

# Análisis de la posibilidad de implementación de intersecciones diamante en ciudades colombianas

**HERNAN PORRAS DIAZ**

Ph.d Ingeniería Telemática, Universidad Industrial de Santander

Director Grupo GEOMATICA, Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Carrera 27 Calle 9 Ciudad Universitaria (Escuela de Ingeniería Civil), Bucaramanga - Colombia

hperras@uis.edu.co

**YERLY FABIAN MARTINEZ ESTUPIÑAN**

Mg (c) en Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander

Investigador Grupo GEOMATICA, Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Carrera 27 Calle 9 Ciudad Universitaria (Escuela de Ingeniería Civil), Bucaramanga - Colombia

yerlyfabianmartinez@gmail.com

Autor de correspondencia

## Resumen

Las intersecciones diamante divergente son un tipo especial de alternativa de diseño muy reciente en el mundo para la solución de conflictos viales, su funcionamiento básicamente consiste en un cambio regulado semafóricamente de los sentidos de flujo y hasta el momento su implementación en países de Latinoamérica es nulo, lo que supone un desaprovechamiento de sus beneficios. En este trabajo se ha realizado un proceso de recopilación de la información acerca del diseño, uso y operación de esta clase de intersecciones en el mundo, se han analizado los modelos existentes relacionados con la operación vehicular y semafórica para su control y se ha escogido cuales son los parámetros más influyentes que pueden ser tenidos en cuenta para su implementación en ciudades colombianas. Todo este proceso se ha aplicado al análisis de un caso específico en la ciudad de Bucaramanga donde la demanda vehicular como en otras ciudades colombianas está superando la oferta ofrecida por la infraestructura vial existente, el análisis se ha hecho mediante el uso de diferentes escenarios de simulación que permiten comparar y medir el grado de impacto de cada uno de los parámetros escogidos.

**Palabras clave:** Diamante, Fases, Intersección, Parámetros.

## Abstract

Diverging diamond intersections are a recently developed alternative to solve traffic conflicts, where the traffic flow directions are changed by regulating traffic lights. So far, its implementation in Latin American countries is null, wasting all the benefits provided by this control alternative. Compiled information about design, implementation and operation of diverging diamond intersections around the world is presented. Subsequently, existing control models related to vehicular and traffic lights operation were analyzed, and the most influential parameters to consider in its implementation for Colombian cities were chosen. The whole process was applied to the specific case of Bucaramanga city, where vehicular demand is outpacing vial infrastructure supply. Analysis was developed by utilizing several simulation scenarios, comparing and measuring the impact degree of each chosen parameter.

**Keywords:** Diamond, Phases, Intersection, Parameters.

Número de palabras: 5.985 Palabras

## 1 INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y el desmedido crecimiento de las ciudades han traído consigo un fenómeno de desorden y caos, sumándose a esto el aumento del parque automotor, lo que ha llevado a un deterioro de la movilidad tanto vehicular como peatonal y aún más en el caso de países como el nuestro (Colombia) donde la infraestructura vial se ve ineficiente para soportar este fenómeno, traduciéndose en congestiones, largas filas de vehículos y contaminación.

Desde la perspectiva de la infraestructura vial se hace necesario contar con alternativas de solución que permitan mejorar o mitigar los problemas puntuales de intersecciones, que se constituyen como el punto de partida para el problema de caos vehicular, en este trabajo se expone un caso particular de intersección conocida con el nombre de Intersección tipo Diamante (DI) y una modificación de la misma conocida como diverging diamond interchange (DDI), que han sido implementadas en países de Europa y en Ciudades Norteamericanas, pero que a nivel Latinoamericano no se tiene ningún tipo de antecedente, es por ello que se presenta una recopilación de información acerca de la existencia, funcionamiento y operación de este tipo de intersecciones.

Otro aspecto que se muestra, son los parámetros que más inciden en su funcionamiento aplicando a un caso particular de una ciudad colombiana como lo es Bucaramanga, estableciendo entornos de simulación que permiten medir el impacto de cada uno de ellos.

## 2 METODOLOGÍA

La metodología empleada inició con un proceso de revisión bibliográfica acerca del uso y operación de estas intersecciones en el mundo, estudiando aspectos de diseño geométrico, capacidad vehicular, volúmenes vehiculares, velocidad de operación, modelos semafóricos de control, seguridad y funcionalidad en cuanto al manejo peatonal, lo que permitió identificar y extraer los parámetros más determinantes en su funcionamiento.

Se identificaron los principales modelos utilizados para su operación, concentrando la atención en el manejo semafórico, mediante metodologías de análisis como son IDIRMS [19], ALINEA [6], INTRAS, TWO CAPACITY PHENOMENON MODEL [1], entre otras.

Se seleccionó cual podría ser el modelo que más aplicación tendría para la ciudad caso de estudio con base al comportamiento observado en la misma y una comparación hecha con la información recopilada acerca de las condiciones necesarias para la implementación de este tipo de soluciones, identificadas en el análisis bibliográfico, además la selección también se basó en una necesidad existente en la actualidad por mejorar la conexión vial entre el oriente y el occidente de la ciudad caso de estudio.

El siguiente paso consistió en el establecimiento de los escenarios de micro-simulación necesarios, para lo cual se realizó el montaje del modelo de la situación actual en el

software TRANSMODELER 2.0 con la información que posee la Universidad Industrial de Santander en cuanto a conteos vehiculares, velocidades de operación, caracterización de la malla vial producto de la elaboración del plan maestro de movilidad de la ciudad de Bucaramanga [15] (del cual los autores del presente artículo hicieron parte del grupo de ingenieros encargados de su elaboración).

Con el escenario de la situación actual se calibró el modelo para asegurar de esta manera que los resultados que se obtuvieran en los escenarios siguientes fueran lo más confiables y acertados posibles. Los otros tres escenarios planteados corresponden a un escenario con la aplicación del concepto de intersección diamante, otro utilizando el concepto de diverging diamond interchange y un cuarto escenario utilizando una solución a desnivel que fue propuesta para este sector en el año 2007 por un grupo consultor de la ciudad.

Los resultados que se tomaron de cada escenario y que permitieron comparar y medir el grado de impacto de cada opción fueron el nivel de servicio y la velocidad para los diferentes corredores que se veían afectados por cada una de las soluciones, además se compararon resultados que tienen que ver con el tiempo de demoras y número de paradas por vehículo para la intersección principal en estudio, con todos estos resultados se llegó al proceso de conclusiones donde se expresó el grado de efectividad de la solución con su pros y contras en cuanto a otras soluciones como era el paso a desnivel.

De esta forma se llevó a cabo todo el procedimiento para la generación de esta investigación.

### 3 CONTEXTO HISTORICO

En el mundo existen numerosas soluciones novedosas para disminuir los problemas que se presentan en las intersecciones viales, pero mucho de estas soluciones representan grandes inversiones [11], convirtiéndose en alternativas inalcanzables para el caso de países en vía de desarrollo. En esta búsqueda de soluciones eficientes y económicas aparece una alternativa conocida como intersección diamante, que es una “solución que conduce el tráfico en sentido opuesto a la dirección normal de la vía”[12] y a su vez existe un mejoramiento a dicho tipo de intersección que es conocido como la Diverging Diamond Interchange.

Este tipo de intersecciones fueron concebidas en Francia a mediados de los setentas, sus antecedentes muestran que se implementó por primera vez en la ciudad de Versailles France en la intersección de la autopista A13 y 182 de RD (Avenida de Jardy), la Intersección de la autopista A4 (avenida des Allies) y el Boulevard de Stalingrado en Le Perreux - sur- Marne [15] y en la ciudad de Seclin en la intersección de la autopista A1 y Encamine a d' Avelin.

En el continente americano en el otoño de 2000, Gilbert Chlewicki, un estudiante de posgrado de primer semestre en la Universidad de Maryland, College Park en su proyecto de maestría en ingeniería de transporte, analizaba como algunos diseños de intersecciones provienen de conceptos de intercambiadores, entre estos se tenía como ejemplo más destacado el jughandle.

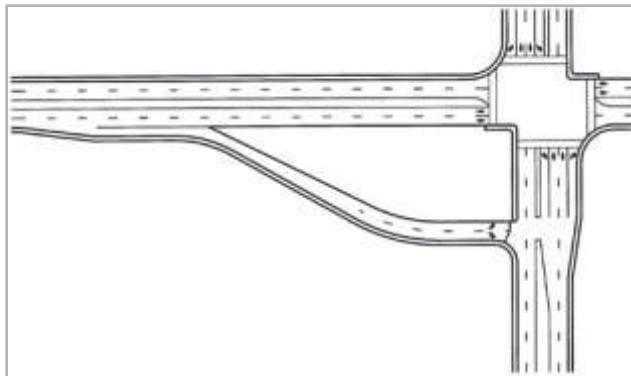


FIGURA 1. DIAGRAMA DE UNA INTERSECCIÓN JUGHANDLE.

Fuente: Bared, 2004

“El jughandle lleva el concepto de la utilización de una rampa de intercambio para reemplazar el giro izquierdopor una intersección directa” [13]. Así Chlewicki comenzó a buscar en los intercambiadores para determinar si alguno de ellos podría ser convertido en un concepto a nivel. Una intersección única de este tipo existe en la intersección formada por la I-95 con la I-695 en el lado noreste de Baltimore. En la figura 2 se puede ver la configuración de esta intersección, el diseño es simétrico en todos los lados, Chlewicki estudiaba que sucedería en este tipo de intercambiador si todos los puentes separados fueran sustituidos por intersecciones a nivel controladas por semáforos.



FIGURA 2. INTERSECCIÓN I-95 CON I-695 BALTIMORE.

Fuente: Google Earth

El diseño se veía prometedor, pero Chlewicki consideró que la prueba real del diseño sería si era posible garantizar luces verdes a través del diseño una vez que el conductor recibiera la primera luz verde, entonces determinó que esto sólo sería posible sincronizando los movimientos de cada víay“si la división del tiempo de la luz verde para ambas direcciones fuera casi idéntico” [14].

El no encontrar un lugar adecuado donde este diseño a nivel se pudiera utilizar, hizo modificar la idea de Chlewicki , lo que busco fuedesenredar uno de los caminos, de manera que sólo uno de ellos se cruzara durante las maniobras dentro de la

intersección, donde la sincronización de las señales podría tener cabida para todos los movimientos incluidos los giros a la izquierda, así este diseño recibió el nombre *cross-cross* [2], que luego llamo intersección con eliminación dividida sincronizada o SSP, ya que el diseño tiene características donde se ve una intersección dividida por etapas, pero ambos lados pueden tener el verde al mismo tiempo con la ventaja de la sincronización de señales adicionales. Más adelante cambió el nombre a intercambiador de diamantes divergentes o DDI, debido a los múltiples puntos divergentes en todo el intercambiador.

Chlewicki presentó su investigación en el 2º Simposio de calles urbanas en Anaheim, California, en julio de 2003. Varias personas quedaron impresionadas con la presentación, mientras que otros se mostraron escépticos. Una persona que le impresionó fue Joe Bared, PhD, PE de la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Bared se había especializado en la investigación de nuevos diseños geométricos en la FHWA y vio el potencial de estos diseños.

El primer estudio hecho por [5], evaluaron la DDI y SSP que Bared cambió de nombre a la intersección de cruce doble o DXI en un escenario de volumen alto, medio y bajo. “Los resultados fueron aún más prometedores. Tanto la DDI y DXI tuvieron una mejoría significativa respecto a los diseños convencionales en grandes volúmenes” [5].

Al parecer, la primera DDI que se iba a construir en los Estados Unidos iba a ser en Findlay, Ohio en la I-75 y EE.UU. 224. Era la mejor alternativa hasta la selección final, al parecer la decisión final se basó en preocupaciones de seguridad de un diseño no probado, que es un miedo común para los nuevos diseños. El siguiente candidato principal para la construcción de una DDI estaba en Kansas City, Missouri en la I-435 intercambio / Front Street. Al mismo tiempo, la FHWA quería estudiar el grado de seguridad de la DDI [17]. Para el estudio utilizaron sus carreteras como simulador de conducción, usando la I-435 / Front Street, encontrando que los conductores eran intuitivamente capaz de maniobrar dentro de la DDI y encontrar el camino hacia su destino.

Don Saiko, PE, gestor de proyectos del área de Springfield, Missouri distrito de MoDOT, quiso investigar el diseño en el área de Springfield. Él consiguió el permiso para probar el diseño en la I-44 y Kansas Expressway (SR 13), que había estado experimentando grandes problemas de tráfico y de seguridad, debidos principalmente a las pequeñas áreas de almacenamiento de giro a la izquierda en las rampas de acceso.

Un presupuesto de \$ 10 millones de dólares fue concedido para la construcción de este proyecto. Las simulaciones hechas para el diseño mostraron muy buenos resultados, al final la DDI sólo costó alrededor de \$ 3 millones de dólares, ahorrando 7 millones de dólares del costo presupuestado, además el tiempo de construcción tardó 6 meses en lugar de dos años como sucedía con las otras opciones.



FIGURA 3. INTERSECCIÓN I-44 SPRINGFIELD MISSOURI.

Fuente: Saiko P.E. 2009

El proyecto se terminó a tiempo y dentro del presupuesto, con la apertura de configuración DDI el 21 de junio de 2009 y la ceremonia de corte de cinta para la realización del proyecto el 7 de julio de 2009. “El DDI ha sido un gran éxito en este intercambiador y puede considerarse que ha funcionado incluso mejor que lo indicado por los modelos de simulación” [8].

Adicionalmente se han estado desarrollando investigaciones acerca de su implementación en el Virginia Polytechnic Institute y State University. El Departamento de Transporte de Missouri también está planeando construir 4 intersecciones de este tipo tres en Kansas City y una en St. Louis Country.

La secretaría de transporte de Oregón adelanta los estudios para la construcción de este tipo de intersecciones en un cruce conflictivo a nivel de congestión y seguridad vial de su malla ubicados a la altura de los cruces de 26 mille Road con la M-53 (Macomb County, Michigan).

#### 4 INTERSECCIONES DIAMANTE

Una intersección tipo diamante es definida como una vía de doble sentido que intercepta a dos vías adyacentes de un solo sentido, de la vía principal salen cuatro rampas que se unen a la vía secundaria [5], estos cruces que se generan son usualmente diseñados como intersecciones a nivel del tipo T. El paso a desnivel (overpass o underpass) es opcional y puede darse tanto en el camino principal como en el secundario, esto dependiendo de las condiciones topográficas del terreno donde se vaya a construir y que difieren en su operación con respecto a una intersección típica porque los giros a la izquierda en ambos sentidos se cruzan, evitando que se atiendan en simultáneo, las figuras 4 y 5 muestran la configuración para este tipo de intersecciones.

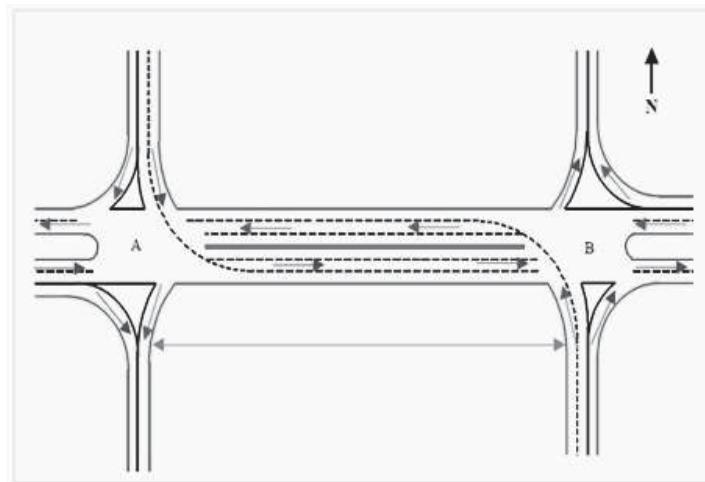


FIGURA 4. INTERSECCIÓN TIPO DIAMANTE.

Fuente: Edara, 2003

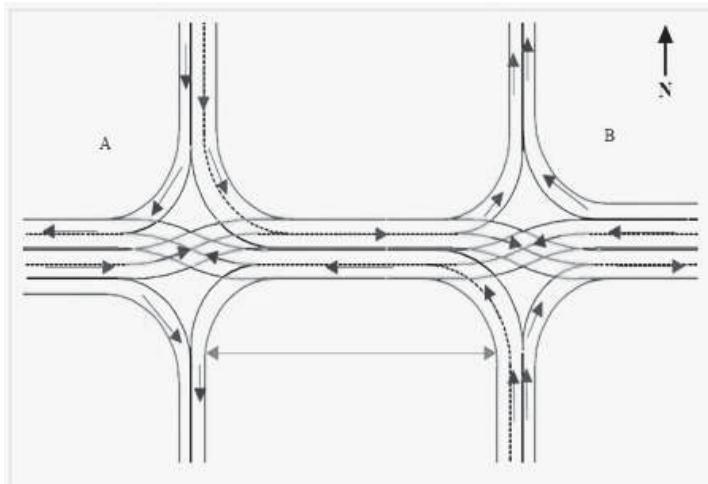


FIGURA 5. INTERSECCIÓN TIPO DIVERGING DIAMOND INTERCHANGE.

Fuente: Edara, 2003

Entre las soluciones que ofrece este tipo de intersecciones está el proveer seguridad y comodidad a bajo costo [8], además permite mover el tráfico más rápido porque los puntos donde los vehículos paran es reducido, un incremento de la capacidad en la intersección debido a la eliminación de la fase semafórica que contiene el giro izquierdo (Gerad B. de Camp, 1993) y permite contar con una fase peatonal.

En el caso de la DDI esta dirige el tráfico mediante un cruce hacia el lado opuesto del camino entre la rampa terminal de la intersección, el cual se realiza mediante señales que controlan los movimientos de los vehículos permitiendo tanto el cruce como a la derecha como a la izquierda sin ningún tipo de problema.

En estudios realizados por [5], se hace una comparación entre estos dos tipos de intersecciones dejando ver la efectividad del funcionamiento para la intersección tipo DDI cuando los volúmenes de tráfico son altos (entre 4000 y 5000 Veh/hr), ofreciendo bajos tiempo de demora y de parada, menor número de paradas y disminuyendo la longitud de las colas, en el caso de volúmenes de tráfico bajo menores a 1500 Veh/hr,

los dos tipos de intersecciones se comportan de manera muy similar, en la tabla 1 se puede ver una comparación entre diferentes criterios de evaluación para cada una de estas soluciones.

TABLA I  
COMPARACIÓN INTERSECCIÓN DIAMANTE CON INTERCAMBIADOR DIAMANTE DIVERGENTE

CRITERIO DE EVALUACIÓN	DI	DDI
Capacidad de la Intersección	Media	Alta
Espacio Intersección Adyacente	Media	Alta
Progresión del vehículo al Cruzar la Calle	Media	Bajo
Seguridad del Tráfico	Media	Media
Peatones/Acomodo de Bicicletas	Alto	Media
Costos de Construcción	Medio	Bajo/Alto
Costo de Derecho de Vía	Bajo	Bajos/Medio

Fuente: Sharma, 2005

#### 4.1 Operación y funcionamiento

Una de los factores más determinantes en este tipo de intersecciones es la consideración de las fases semafóricas que regulan y controlan el tráfico, “ya que la finalidad principal es evitar la formación de colas” como lo dicen [9], existen teorías acerca de la disposición de las diferentes fases semafóricas en estas intersecciones, “como lo es la metodología del polígono de colas”[10], que “permite un análisis y una medición visual de las longitudes de cola en la intersección con el fin de definir las fases semafóricas mas adecuadas según la hora del día y del volumen de tráfico”[18].

Existen modelos de fases semafóricas establecidos de este tipo conocidos como el modelo Texas Transportation Institute phasing TTI o de cuatro fases [14], el modelo de Tres fases y el sistema Lead-Lag, que han sido efectivos en la operación de este tipo de intersecciones disminuyendo las grandes colas en las horas pico.

##### 4.1.1 Sistema de operación de cuatro fases (TTI)

Se caracteriza por operar las fases en el sentido de las manecillas del reloj con el fin de garantizar que quien entra a la primera intersección en verde tenga de nuevo una fase verde en la segunda intersección. La principal ventaja es que en este tipo de operación los giros a la izquierda tienen la prioridad, garantizando un flujo rápido al interior de la intersección. Presenta una operación bastante eficiente ya que permite el traslape de dos fases (cerca de 8 segundos), entre los sentidos opuestos de la arteria principal que llega a la intersección, esto se logra gracias a los tiempos de viaje dentro de la intersección.

Otra ventaja es que mantiene el interior de la intersección limpia de tráfico, lo cual es de

gran ayuda cuando los giros izquierdos están muy cargados de vehículos y el espacio de almacenamiento dentro de la intersección es muy pequeño debido a la proximidad de los dos caminos laterales [17], este tipo de operación es buena para los conductores porque siempre se provee una luz verde en el otro lado de la intersección. La TTI es equivalente a regular intersecciones con fases divididas en ambas calles comúnmente conocidas como “Electric All – Way Stop” [2].

El mayor problema de este tipo de operación es que restringe el flujo en los carriles más externos de la intersección ya que se habilitan los giros a la izquierda pero se limitan los cruces frontales, esto resulta ser un problema cuando los volúmenes de tráfico son mayores en las vías arteria que llegan a la intersección.

Para este tipo de operación los ciclos no deben ser menores al doble del tiempo que toma cruzar la intersección pues de lo contrario se provocará embotellamiento de carros en el interior de la intersección. Por otro lado, los ciclos semafóricos no deben ser mayores a lo necesario para proveer equidad en los cruces frontales, considerándose equitativo cuando el grado de saturación en todas las direcciones es semejante [16].

El modelo de cuatro fases utiliza una fase secuencial Lead-Lead [19], el movimiento de giro izquierdo se dirige a través de los carriles en ambos lados de la intersección y es así como se minimizan las colas internas, el término overlap utilizado en la figura 6 para describir el sistema de cuatro fases es una falsa fase usada con el propósito de garantizar la eficiencia en la progresión del tráfico, este esquema de fase es adecuado para intersecciones diamante que estén en espacios cerrados o con poco espacio.

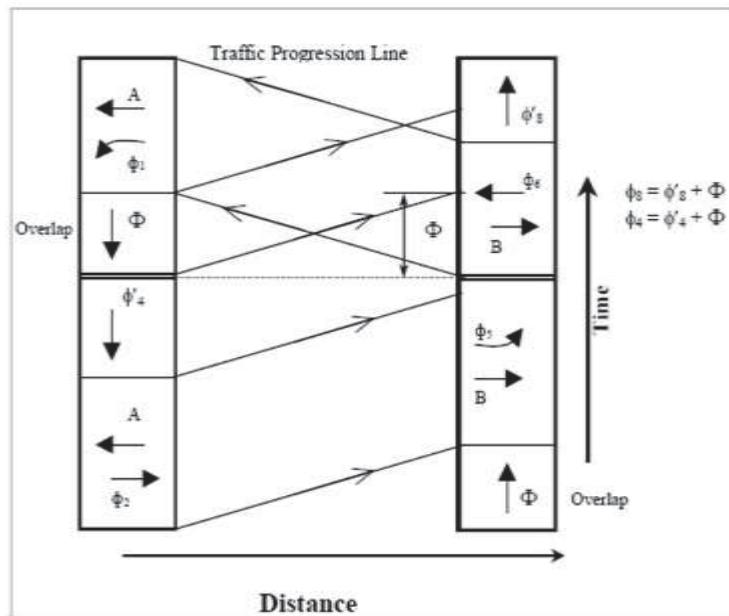


FIGURA 6. DIAGRAMA DE PROGRESIÓN DE CUATRO FASES.  
Fuente: ZONGZHONG (2004)

#### 4.1.2 Sistema de operación de tres fases

En el caso de la operación mediante el uso del sistema de señales tipo tres fases, todos los movimientos corren simultáneamente y este tipo es más eficiente que la TTI cuando el almacenamiento es adecuado solo la fase adicional es el giro izquierdo interior, se provee una gran flexibilidad en la asignación de los tiempos verdes y también permite generalmente ciclos cortos, esta opción de fase solo funciona cuando el interior de la intersección es suficientemente grande para mantener todo los giros izquierdos.

Aquí se le da prioridad a los cruces frontales los cuales tienen fases simultáneas. Al relegarse a un segundo plano los giros izquierdos estos se tornan lentos. Dado que en este tipo de operación las fases para los cruces frontales son simultáneas no hay problemas de almacenamiento.

A diferencia de un cruce típico con tres fases, en esta operación se permite aliviar los giros a la izquierda por el interior y mantener cruces frontales, este comportamiento es conocido como una fase secuencial Lag-Lag [19], donde se retrasan los giros izquierdos respecto a los movimientos en ambos lados de la intersección haciendo énfasis en la progresión del tráfico a través de la vía arterial, este funcionamiento mantiene progresivo el tráfico a través de la vía arterial permitiendo que el tráfico que atraviesa la intersección no pare.

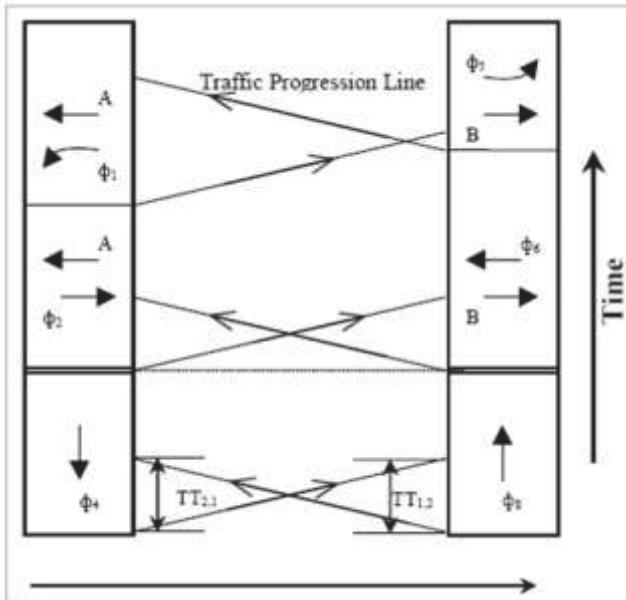


FIGURA 7. DIAGRAMA DE PROGRESIÓN DE TRES FASES.

Fuente: ZONGZHONG (2004)

Se puede decir entonces que este sistema es apropiado cuando los caminos que llegan tienen demanda de tráficos balanceados y existe un gran espacio para almacenar los vehículos que harán el giro izquierdo [19].

#### 4.1.3 Sistema de operación Lead - Lag

Cuando las divisiones resultantes del sistema de operación de cuatro fases no resultan eficientes, causan mucha congestión, y el almacenamiento es inadecuado para el sistema de operación de tres fases, el sistema de operación Lead-Lag puede presentarse como una alternativa de solución.

En este caso el giro izquierdo con mayor volumen de tráfico es usualmente mejor atendido por el giro izquierdo retardado de este sistema de operación, estos giros tendrían la menor de las esperas y estarían completamente vacíos antes de que los giros de las rampas de entrada sean atendidos.

Adicionalmente la operación de las fases de los cruces frontales no son en simultáneo, sino que se inicia primero la fase de la segunda intersección para aliviar el interior de la intersección.

### 5 CARACTERIZACIÓN CIUDADES COLOMBIANAS

La movilidad urbana en las ciudades colombianas ha crecido enormemente en las últimas décadas, correspondiendo esto con la evolución socioeconómica del país, debe añadirse a esto la peculiaridad del fenómeno de desplazamiento de población que llega a las ciudades como consecuencia del conflicto armado que se ha venido desarrollando desde hace más de 40 años, encontrándose que los efectos del desplazamiento forzado han generado la movilidad de 2'500.000 colombianos de los campos a las ciudades en los últimos 15 años, según cifras de CODHES [3].

En nuestra actual sociedad, en donde la mayor proporción de la población es pobre, teniendo la posibilidad de observar diferentes tipos de pobladores, los formales, los de bajos recursos sin oportunidad de empleo y un nuevo conjunto de pobladores conformado por legiones de personas en la informalidad laboral.

Toda esta población vive en y del espacio público y consume una importante parte de su tiempo en desplazamientos, “pocas veces predecibles o recurrentes, pero su movilidad debe ser considerada en su medida, como un problema de justicia social y oportunidades” [4].

En las ciudades del Nor – oriente de Colombia se presenta una tasa promedio de 2,5 viajes/persona/día por todos los motivos, estimaciones que son cortas si se tiene en cuenta la dificultad de contabilizar los viajes a pie producidos por el amplio sector informal que se ha generado por el fenómeno migratorio anteriormente mencionado. Puede decirse que “la movilidad actual en las ciudades colombianas debería encontrarse en torno a los 3,0 viajes/persona/día, el cual es el valor que toma como referencia las instrucciones más recientes para estudios de movilidad urbana en Europa” [4].

Se tiene entonces que en lugar de contribuir al desarrollo urbano planificado, la evolución del transporte ha contribuido a patrones de crecimiento desordenados y ha

incrementado los niveles de congestión, accidentalidad y contaminación. Examinando el crecimiento de la población y el incremento del parque automotor a lo largo de los últimos 18 años, se observa en la Tabla 2 cómo la población colombiana ha crecido en un 35% entre 1.988 y 2.007, mientras que el número de vehículos lo ha hecho en más de un 200%, obteniéndose que la evolución del grado de motorización ha crecido espectacularmente presentando un factor de crecimiento de 2,65 [3].

TABLA II  
EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN Y GRADO DE MOTORIZACIÓN EN COLOMBIA

AÑO	POBLACIÓN	VEHÍCULOS	GRADO DE MOTORIZACIÓN (Vehículos por cada 1000 hab.)
1.988	32.528.094	1.427.695	43,89
1.989	33.507.034	1.498.265	44,71
1.990	34.485.973	1.548.958	44,92
1.991	35.464.912	1.612.259	45,46
1.992	36.443.852	1.685.699	46,25
1.993	37.422.791	1.867.333	49,90
1.994	38.145.051	2.043.684	53,58
1.995	38.881.250	2.206.319	56,75
1.996	39.631.658	2.331.238	58,82
1.997	40.396.549	2.479.504	61,38
1.998	41.176.202	2.603.345	63,22
1.999	41.970.903	2.662.818	63,44
2.000	42.780.941	2.723.178	63,65
2.001	43.070.704	2.788.309	64,74
2.002	43.834.115	3.081.423	70,30
2.007	44.000.000	5.112.604	116,20

Fuente: DANE, 2008

Si se analiza más de cerca el comportamiento que ha presentado el departamento de Santander en donde se encuentra ubicado al ciudad de Bucaramanga, sitio del caso de estudio de esta investigación, esta ha mostrado un comportamiento muy similar al del país, con un aumento aproximado de 70% de su parque automotor en el periodo comprendido entre 1990 y 2009; sin embargo, el incremento de la población en el mismo periodo no fue superior al 15%, lo que demuestra un alto crecimiento en la tasa de motorización.

En la siguiente tabla se muestra la variación en el parque automotor tipo automóvil por cada mil habitantes desde 1990 hasta 2009:

TABLA III  
NIVEL DE MOTORIZACIÓN AUTOMÓVILES DEPARTAMENTO DE SANTANDER - COLOMBIA

AÑO	Población Santander	Santander	
		Total	Veh_1000hab
1990	1'704.364	24.936	15
1991	1'731.440	26.050	15
1992	1'757.500	27.708	16
1993	1'782.192	30.781	17
1994	1'805.220	34.183	19
1995	1'826.363	37.602	21
1996	1'845.474	40.575	22
1997	1'862.886	43.827	24
1998	1'878.719	47.324	25
1999	1'893.116	48.507	26
2000	1'906.247	49.939	26
2001	1'917.638	51.666	27
2002	1'928.234	53.910	28
2003	1'938.274	56.677	29
2004	1'948.027	58.503	30
2005	1'957.789	61.515	31
2006	1'968.485	65.226	33
2007	1'979.090	70.732	36
2008	1'989.609	77.386	39
2009	2'000.045	83.962	42

Fuente: Datos tomados del DANE y del Ministerio de Transporte

## 5.1 Caso de uso ciudad de Bucaramanga

El área metropolitana de Bucaramanga conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta se constituye en el conglomerado urbano comercial, industrial y financiero más sobresaliente del nororiente colombiano con una población equivalente a 51% del total del departamento de Santander, siendo el municipio de Bucaramanga el eje estructurante de esta área metropolitana y la región, concentrando la mayor intensidad de actividades de servicios y empleo existentes.

Para el caso de esta investigación se seleccionó una intersección típica de la ciudad de Bucaramanga ubicada en el cruce formado por la carrera 27, que corresponde a una vía de doble calzada con tres carriles y la calle 56, una vía de dos carriles en cada sentido, que se constituyen en dos arterias principales de la ciudad, permitiendo su conexión directa con otros corredores de gran importancia como lo son la carrera 33, el Viaducto La Flora, Avenida González Valencia, Carrera 36, Intercambiador de la Puerta

del Sol, Viaducto García Cadena, Par Vial Carreras 21 y 22, y la Carrera 15, entre otros, en la figura 8 se puede apreciar encerrado en un círculooscuro la ubicación de esta intersección.

La justificación del porque se escogió esta intersección es porque aparece como punto de paso obligatorio para realizar la conexión directa entre el oriente y occidente de la ciudad, convirtiéndose en un punto de conflicto debido a los altos flujos que se manejan en las horas pico, alrededor de 2,100 Veh/hora además de la presencia de un sistema semafórico que maneja tres fases, de las cuales una corresponde a un giro izquierdo, provocando la aparición de largas colas, dichas fases presentan tiempos de ciclo de 60 segundos para el paso del flujo en el sentido sur – norte y norte – sur, 20 segundos para la fase que contiene el giro izquierdo en este caso es en el sentido oriente – sur y para el sentido oriente – occidente, para la tercera fase se maneja un tiempo de 25 segundos para los flujos occidente – oriente y oriente – occidente, lo que muestra el escaso tiempo que se presenta para el giro izquierdo para flujos que en horas pico llegan a los 1,250 Veh/hora [15].



FIGURA 8. LOCALIZACIÓN DE INTERSECCIÓN CASO DE ESTUDIO.

Fuente: Elaboración propia de los autores

### 5.1.1 Parámetros usados para la simulación

Para medir la efectividad de la aplicación del concepto de las intersecciones diamantes, se estableció una simulación utilizando el software TRANSMODELER 2.0 desarrollado por CALIPER CORPORATION, que permite manejar diferentes parámetros como son

número y anchos de carriles, separadores, número y tipo de vehículos, circulación de peatones y unos de los parámetros más importantes para este análisis los tiempos y ciclos semafóricos.

Para esta intersección se conservaron los anchos de carril existentes de 3,30 m para el caso de la carrera 27 y 3,25 m para los carriles de la calle 56, el proceso de simulación se estableció para la hora pico de mediodía 11:45 AM – 12:45 PM que corresponde a la hora más cargada encontrada en este sector manejando los flujos que se muestran en la tabla 4.

Se establecieron cuatro escenarios de simulación, en los cuales se encontraba la situación actual, que se utilizó como instrumento para la calibración del modelo base, un primer escenario corresponde a la situación actual, un segundo escenario con la aplicación del concepto de DI, un tercer escenario utilizando la DDI y un cuarto escenario utilizando una solución a desnivel que fue propuesta para esta intersección en el año 2007 por un grupo consultor de la ciudad, que consistía en una glorieta a desnivel que permitía la eliminación de la intersección semaforizada, en la figura 9 se muestra esta opción.

TABLA IV  
FLUJOS VEHICULARES INTERSECCIÓN CARRERA 27 CON CALLE 56

SENTIDO	VEHICULOS EQUIVALENTES
Oriente - Norte	125
Oriente - Occidente	875
Oriente - Sur	1155
Occidente - Oriente	330
Occidente - Sur	115
Sur - Oriente	95
Norte - Sur	1465
Sur - Norte	895

Fuente: Inventario de tráfico convenio UIS – Alcaldía de Bucaramanga 2009



FIGURA 9. ALTERNATIVA PARA ESCENARIO DE SIMULACIÓN 4.  
Fuente: Área Metropolitana De Bucaramanga – ETA S.A.

Para la operación semafórica se usaron 2 diferentes ciclos dependiendo de si el sistema usado era una DI o una DDI.

TABLA V  
TIEMPOS SEMAFÓRICOS ESCENARIO 2

FASE Ø	TIEMPO VERDE (seg)
1	18 a 65
2	17 a 64
3	71 a 95
4	70 a 119
5	124 a 112
6	101 a 10
7	18 a 102
8	18 a 87

Fuente: Sharma, 2006

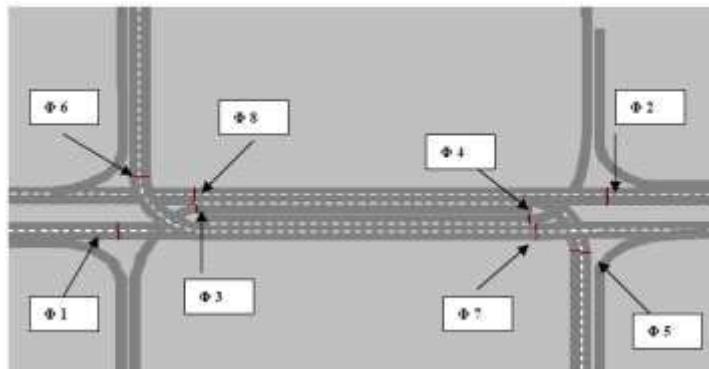


FIGURA 10. ALTERNATIVA ESCENARIO DE SIMULACIÓN 2.

Fuente: SHARMA, 2006

TABLA VI  
TIEMPOS SEMAFÓRICOS ESCENARIO 3

FASE Ø	TIEMPO VERDE (seg)
1	70 a 23
2	28 a 65
3	60 a 30
4	35 a 55
5	28 a 65
6	60 a 30

Fuente: Edara, 2003

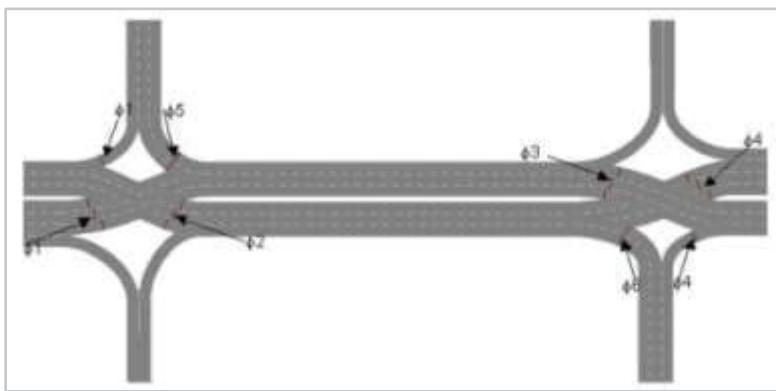


FIGURA 11. ALTERNATIVA ESCENARIO DE SIMULACIÓN 3.

Fuente: EDARA, 2003

## 6 RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones se muestran en la tabla 7, donde se puede observar los tiempos de demora por vehículo, demoras por paradas, en la tabla 8 se pueden observar las velocidades promedio y niveles de servicio que se presentan en cada uno de los corredores que conforman esta intersección, realizando una proyección de los flujos con base en las tasas de crecimiento anual que ha venido presentando la ciudad en los últimos años, que oscilan alrededor del 3,84% [15] para períodos posteriores a la implementación de cada medida.

TABLA VII  
RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA ESCENARIO DE SIMULACIÓN

CRITERIO EVALUADOR	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
Total demoras (hr)	169,40	56,10	37,10	30,25
Demoras / Vehículo (Seg)	79,70	80,20	26,70	12,45
Demoras por parada (Seg)	132,60	83,40	19,70	11,15
Demoras por parada / Vehículo (Seg)	62,40	62,50	14,20	10,15
Total paradas	7.706	6.755	4.205	2.045

Fuente: Elaboración propia de los autores

TABLA VIII  
RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA ESCENARIO DE SIMULACIÓN

ALTERNATIVA	TRAMO EN ANALISIS	ACTUAL		5 AÑOS		10 AÑOS		20 AÑOS	
		NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)
Escenario 1	Calle 56	E	16,7	F	12,7	F	10,4	F	8,4
	Carrera 27 (Norte - Sur)	E	16,3	E	15,4	F	13,2	F	11,1
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	19,5	E	18,2	E	16,8	F	13,5
Escenario 2	Calle 56	D	23,2	E	19,4	E	17,6	F	15,6
	Carrera 27 (Norte - Sur)	D	20,1	E	18,9	E	17,1	F	14,7
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	20,4	E	19,9	E	18,1	F	15,5
Escenario 3	Calle 56	D	20,3	E	16,4	F	13,6	F	12,8
	Carrera 27 (Norte - Sur)	D	21,8	D	20,3	E	18,1	F	15,5
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	22,2	D	21,1	E	19,5	F	15,9
Escenario 4	Calle 56	D	22,4	D	20,5	E	18,5	E	8,4
	Carrera 27 (Norte - Sur)	D	21,5	E	19,8	E	16,4	F	11,1
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	20,5	E	18,8	F	15,6	F	13,5

Fuente: Elaboración propia de los autores

Los resultados dejan ver que la situación actual de funcionamiento de la intersección es deficiente ya que se están presentando niveles de servicio E y velocidades relativamente bajas, al realizar la comparación de los escenarios 2 y 3 que corresponden a la aplicación del concepto de intersección diamante, se observa que es mucho más eficiente la implementación del tipo DDI, ya que el número de paradas y demoras es mucho menor que para el caso de la DI convencional, al realizar la comparación de los escenarios 2 y 3 con el escenario 4 con base en los resultados que se muestran en la tabla 6 se observa que es más eficiente el esquema propuesto en el escenario 4, ya que los tiempos por parada y por número de vehículos son los menores de los cuatro escenarios, si se hace la comparación con los resultados de la tabla 8 la diferencia entre los tres escenarios no difiere mucho, pero si presentan un gran alivio y mejoramiento en las velocidades y niveles de servicio con relación a la situación actual donde no hay ningún tipo de alternativa de solución.

Al analizar los escenarios 2 y 3 se observa que este último ofrece mejores condiciones de operación para las condiciones dadas en la intersección caso de estudio, esto se debe en parte al uso del sistema de cuatro fases que aplica para intersecciones donde se quiere mantener el verde continuo para la arteria principal.

## 7 CONCLUSIONES

Aunque el concepto de intersección diamante se ha venido usando desde los años 70 en Europa y ha sido de implementación más reciente en ciudades norteamericanas, para el caso de ciudades latinoamericanas resulta ser un concepto novedoso, que puede convertirse en una alternativa eficaz para la solución de conflictos viales.

Es por ello que esta investigación buscó establecer las condiciones de operación de una intersección tipo diamante adaptada a los parámetros de funcionamiento de una ciudad colombiana, permitiendo obtener resultados positivos en cuanto a velocidades y niveles de servicio en los corredores que conforman dicha intersección.

La implementación de este tipo de soluciones trae consigo una serie de ventajas en cuanto a operación en relación con otras alternativas a desnivel, que pueden ofrecer mejores resultados operacionales pero que implican un costo mucho mayor, además de una afectación predial que en algunos casos resulta siendo uno de los principales impedimentos para el desarrollo de proyectos de infraestructura en ciudades colombianas.

Debe buscarse en investigaciones futuras profundizar más en el tema del manejo peatonal y optimización del sistema de operación semafórico, que permitan hacer más eficiente la implementación de este tipo de intersecciones, además complementarlo con una análisis de seguridad vial y análisis de costos que permita darle todo el soporte para la posible implementación real en un futuro no muy lejano.

## 8 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados de la investigación titulada *Determinación de la viabilidad de la implementación de una intersección tipo diamante divergente en ciudades colombianas*, el cual es financiado por la Universidad Industrial de Santander y el Grupo de Investigación GEOMATICA adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de fisicomecánicas de la Universidad Industrial de Santander.

## REFERENCIAS

- [1] Branks, J H. (1991). The two-capacity phenomenon: some theoretical issues. *Transportation Research Board*. 00621702, 234 -241.
- [2] Chlewicki, Gilbert, C. (2003) New Interchange and Intersection Designs: The Synchronized Split-Phasing Intersection and the Diverging Diamond Interchange. 2nd Urban Street Symposium (Anaheim, California). 28-30, Julio, (paper).
- [3] CODHES, ACNUR. (2005). Desplazamiento forzado interno en Colombia: Conflicto, Paz y Desarrollo. Bogotá. Colombia. Citado en TORRES, C. Ciudad Informal y Movilidad.
- [4] Duque, G. (2006). Movilidad y Desarrollo en el Eje Urbano y Periurbano de Manizales. Fundamentos de Economía y Transportes. Madrid. Pag 389.
- [5] Edara, K. Praveen yBared, G. Joe. (2003). Diverging Diamond Interchange and Double Crossover Intersection – Vehicle and Pedestrian Performance, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University. Pag 143.
- [6] Haj – Salem, Habib y Poirier, Philippe (2001). ALINEA: a local Traffic Responsive Strategy for Ramp Metering: Field Results on A6Motorway in Paris. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings - Oakland (CA), USA - 25-29 agosto, (paper).
- [7] Escobar García, Diego Alexander. (2008). Instrumentos y metodología de planes de movilidad y transporte en las ciudades medias colombianas, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- [8] Mahendrad, Khumar, Ashow (2009). Application of nontraditional interchange treatments to improve quality of service and preserve the service life of narrow over- and underpass roadways, The Faculty of the Graduate School Tennessee Technological University. Thesis Master of science.

- [9] Mirchandani, Pitu y Head, Larry. (2000). Real Time Traffic Signal Control system: Architecture, Algorithms and Analysis, Department of Systems and Industrial Engineering, University of Arizona. Tucson – Arizona. Pág 98.
- [10] Sharma, Siddhartha y Chatterjee, Indrajit (2005). Comparative Analysis of Conventional Diamond Interchange and Contra Flow Left Turn (CFL) Interchange, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Missouri, Columbia. Pág 208.
- [11] Siromaskul, P.E, Smith, (2007). Diverging Diamond Interchanges: Oregon's Planned Applications. Presentation for the ITE District 6 Meeting, Portland, OR, Julio.
- [12] Stanek, P.E, David. (2006). Innovative Diamond Interchange Designs: How to Increase Capacity and Minimize Cost. Roseville CA. Pág 12.
- [13] Sunkari, R. Srinivasa. (2000) Urbanik. Signal design manual for diamond interchanges, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, Austin-Texas. 12, Pag 231.
- [14] Sunkari, R. Srinivasa. (2000) Urbanik. Signal design manual for diamond interchanges, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, Austin-Texas. 12, Pag 244, pag 256.
- [15] Universidad Industrial de Santander, Escuela de ingeniería civil (2010). Plan maestro de movilidad Bucaramanga 2010 – 2030. Bucaramanga.
- [16] Vamp, Gerard B. (1993). A primer on diamond interchanges. The first meeting of IVHST Texas. Texas, USA. 15 – 17, Noviembre.
- [17] Zimmerman, Karl y Bonneson, James. (2008) DEVELOPMENT OF A TRAFFIC SIGNAL OPERATIONS HANDBOOK, Texas Transportation Institute the Texas A&M University System.
- [18] Zagrawal, Ashish.y Hickman Mark. (2004). Automated Extraction of Queue Lengths from Airbone Imagery. Intelligent Transportation Systems Conference, Washington D.C. Pág 53.

- [19] Zongzhong, Tian. (2004). Modeling and Implementation of an Integrated Ramp Metering-Diamond Interchange Control System; Department of Civil and Environmental Engineering University of Nevada, Reno, USA.