterior el Gobierno Colombiano ha rehabilitado y cambiando el trazado para la red primaria mediante concesiones, como por ejemplo; la concesión autopista Bogotá -Girardot, y para la red terciaria y secundaria INVIAS realiza un programa de mejoramiento [7]-[9], iniciativas con las cuales se ha buscado mejorar los tiempos de recorrido, la seguridad vial y el aumento en el nivel de servicio de las vías.

Definición

Se define como longitud crítica de pendiente la máxima longitud en rampa o ascenso sobre la cual un vehículo pesado, puede transitar sin ver reducida su velocidad de operación por debajo de un valor predeterminado. El porcentaje de reducción de velocidad de operación y la longitud de ascenso en la cual se origina éste, obedece a varios factores tales como: Relación peso/potencia de los vehículos pesados, Pendiente óptima para operar los vehículos pesados, velocidad con la cual se inicia el ascenso, Velocidad mínima de operación en la pendiente.

En general, un vehículo pesado cargado al iniciar el ascenso comienza a sufrir una disminución en su velocidad de operación, la cual disminuye hasta lograr un valor estable que se denomina velocidad sostenida en rampa. En

Colombia es aceptado como longitud crítica de pendiente la distancia inclinada necesaria para que el vehículo pesado vea reducida su velocidad de operación en 25 Km/h por debajo del valor promedio de la velocidad de operación del tramo o sector de la vía [1], [4].

Conforme a la longitud vertical máxima del perfil el proyectista debe evaluar el criterio de longitud crítica de pendiente a partir de pendientes superiores al 3%, con las cuales los vehículos pesados verán afectada su velocidad de operación. Los vehículos livianos o automóviles operan sin dificultad, hasta con pendientes del 7% [1].

Con el ánimo de comparar los valores mencionados, se presentan algunas fuentes internacionales, y sus magnitudes de clasificación de acuerdo a los siguientes manuales:

Manual de Diseño geométrico de vías de Chile se tienen las siguientes consideraciones:

- Pendientes de hasta 6%, afectan sólo marginalmente la velocidad de operación de la gran mayoría de los automóviles, cualquiera que sea la longitud de la pendiente.
- En el caso de los camiones, sobre una pendiente del 3% causan reducciones significativas de la velocidad de operación, a medida que la longitud en pendiente aumenta; esto afecta la velocidad de operación de los automóviles, en especial en caminos bidireccionales con alta densidad de tránsito. [10], [11].

Manual de Diseño geométrico de México tiene las siguientes consideraciones:

- En México se ha desarrollado otro criterio basado en el tiempo de recorrido, el cual se aplica a terrenos de tipo Ondulado y de Cordillera, en donde por razones de configuración, es necesario considerar una pendiente gobernadora con valor previamente especificado. Cuando intervienen la pendiente gobernadora, la longitud crítica de tangentes para las diferentes pendientes no debe considerarse con valores rígidos y fijos como en el primer caso; su valor puede tener pequeñas variaciones para diferentes tramos, en

función del efecto que el conjunto de las tangentes tenga en la velocidad de marcha y por ende en el tiempo de recorrido para el tramo. [12].

- La pendiente recomendable para que el vehículo pesado vuelva a la velocidad inicial que tenía antes de entrar a la tangente de longitud crítica, es de uno por ciento (1%) en una longitud igual o mayor a la longitud vertical anteriormente superada. [12].

METODOLOGÍA

Se contó con el trazado geométrico de la vía que une los municipios del Espino (Boyacá) con Tipacoque (Santander) el cual tiene una longitud aproximada de 30 km y un tiempo de viaje estimado de tres horas. Se caracterizó el corredor en cuatro (4) segmentos viales y cada tramo se segmentó conforme a las tangentes en ascenso mayor al 3% para desarrollar el criterio de longitud crítica de pendiente [1].

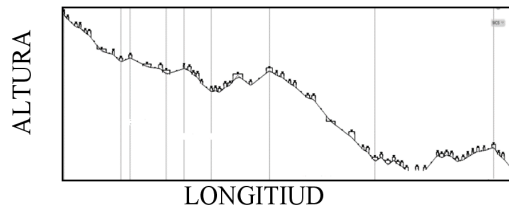


Figura 1. Segmentación de los tramos conforme al perfil del diseño vertical.

A partir la figura 2 denominada Efecto de la pendiente en vehículos con relación peso potencia 120 kg/hp y la velocidad de diseño del proyecto del Manual de diseño geométrico de Carreteras de la ciudad de México se determinaron los segmentos del corredor vial que presentan longitud crítica de pendiente basados en la disminución de velocidad de operación de la vía.

Una vez segmentados los tramos como se muestra en la figura 1 y en la tabla 1 se determina la pendiente gobernadora del tramo, velocidad promedio de operación y el tiempo de recorrido en una sola tangente.

Luego de verificar cuales tramos presentan longitud crítica de pendiente se realiza un nuevo trazado que cumpla con los siguientes criterios de diseño establecidos en el Manual de INVIAS del año 2008 [1]:

- Pendiente de recuperación del 1%.
- Longitud Igual o mayor a la longitud crítica anteriormente superada.

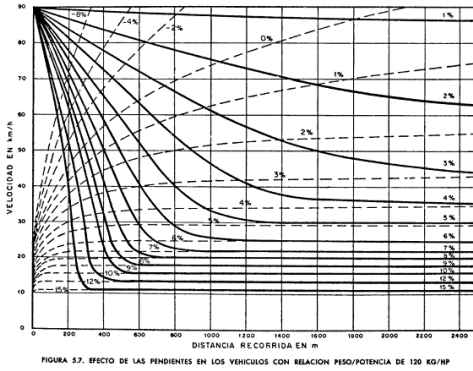


Figura 2. Efecto de la pendiente en vehículos con relación peso potencia 120 kg/hp [12]

Tabla 1. Segmentos del corredor vial analizados, vehículo de diseño C2 sencillo -peso 120 Kg.

SEGMENTO	MUESTRA	ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL	LONGITUD DEL TRAMO	PENDIENTE GOBERNADORA DEL TRAMO	VELOCIDAD PROMEDIAL DEL TRAMO	TIEMPO DE RECORRIDO EN UNA SOLA TANGENTE	TIEMPO DE RECORRIDO DENTRO DEL ALINEAMIENTO	APLICACION CRITERIO DE LONGITUD CRITICA
Segmento No 1	1	K6+861.60	K8+241.26	1379.7	7.53%	23.80 Km/h	208.67 Seg	217.27 Seg	SI
	2	K4+709.50	K6+367.30	1657.8	5.03%	28.57 Km/h	208.88 Seg	207.98 Seg	NO
	3	K3+265.10	K1+848.50	1416.6	6.03%	26.00 Km/h	196.16 Seg	202.82 Seg	SI
	4	K1+707.00	K1+682.70	24.3	6.08%	23.25 Km/h	103.64 Seg	98.82 Seg	NO
	5	K0+683.50	K0+283.20	400.3	7.66%	21.25 Km/h	67.81 Seg	69.09 Seg	SI
Segmento No 2	6	K10+73.54	K11+92.55	1190.1	5.48%	28.63 Km/h	149.67 Seg	159.00 Seg	SI
	7	K12+12.34	K12+87.27	749.3	3.84%	37.00 Km/h	72.90 Seg	75.56 Seg	SI
	8	K13+24.41	K13+81.47	570.6	6.00%	25.00 Km/h	82.16 Seg	88.56 Seg	SI
	9	K15+02.27	K17+22.54	2202.7	5.00%	27.82 Km/h	285.05 Seg	301.70 Seg	SI
	10	K19+70.12	K20+18.27	481.07	8.00%	23.00 Km/h	75.30 Seg	80.94 Seg	SI
Segmento No 3	11	K0+000.00	K3+950.28	3950.28	10.55%	18.14 Km/h	783.84 Seg	800.26 Seg	SI
Segmento No 4	12	K0+844.34	K0+000.00	844.34	5.48%	24.63 Km/h	123.44 Seg	121.44 Seg	0
	13	K2+488.20	K1+407.00	1081.2	5.95%	27.89 Km/h	139.58 Seg	145.43 Seg	SI
	14	K4+533.10	K3+637.20	895.9	7.32%	27.94 Km/h	115.42 Seg	128.11 Seg	SI

Una vez realizado el diseño geométrico en perfil y planta para cada uno de los tramos se procede a calcular el aumento de la longitud del corredor; posteriormente se compara la longitud inicial de los tramos con la longitud final obtenida y

se determina el porcentaje de aumento de la longitud del corredor.

Atendiendo las dificultades encontradas para desarrollar tramos de recuperación de la longitud crítica de pendiente conforme a la metodología del Instituto Nacional de Vías, se ha generado en el presente artículo unas recomendaciones que serían muy útiles para que los diseñadores viales justifiquen la necesidad de construcción de tramos de recuperación o la construcción de carriles de tráfico lento en vías primarias del país; acorde a los criterios de comodidad, velocidad de operación de la vía y seguridad.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las diferentes etapas del presente estudio se presentan a continuación:

- Caracterización de las muestras

Analizando la información obtenida durante la caracterización de las muestras se logró establecer que en los casos en los cuales el tiempo de recorrido de un vehículo con relación peso potencia 120 kg/hp utilizando una la velocidad de operación de 30 km/h [1], sobre el alineamiento existente es mayor al tiempo de recorrido sobre una sola pendiente gobernadora, se presenta Longitud Crítica de pendiente a pesar de que no haya pérdida de 25 km/h, es decir que el criterio de Longitud Crítica de Pendiente debe ser evaluado para tramos en ascenso con diferentes pendientes y no para segmentos con cambio de pendiente de manera separada, puesto que el tiempo de recorrido y la velocidad de operación de la vía generados, serán inferiores a los obtenidos al implementar pendientes gobernadoras.

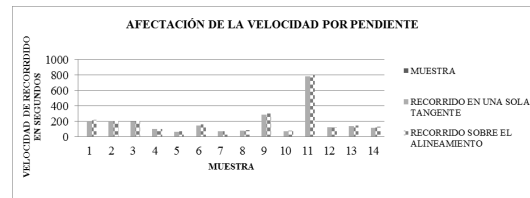


Figura 3. Identificación de los tramos para aplicación criterios de longitud crítica de pendiente.

- Longitud final de la vía

Al comparar la longitud original de los tramos, respecto a los diseños modificados cumpliendo con el criterio de longitud crítica de pendiente, se logra determinar un incremento significativo de la longitud de la vía evaluada, el cual alcanza un porcentaje promedio del 38%.

- Velocidad de operación

Al realizar la modificación al diseño geométrico implementado el criterio de la Longitud Crítica de pendiente se observa que la velocidad de operación para las muestras evaluadas presenta incrementos sustanciales, los cuales alcanzan en promedio un aumento del 57% con respecto a la velocidad inicial.

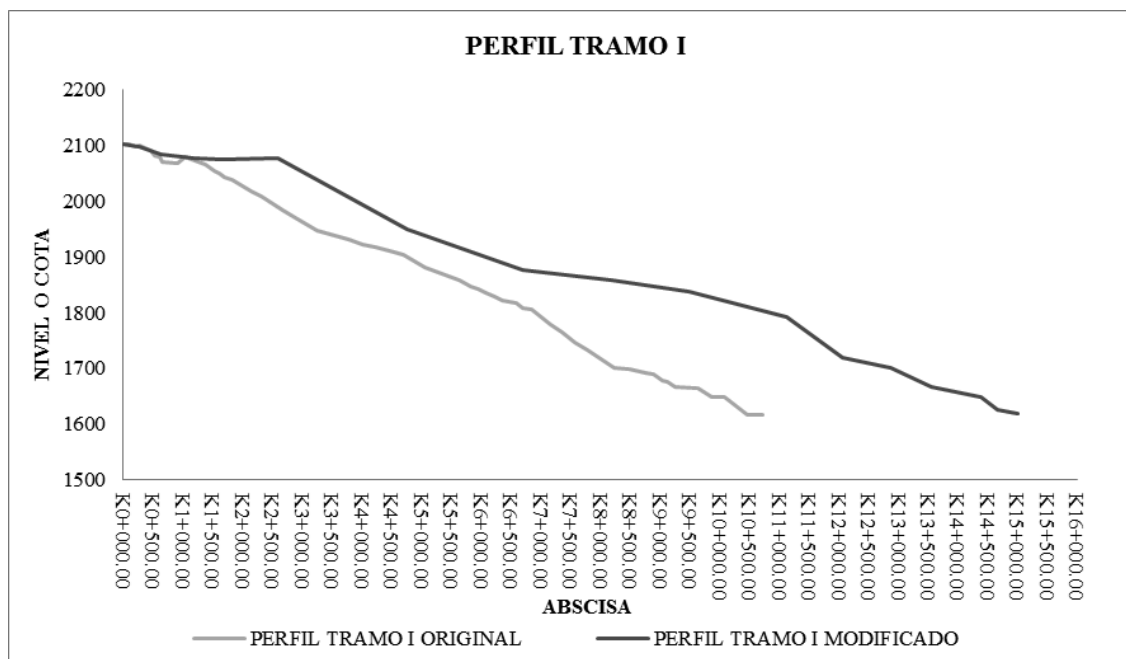


Figura 4. Perfil inicial vs Perfil final segmento N°1.

Tabla 2. Aumento en la longitud del diseño en cada tramo.

Tramo	Longitud inicial del corredor (m)	Longitud final del corredor (m) aplicando criterio de longitud crítica	% de incremento por tramo (m)
I	10719,63	15010,59	40%
II	9462,64	10429,16	10%
III	4478,3	6280,76	40%
IV	4891,27	7850,3	60%
Longitud total	29551,84	39570,81	38%

Tabla 3. Comparación de la velocidad promedio antes y después de la aplicación del criterio de longitud crítica de pendiente en el diseño de un corredor vial en terreno montañoso.

TRAMOS	Velocidad promedio del tramo inicial	Velocidad promedio de los tramos diseñados con longitud crítica de pendiente
TRAMO 1	24.57 Km/h	44.88 Km/h
TRAMO 2	28.29 Km/h	44.54 Km/h
TRAMO 3	18.14 Km/h	33.09 Km/h
TRAMO 4	26.82 Km/h	49.18 Km/h

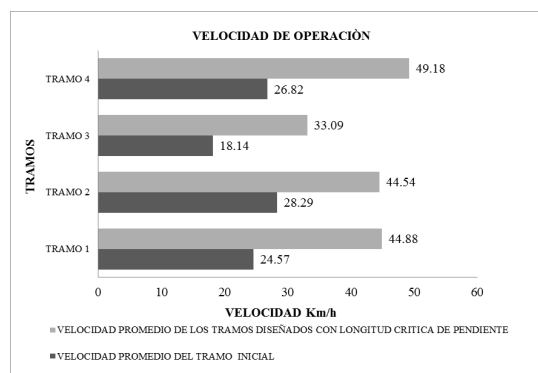


Figura 5. Variación de las velocidades de operación

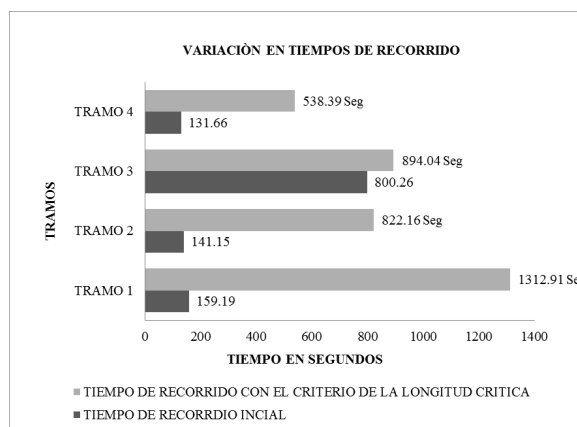


Figura 6. Variación de las Tiempos de recorrido.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que la aplicación del criterio de la longitud crítica de pendiente en el diseño geométrico de corredores en montaña no es un criterio que se pueda aplicar sobre un corredor existente por las siguientes circunstancias:

Al realizar un trazado geométrico aplicando taxativamente el criterio de la longitud crítica de pendiente se aumenta la longitud del proyecto; para el caso de esta investigación se registró un incremento del 38% entre la longitud inicial y la longitud final del corredor.

La velocidad de operación para el corredor diseñado tuvo un incremento del 57% con respecto a la inicial, generando un corredor inseguro para los usuarios, puesto que los elementos geométricos del corredor se encuentran dimensionados para que funcionen a 30 km/h.

Al aplicar el criterio de la longitud crítica de pendiente sobre un alineamiento existente se generan modificaciones en el trazado, induciendo un incremento en la longitud del corredor y a la cantidad de curvas horizontales a construir, incumpliendo en muchos casos con las entre tangencias mínimas establecidas en los parámetros de diseño.

Al presentarse aumento en la longitud final de los proyectos debido a la implementación del criterio de la longitud crítica de pendiente, los presupuestos a contemplar serán mayores impactando directamente la ejecución de las obras.

Brindar en un corredor montañoso una longitud de recuperación con una pendiente del 1% en una distancia igual o mayor a la longitud crítica de pendiente incrementa la longitud de la vía, los costos de operación y afecta la seguridad vial dado que incita a la construcción de tramos en los cuales se reduzca la longitud de las curvas y las entre tangencias, por lo cual se considera que el

criterio de longitud crítica debe ser replanteado dentro de la normatividad colombiana.

El análisis de la longitud crítica de pendiente en proyectos viales, en especial en proyectos futuros, le brindará al diseñador una visión clara sobre las zonas en las cuales la velocidad de operación de los vehículos pesados se verán reducidas por efecto de la pendiente, sin embargo, la metodología desarrollada por el INVIAS en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, Instituto Nacional de Vías 2008, se encuentra enfocada para la verificación de alineamientos verticales individuales y no en tramos continuos de ascenso, por lo que al aplicar el método no se registran pérdidas de velocidad hasta los 25 kilómetros por hora, aspecto que debe ser evaluado contemplando los tramos continuos en ascenso donde un vehículo trabaja con la máxima potencia y desarrolla una velocidad sostenida en rampa, la cual afecta la velocidad de operación de la vía.

REFERENCIAS

- [1] Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, Instituto Nacional de Vías INVIAS, Bogotá D.C., 2008.
- [2] T. Echaveguren, A. Altamira, S. Vargas, D. Riveros. *Criterios para el análisis de consistencia del diseño geométrico: velocidad, aceleración, visibilidad y confiabilidad*. Chile, 2011.
- [3] Manual centro americano de Normas para el diseño Geométrico de Carreteras, Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación CEPREDENAC y SIECA-Centroamérica., 2010.
- [4] C. González Vergara, M. Rincón Villalba, W. Vargas Vargas. *Diseño geométrico de vías*. Universidad Distrital: Bogotá D.C., 2012.
- [5] B. E. Pineda Uribe, “Importancia de la Maniobra de adelantamiento en Carreteras de dos carriles”. *Rev. Politécnica*, no. 13, vol. 7, 2011.
- [6] Definición de los lineamientos Básicos de Auditorías de Seguridad Vial, Corporación para el fondo de Prevención Vial. Informe final de consultoría 31 de mayo del 2012.
- [7] F. Mesa Mateus, N. Revelo Méndez, A. Herrera, C. Flórez Valero. “Seminario de Auditorías de Seguridad Vial organizado por INVIAS, Criterios de seguridad vial para el diseño de señalización en vías de bajas especificaciones geométricas”, Pontifica Universidad Javeriana, Marzo 14 de 2008
- [8] A. García García, F. J. Camacho Torregrosa, A. M. Pérez Zurriaga, Consistencia del diseño geométrico de carreteras: Concepto y Criterios. Universitat Politècnica de Valencia 2011.
- [9] F. Hernández Casallas, Diseño geométrico de vías. Universidad Gran Colombia: Bogotá D.C, 2005.
- [10] Manual de Carreteras, Dirección de Vialidad-Chile., 2010
- [11] Manual de Carreteras del Paraguay-Normas para la Evaluación de Proyectos y Geometría Vial, Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones. Paraguay, 2009.
- [12] Manual de proyecto geométrico de Carreteras, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, México-1991 Cuarta Edición.