

**ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD VIAL PARA EL DEPARTAMENTO
DEL VALLE DEL CAUCA**

JACKELINE MURILLO HOYOS

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2007**

**ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD VIAL PARA EL DEPARTAMENTO
DEL VALLE DEL CAUCA**

JACKELINE MURILLO HOYOS

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Civil**

**Director
CIRO JARAMILLO MOLINA
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2007**

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

Ciro Jaramillo Molina, Ingeniero Civil y Director de la Investigación, quien respaldó plenamente el desarrollo del proyecto con el aporte de sus conocimientos y su dedicación.

Al Grupo de Investigación en Transporte, Tránsito y Vías de la Universidad del Valle – GITTV por el continuo acompañamiento de sus integrantes con sus aportes y contribuciones y por facilitar los medios y herramientas indispensables para el desarrollo del proyecto.

Al Grupo de Investigación SIGMA de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, y en especial a la profesora Maria Fernanda García por sus aportes.

Oficina de Planeación Departamental, Gobernación del Valle del Cauca por la disponibilidad e interés en colaborar con el proyecto.

.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEÓRICO.....	15
3.1. NIVELES DE ACCESIBILIDAD	19
3.1.1. Accesibilidad Relativa (a_{ij}).....	19
3.1.2. Accesibilidad Integral (A_i).....	19
3.1.3. Accesibilidad Global (A)	20
3.2. MEDIDAS DE ACCESIBILIDAD.....	20
3.2.1. Medidas Topológicas	21
3.2.2. Medidas Agregadas	25
3.2.3. Medidas Desagregadas	¡Error! Marcador no definido.
3.3. USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	¡Error!
Marcador no definido.	
4. METODOLOGÍA.....	¡Error! Marcador no definido.
4.1. DEFINICIÓN DEL ESCENARIO.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2. RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.

- 4.4. CÁLCULO DE LOS NIVELES DE ACCESIBILIDAD; **Error! Marcador no definido.**
- 4.4.1. Matrices de Conectividad.....; **Error! Marcador no definido.**
 - 4.4.2. Indicadores de Densidad de Kansky, β , γ , α; **Error! Marcador no definido.**
 - 4.4.3. Factor de Ruta, r_{ij} - Factor de Ruta Integral, R_i ; **Error! Marcador no definido.**
 - 4.4.4. Índice de Trazado Velocidad, ltv_i ; **Error! Marcador no definido.**
 - 4.4.5. Indicador Absoluto de Tiempo Global, T_i; **Error! Marcador no definido.**
 - 4.4.6. Indicador de Gravedad.....; **Error! Marcador no definido.**
- 4.5. EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD ANTE ESCENARIOS FUTUROS.....; **Error! Marcador no definido.**
- 4.5.1. Índice de Trazado – Velocidad para Escenario 1; **Error! Marcador no definido.**
 - 4.5.2. Índice de Trazado – Velocidad para Escenario 2; **Error! Marcador no definido.**
 - 4.5.3. Indicador Absoluto de Tiempo Global para Escenarios Futuros.....; **Error! Marcador no definido.**
- 4.6. IDENTIFICACIÓN DE FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACIÓN O INVESTIGACIÓN.....; **Error! Marcador no definido.**
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES; **Error! Marcador no definido.**
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....; **Error! Marcador no definido.**

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1	Matriz de Conectividad, C.....	17
Tabla No. 2	Matriz de Conectividad de Segundo Grado, C ²	18
Tabla No. 3	Matriz C + C ²	18
Tabla No. 4	Características de la red vial	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 5	Peso bruto ponderado (Ton) por tipo de vehículo	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 6	Composición vehicular de la red vial – Año 2004	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 7	Carga Transportada por tipo de Camión (Ton) – Año 2004	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 8	Pasajeros Movilizados por la red vial – Año 2004	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 9	Matriz de Conectividad, C.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 10	Matriz de Conectividad de Segundo Grado, C ²	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 11	Matriz C + C ²	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 12	Síntesis de Conectividad de la Red	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 13	Agrupación por arcos que confluyen en los nodos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 14	Agrupación por caminos de dos arcos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 15	Indicadores de Densidad de Kansky	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 16	Matriz de distancias sobre la red (km)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla No. 17	Matriz de distancias en línea recta (km)	¡Error! Marcador no definido.

- Tabla No. 18 Factor de Ruta, r_{ij}; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 19 Factor de Ruta Integral, R_i; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 20 Matriz de tiempos sobre la red (min).....; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 21 Matriz de tiempos en línea recta (min); **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 22 Índice Trazado - Velocidad, Itv_{ij}; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 23 Índice Trazado Velocidad, Itv_i; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 24 Tiempo global por núcleo; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 25 Número de habitantes por núcleo; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 26 Cálculo de a_{ij} (millones de habitantes/kilómetro); **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 27 Indicador de Gravedad; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 28 Accesibilidad para diferentes valores de impedancia; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 29 Resumen de los Indicadores de Accesibilidad calculados; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 30 Posición que ocupa cada municipio por indicador; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 31 Jerarquización de mayor a menor Nivel de Accesibilidad; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 32 Matriz de tiempos sobre la red (min) – Escenario 1; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 33 Índice Trazado - Velocidad, Itv_{ij} – Escenario 1; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 34 Índice Trazado Velocidad, Itv_i – Escenario 1; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 35 Matriz de tiempos sobre la red (min) – Escenario 2; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 36 Índice Trazado - Velocidad, Itv_{ij} – Escenario 2; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla No. 37 Índice Trazado Velocidad, Itv_i – Escenario 2; **Error! Marcador no definido.**

Tabla No. 38 Índice Trazado Velocidad para escenarios futuros; **Error! Marcador no definido.**

Tabla No. 39 Pérdida de Accesibilidad Índice Trazado Velocidad Actual vs Escenarios futuros; **Error! Marcador no definido.**

Tabla No. 40 Tiempo global por núcleo para escenarios futuros; **Error! Marcador no definido.**

Tabla No. 41 Pérdida de Accesibilidad por municipio según Índice Tiempo Global; **Error! Marcador no definido.**

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1	Esquema de grafo	17
Figura No. 2	Accesibilidad Relativa (a_{ij})	19
Figura No. 3	Accesibilidad Integral (A_i)	20
Figura No. 4	Red vial seleccionada.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 5	Nivel de Servicio para la red vial seleccionada	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 6	Tránsito Promedio Diario Semanal – Año 2004	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 7	Porcentaje de Autos – Año 2004.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 8	Porcentaje de Buses – Año 2004.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 9	Porcentaje de Camiones – Año 2004	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 10	Parámetros operacionales (ArcGIS®)–Composición Vehicular	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 11	Parámetros operacionales (Excel®)–Composición Vehicular.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 12	Parámetros operacionales (ArcGIS®)–Carga Transportada.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 13	Parámetros operacionales (Excel®)–Carga Transportada	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 14	Carga Transportada en Camiones – Año 2004	¡Error! Marcador no definido.
Figura No. 15	Parámetros operacionales (ArcGIS®)–Pasajeros Movilizados	¡Error! Marcador no definido.

- Figura No. 16 Pasajeros Movilizados en Autos – Año 2004; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 17 Pasajeros Movilizados en Buses – Año 2004; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 18 Pasajeros Movilizados – Año 2004; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 19 Reporte de parámetros operacionales (ArcGIS®)–TPDS, %A; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 20 Reporte de parámetros operacionales (ArcGIS®)–Carga Transportada; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 21 Curvas de Isoaccesibilidad - Factor de Ruta; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 22 Modelo Digital de Accesibilidad - Factor de Ruta; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 23 Curvas de Isoaccesibilidad - Índice Trazado Velocidad; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 24 Modelo Digital de Accesibilidad – Índice Trazado Velocidad; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 25 Tiempo global por núcleo; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 26 Curvas de Isoaccesibilidad - Indicador de Gravedad; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 27 Modelo Digital de Accesibilidad – Indicador de Gravedad; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 28 Variación de la accesibilidad para diferentes impedancias; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 29 Resumen de los Indicadores de Accesibilidad calculados; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 30 Curvas de Isoaccesibilidad–Índice trazado velocidad–Escenario 1. ; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 31 Modelo Digital de Accesibilidad–Índice trazado velocidad–Escenario 1; **Error! Marcador no definido.**
- Figura No. 32 Curvas de Isoaccesibilidad–Índice trazado velocidad–Escenario 2. ; **Error! Marcador no definido.**

Figura No. 33 Modelo Digital de accesibilidad–Índice trazado velocidad–Escenario 2**¡Error! Marcador no definido.**

Figura No. 34 Índice Trazado - Velocidad Actual vs Escenarios futuros**¡Error! Marcador no definido.**

Figura No. 35 Indicador Tiempo global (hr) Actual vs Escenarios futuros**¡Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

El departamento del Valle del Cauca se encuentra localizado en el suroccidente de Colombia. Este departamento tiene una extensión de 21.195 km², que constituyen el 1,85% del territorio nacional. En el año 2005 la población era de 4.060.196 habitantes, y es el departamento más urbanizado del país con una densidad de 192 habitantes por km². Su infraestructura de transporte esta constituida por un aeropuerto internacional, un puerto marítimo, una red vial que se extiende por todo el departamento y una red férrea con oportunidades de desarrollo.

Con el propósito de efectuar un análisis de accesibilidad vial para el departamento del Valle del Cauca en un año determinado (2004) y verificar la sensibilidad de dicha accesibilidad en un escenario futuro, se plantean medidas topológicas y agregadas, usando indicadores de densidad de Kansky, absolutos de tiempo y relativos de trazado, como el factor de ruta, el trazado-velocidad y el indicador de gravedad. Estos indicadores fueron representados en curvas de iso-accesibilidad para facilitar su visualización e interpretación. La red vial seleccionada para el análisis se definió con corredores de un flujo vehicular semanal de camiones mayor a 5000 vehículos. Con estos corredores se construyó la cartografía digital georreferenciada de la red vial, para definir el nivel de conexión entre los núcleos urbanos. Además, se incorporó una base de datos con la descripción general de cada corredor.

El análisis de los indicadores evaluados dio como resultado que el departamento del Valle del Cauca cuenta con niveles adecuados de accesibilidad vial. El modelo planteado permitió identificar pérdidas de aproximadamente el 50% de dichos niveles, con la definición de escenarios tendenciales y pesimistas.

ABSTRACT

The Valle del Cauca department is located in the southwest of Colombia. This department has a total area of 21.19 km², which represents a 1,85% of the national territory. In 2005 its population was 4.060.196 habitants and, is the most urbanized department of the country, with a density of 192 habitants/km². Its transportation infrastructure is conformed by an international airport, a maritime port, a vial network that goes along the whole department and, a railroad with great development opportunities.

With the purpose of making an analysis of vial accessibility for the department in 2004 and to verify the sensibility to it in a future stage, it is stated topologics measures by using Kansky density indicators, absolute in time and relative to layout, as it is the route factor, the layout speed an the gravity indicators. These indicators were represented through iso-accesibility curves to facilitate their visualization and interpretation. The selected network for the analysis was defined with roads from a weekly vehicular flow of trucks of more of 5.000 vehicles. Using this roads, it was made the geo-referenced digital cartography of the vial network in order to define the level of connection between urban nodes. Moreover, it was incorporated a database with the general description of each road.

The analysis of the evaluated indicators showed that the Valle del Cauca department enjoys of adequate level of vial accessibility. The proposed model led us to identify losses of about 50% of those levels, with the definition of tendenciales and pessimist stages.

1. INTRODUCCIÓN

El departamento del Valle del Cauca cuenta administrativamente con 42 municipios, en los que cerca del 80% de la población se concentra en los centros urbanos y el 20% en las áreas rurales. Es un departamento relativamente pequeño dentro del contexto nacional porque el promedio de la superficie en Colombia supera los 35.500 km², mientras este sólo alcanza los 21.195 km², aproximadamente el 1,85% del territorio nacional. Limita por el norte con los departamentos de Quindío y Risaralda, por el oriente con los departamentos de Quindío y Tolima, por el sur con el departamento del Cauca, y por el occidente con el Océano Pacífico y el departamento del Chocó. Dentro de las infraestructuras de transporte con las que cuenta el departamento se destacan el principal puerto del país que es el que más transporta carga, un aeropuerto internacional que está operando al 70% de su capacidad, una red vial densa distribuida en todo el departamento y una red férrea en potencial desarrollo¹.

Topográficamente el relieve cuenta con tres regiones naturales: La región montañosa dominada por las cordilleras Central y Occidental. La región del valle del Río Cauca que se extiende a ambos costados del mismo, con 22 Kilómetros de ancho en su parte sur y de 6 a 8 Km en la norte, constituye una de las zonas agrícolas más importantes del país. Por último la región de la costa pacífica, polo de exportación y fuente de riqueza pesquera por medio del puerto de Buenaventura, principal vitrina de Colombia en el Océano Pacífico².

¹ Gobernación Valle del Cauca. (2006). <http://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones.php?id=279>.

² Ibid.

El favorecer la competitividad de una región y la nación requiere el aprovechamiento eficiente de su situación geoestratégica, de su infraestructura física y de servicios, en este sentido, la infraestructura de transporte y su esquema de operación son determinantes del nivel de competitividad. El aumento del desarrollo de comercio puede beneficiar la economía, pero el transporte ha generado una gran complicación debido al tráfico generado por éste en todas las modalidades.

La accesibilidad es una medida de la facilidad o dificultad de comunicación de un punto con respecto a otros puntos de un territorio, utilizando uno o varios modos de transporte³. Por lo tanto la accesibilidad es una valiosa herramienta de planificación para las infraestructuras viales actuales y las propuestas por los programas de actuación. De acuerdo a los antecedentes reconocidos para efectuar evaluaciones de accesibilidad es conveniente definir el sistema de transporte regional como un sistema cerrado y los núcleos de población se consideran puntuales, es decir, todos los enlaces y comunicaciones se realizan dentro del sistema, el cual se aísla para estudiarlo por separado y poder analizar su funcionamiento interno. Es evidente que este sistema se encuentra integrado en uno mayor que es la red nacional por lo que habría que estudiar en futuras investigaciones cómo interacciona el sistema regional de transporte con los de su entorno.

Las actuaciones en infraestructura de transportes modifican el marco territorial, ya que producen una reducción de distancias y una concentración del espacio, de esta manera el espacio geográfico no se concibe como un todo absoluto, sino como un marco en el que las condiciones de accesibilidad se alteran constantemente. En este ámbito el análisis de los indicadores de accesibilidad resulta ser una herramienta útil en la planificación para medir el impacto de una o varias actuaciones en una red de transporte, este aspecto se ha convertido en un elemento importante para la planificación de infraestructuras de transporte, pero se tienen pocos antecedentes a nivel latinoamericano.

³ Izquierdo, R., et al. (1991). Transportes un Enfoque Integral. España.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Construir un modelo de evaluación de la accesibilidad vial en el departamento del Valle del Cauca considerando como plataforma exportadora de Colombia hacia la Cuenca del Pacífico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir el escenario de actuación del proyecto en medio informático.
- Elaborar un diagnóstico de las características de operación.
- Definir una metodología de análisis por indicadores de accesibilidad.
- Evaluar la accesibilidad en la región con los indicadores seleccionados.
- Analizar la sensibilidad ante probables actuaciones en la red del departamento.
- Iniciar nuevas líneas de investigación en el área de transporte y tránsito en el Grupo de Investigación en Transporte, Tránsito y Vías - GITTIV de la Universidad del Valle.

3. MARCO TEÓRICO

El proceso de planificación se trata de un proceso racional, que proporciona información objetiva acerca de los efectos que un proyecto de transporte propuesto ejercerá sobre la comunidad y los usuarios esperados. Este proceso es flexible para que sea aplicado en cualquier proyecto o sistema de transporte, finalmente el proceso de planificación del transporte no está pensado para proporcionar una decisión o para dar un solo resultado que debe seguirse, en lugar de ello, el proceso está pensado para dar información apropiada a los profesionales que tendrán la responsabilidad de decidir si el proyecto de transporte debe continuar.

La accesibilidad permite explicar las posibilidades de interacción entre los distintos puntos de un territorio, pero hay que tener en cuenta que más infraestructura de transportes no significa necesariamente más accesibilidad, siendo posible incrementar las condiciones de accesibilidad con la planeación estratégica en la asignación de recorridos a los arcos de tal forma que proporcionen mayores posibilidades de conexión a los nodos. Con los análisis de accesibilidad se pueden identificar regiones con menores posibilidades de movilidad, comparar los planes alternativos de transporte, encontrar un equilibrio territorial, evaluar impactos y consecuencias entre diversas alternativas de inversión.

Las infraestructuras de transportes, en tanto que modifican las condiciones de accesibilidad, constituyen un elemento clave en las políticas de desarrollo regional, puesto que las nuevas inversiones pueden resolver problemas de congestión, pero también pueden orientarse a potenciar regiones menos favorecidas. Las infraestructuras

de transportes y comunicaciones reducen el costo espacial de la distancia e influyen sobre la localización y la accesibilidad, contribuyendo a la modificación de los asentamientos y de la estructura económica sectorial de una región.

La accesibilidad se puede definir como una medida de la facilidad de comunicación entre actividades o asentamientos humanos, utilizando un determinado sistema de transporte⁴, también permite medir la facilidad o dificultad aportada por las infraestructuras y medios de transporte para la realización de un viaje considerando la potencialidad del origen para generar un viaje y la capacidad del destino para atraer un viaje. Las unidades usualmente empleadas son distancia, tiempo y costo de viaje.

Para efectuar los análisis de accesibilidad se emplea la teoría de grafos⁵ que puede utilizarse en el estudio morfométrico de redes y constituye un tipo de análisis explicativo que permite conocer con base a datos parciales, que aspecto tiene la estructura completa de la red o su desarrollo. Permite además, identificar problemas geográficos a partir de las relaciones entre los asentamientos y las redes de transporte, en función de la propiedad topológica, su conectividad y no de sus dimensiones.

Los términos primitivos de la teoría pueden relacionarse fácilmente con objetos geográficos reales, agrupando las medidas que de su interrelación se derivan en tres bloques: conectividad o cohesión, accesibilidad y centralidad, y forma. Los resultados de este tipo de análisis, utilizados para la planificación, permiten potenciar nodos a través de las mejoras en las conexiones de la red.

Los estudios de redes que utilizan la teoría de grafos pueden ser de dos tipos: estáticos y dinámicos. Los estáticos se describen a través de índices de forma y conexiones, aunque su desarrollo se produzca a través de una sucesión temporal, y los dinámicos se encargan de valorar los elementos de conexión de la red con variables reales asociadas con la operación del sistema como pueden ser las distancias, costos, o los flujos que por ellas circulan.

⁴ Ibid.

⁵ Petrus, J. y Seguí, J. (1991). Geografía de Redes y Sistemas de Transporte. Editorial Síntesis. España.

Los nodos o vértices de la red pueden constituirse por los puntos de origen y destino de los intercambios (ciudades, puertos, aeropuertos, centros de zona denominados centroides, a los que se atribuyen las características del área que representan). Los arcos o aristas se identifican con las rutas.

Un primer nivel de análisis en una red de transporte es la Matriz de Conectividad⁶, esta es una matriz simétrica cuyos elementos indican si hay conexión directa o no entre un par de nodos. Si existe conexión directa $C_{ij} = 1$ y si no hay conexión directa $C_{ij} = 0$. La suma de cada fila o columna de la matriz indica el número de arcos que confluyen en ese nodo, ver Figura No. 1 y Tabla No. 1.

Figura No. 1 Esquema de grafo

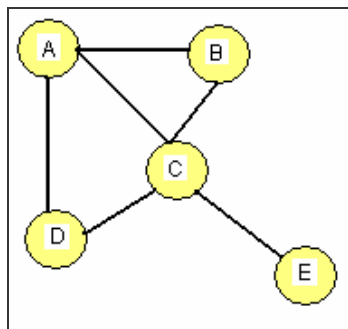


Tabla No. 1 Matriz de Conectividad, C

	A	B	C	D	E	Σ
A	0	1	1	1	0	3
B	1	0	1	0	0	2
C	1	1	0	1	1	4
D	1	0	1	0	0	2
E	0	0	1	0	0	1
Σ	3	2	4	2	1	

En esta red, el nodo C es aquel al cual convergen más arcos, 4, seguido del nodo A al cual convergen 3 arcos, y el nodo al que menos arcos convergen es el nodo E con 1 arco.

⁶ Izquierdo, R., et al. (1991). Transportes un Enfoque Integral. España.

A partir de la matriz C, se puede calcular la Matriz de Conectividad de Segundo Grado C^2 , en la que cada elemento de la diagonal principal C_{ii}^2 indica el número de arcos que concurren en el nodo i. El resto de los elementos de la matriz que es simétrica indican el número de caminos formados por dos arcos que comunican cada par de nodos. La suma por filas o columnas (sin incluir la diagonal principal) indica el número de caminos de dos arcos que parten de cada uno de los nodos para comunicarle con el resto, ver Tabla No. 2.

Tabla No. 2 Matriz de Conectividad de Segundo Grado, C^2

	A	B	C	D	E	Σ (sin diagonal)
A	3	1	2	1	1	5
B	1	2	1	2	1	5
C	2	1	4	1	0	4
D	1	2	1	2	1	5
E	1	1	0	1	1	3
Σ (sin diagonal)	5	5	4	5	3	

Los nodos A, B y D tienen 5 caminos de dos arcos para comunicarse con los nodos de la red, seguidos del nodo C con 4 caminos, y el nodo E con 3 caminos.

Sumando $C+C^2$, se obtiene el número de caminos compuestos de uno o de dos arcos. Cuanto más alto sea el valor de las sumas (sin incluir la diagonal principal de la matriz) mayor será el grado de conexión o accesibilidad entre los nodos del grafo, indicando que el número de posibilidades de conexión entre cada par de nodos es superior.

Tabla No. 3 Matriz $C + C^2$

	A	B	C	D	E	Σ (sin diagonal)
A	3	2	3	2	1	8
B	2	2	2	2	1	7
C	3	2	4	2	1	8
D	2	2	2	2	1	7
E	1	1	1	1	1	4
Σ (sin diagonal)	8	7	8	7	4	

Las posibilidades de conexión para la red indicada son las siguientes:

- Los nodos A y C tiene mejores posibilidades de conexión entre ellos mismos, seguidas por la posibilidad de conexión con los nodos B y D, y las menores posibilidades de conexión son con el nodo E.
- Los nodos B y D tienen iguales posibilidades de conexión entre ellos mismos y con los nodos A y C, menores posibilidades con el nodo E.
- El nodo E tiene pocas posibilidades de conexión con toda la red.

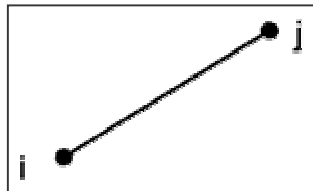
3.1. NIVELES DE ACCESIBILIDAD ⁷

Antes de analizar los indicadores de accesibilidad más utilizados, interesa realizar algunas consideraciones acerca de la escala y ámbito de estudio, ya que solo es posible establecer comparaciones cuando estos coinciden. A tal fin, pueden distinguirse tres niveles de accesibilidad:

3.1.1. Accesibilidad Relativa (a_{ij})

Mide la calidad de conexión entre dos puntos situados en un mismo territorio.

Figura No. 2 Accesibilidad Relativa (a_{ij})



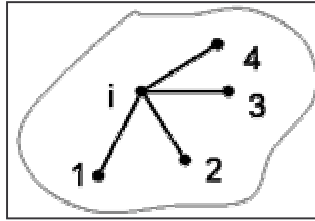
3.1.2. Accesibilidad Integral (A_i)

Mide el grado de interconexión de un nodo, con los demás de la misma zona.

$$A_i = \sum_j a_{ij} \quad (1)$$

⁷ Ibid.

Figura No. 3 Accesibilidad Integral (A_i)



3.1.3. Accesibilidad Global (A)

Es la suma de las accesibilidades integrales de todos los nodos de la zona de estudio.

$$A = \sum_i A_i \quad (2)$$

Es representativa del grado de conexión de toda la red y refleja el efecto sobre ella de cualquier actuación.

La accesibilidad relativa e integral permite establecer comparaciones entre puntos del área en estudio y sacar conclusiones en ese ámbito. Un estudio de operación y accesibilidad permite evaluar las mejoras que aportan las infraestructuras de transporte que se prevén construir.

3.2. MEDIDAS DE ACCESIBILIDAD

Existe una variedad de indicadores de accesibilidad, con formulaciones muy diversas, sin embargo, todos ellos permiten evaluar la calidad de las comunicaciones entre diversos puntos situados en la misma zona de estudio. Los análisis de accesibilidad pueden aplicarse a estudios de planificación de infraestructuras de transporte, análisis de redes de transporte público, diseño de políticas de integración territoriales y cohesión social entre regiones, etc.

El análisis de accesibilidad se enfoca sobre la funcionalidad de la actuación dentro del contexto geográfico el que se inserta, desde un punto de vista esencialmente descriptivo de los efectos del transporte en el territorio⁸.

A pesar de todas las bondades del análisis de accesibilidad hay que ser conscientes de la imprecisión del valor de los indicadores obtenidos por interpolación en aquellos puntos donde no se dispone de la red vial.

Se recomienda el uso generalizado de sistemas de información geográfica que ayudarían a realizar inventarios más fáciles de explotar, efectuar estudios de velocidades en la red, y facilitarían el análisis de diferentes escenarios de una forma más ágil y económica. La necesidad de construir un modelo de simulación de redes de transporte en soporte informático responde al objetivo de disponer de técnicas, instrumentos, procedimientos, métodos y herramientas de apoyo que permitan realizar un análisis integral de los sistemas de transporte.

Las medidas de accesibilidad que se reconocen son las siguientes:

3.2.1. Medidas Topológicas

Son las más antiguas y sólo consideran la red de transporte, entre los indicadores topológicos más comunes se tienen:

3.2.1.1. Presencia / Ausencia⁹

Es el tipo de indicador más sencillo que existe, tiene la gran ventaja de permitir una representación gráfica sencilla de los resultados. Consiste en dividir la zona en subzonas e identificar la presencia o ausencia de infraestructuras de transporte asignándole un valor por tener o no infraestructura.

⁸ Barea, P. y Martínez, O. (2002). Metodologías de Evaluación de la Accesibilidad y nuevos enfoques. V Congreso de Ingeniería de Transporte. Ibeas, A., Díaz, J. y De la Lastra, P., Editores. Universidad de Cantabria. España.

⁹ Izquierdo, R., et al. (1991). Transportes un Enfoque Integral. España.

3.2.1.2. Indicador de Densidad, D ¹⁰

Se entienden como la medida de la densidad de infraestructuras de comunicación de una zona (km/km^2), el cual puede tener muchas variaciones según la ponderación que se haga de las vías o servicios de distinta categoría.

$$D = \frac{\text{Kilómetros de red}}{\text{Área zona de estudio}} \text{ km}/\text{km}^2 \quad (3)$$

3.2.1.3. Indicadores de Densidad de Kansky, β , γ , α ¹¹

Se calculan si en vez de la longitud de la red se cuantifica la dotación de infraestructura y en lugar de medir el tamaño de la zona mediante su área pueden caracterizarse mediante el número de nodos del grafo. Los indicadores de densidad de Kansky que existen son β , γ , α , a continuación se define cada uno de ellos, siendo necesario tener en cuenta que e = número de arcos o tramos de la red, y v = número de nodos.

El índice β es la medida más sencilla de Kansky, relaciona el número de aristas y el número de vértices. Las redes de transporte muy complejas asumen valores del índice más elevados, mientras las redes cuya estructura es más sencilla, presentan valores bajos. Este índice se basa en el supuesto de que, cuando una red incoherente cambia su estructura y su cohesión empieza a crecer, las conexiones entre los nodos existentes aumentan más rápidamente que el número de nodos nuevos.

$$\beta = \frac{e}{v}, \text{ con un rango entre } 0 \leq \beta \leq \frac{v-1}{2} \quad (4)$$

El índice γ expresa la relación entre el número de aristas existentes y el número de aristas mayor posible, da una idea sobre las dimensiones de los complementos que se precisa incorporar en la red.

¹⁰ Ibid.

¹¹ Potrykowski, M. y Taylor, Z. (1978). Geografía del Transporte. . Editorial Ariel, S.A. España.

$$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}, \text{ con un rango entre } 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (5)$$

El índice α expresa la relación entre el número de arcos observado y el máximo. En las redes cuyo número de aristas es bajo, adquiere valores próximos a cero, y si el número de aristas crece, es decir, si aumenta la cohesión, se acerca a uno, y se expresa en porcentaje multiplicando el valor por el cien por ciento, quedando así representada la cohesión máxima.

$$\alpha = \frac{e-v}{2v-5}, \text{ con un rango entre } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (6)$$

Finalmente para determinar la coherencia mínima de la red, se calcula un elemento denominado e_{\min} el cual se define a continuación:

$$e_{\min} = v - 1 \quad (7)$$

3.2.1.4. Factor de Ruta, r_{ij} – Factor de Ruta Integral, R_i ¹²

Es un indicador que trata de medir la calidad del trazado, es decir, su grado de aproximación a la línea recta y si las condiciones de la ruta permiten realizar el viaje en tiempo y condiciones adecuadas. Se calcula con la construcción de dos matrices, una para las distancias sobre la red y otra para las distancias en línea recta desde y hacia cada uno de los nodos.

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{ij}^o} \quad (8)$$

Donde:

r_{ij} = factor de ruta entre los nodos i y j

¹² Izquierdo, R., et al. (1991). Transportes un Enfoque Integral. España.

d_{ij} = mínima distancia por la red de comunicaciones entre i y j

d_{ij}^o = distancia geográfica o en línea recta de i a j

Para determinar el factor de ruta integral, se emplea la siguiente expresión:

$$R_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{d_{ij}}{d_{ij}^o} \quad (9)$$

Siendo:

R_i = factor de ruta integral del nodo i

n = número de nodos

Valores superiores a 1,5 indican bajos niveles de accesibilidad, áreas con condiciones topográficas difíciles o carencia de infraestructura.

3.2.1.5. Índice Trazado – Velocidad, Itv_i ¹³

Es una variedad del factor de ruta, sus resultados se representan gráficamente utilizando curvas isocronas, las curvas de valores más altos corresponden a las zonas más inaccesibles. Se calcula con la construcción de dos matrices, una para los tiempos de recorrido sobre la red y otra para tiempos de recorrido en línea recta desde y hacia cada uno de los nodos.

$$Itv_{ij} = \frac{t_{ij}}{t_{ij}^o} \quad (10)$$

Donde:

Itv_{ij} = indicador trazado velocidad entre los nodos i y j

t_{ij} = tiempo mínimo de recorrido de i a j utilizando la red

¹³ Ibid.

t_{ij}^o = tiempo ficticio que se tardaría en recorrer la distancia i-j en línea recta a la velocidad media de circulación

$$itv_i = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}^o} \quad (11)$$

Siendo:

itv_i = indicador trazado velocidad del nodo i

n = número de nodos

3.2.1.6. Indicador Absoluto de Tiempo Global, T_i ¹⁴

Es un indicador que mide la suma de tiempos desde un punto a todos los demás. El punto de menor sumatoria de tiempo es el mejor comunicado. Este indicador tiende a favorecer los puntos ubicados hacia el centro de una red por su localización geográfica.

$$T_i = \sum_{j=1}^{j=n} t_{ij} \quad (12)$$

Donde:

t_{ij} = tiempo mínimo de recorrido de i a j utilizando la red

n = número de nodos

3.2.2. Medidas Agregadas

Proporcionan una información conjunta de un grupo de nodos de la red vial, y su relación con otros, los más conocidos de este grupo son:

¹⁴ Sarmiento, I., Muñoz, J. y Ángel, C. (2000). Análisis de la Accesibilidad en la Región del Occidente Colombiano. IV Congreso de Ingeniería de Transporte. Colomer, J y García, A. Editores. Universidad Politécnica de Valencia. España.

3.2.2.1. Indicador de Gravedad¹⁵

Es un indicador que incluye una variable de tipo social, en este caso el número de habitantes de cada uno de los nodos, y se restringe con un valor de impedancia, la cual se define como la dificultad asociada al hecho de desplazarse de i a j . A mayor β se tiene una menor participación en la accesibilidad integral y global de los nodos que se encuentran más alejados unos de otros. El nodo con mejores condiciones de accesibilidad es aquel que tenga la mayor sumatoria de sus a_{ij} .

$$a_{ij} = \frac{P_j}{e^{\beta d_{ij}}}, \forall i \neq j \quad (13)$$

P_j = población del nodo de destino

β = impedancia entre i y j .

d_{ij} = distancia en km entre los nodos i y j

¹⁵ Izquierdo, R., et al. (1991). Transportes un Enfoque Integral. España.