

# **MODELO SISTÉMICO EN REDES DE TRANSPORTE PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE Y MEJORA DE LA RESILIENCIA DE LA CIUDAD DE AYACUCHO**

**Cristian Castro Pérez**

Unidad de Investigación e Innovación de Ingeniería de Minas, Geología y Civil  
Programa DE Ingeniería Civil - Área: Materiales, Edificaciones y Sismicidad  
E-mail: cristian.castro@unsch.edu.pe

## **RESUMEN**

El objeto es desarrollar un modelo numérico predictivo para la simulación de redes de transporte de infraestructura crítica que contribuya a la obtención de las zonas de macroaccesibilidad y mesoaccesibilidad, bajo el paradigma de dimensiones urbanas, que funcionan yuxtapuestas a un sistema de redes complejas interconectadas afectadas por vulnerabilidades sistémicas en ciudades difusas, para aproximar una teoría unificada de ciudades. Este modelo es función de la configuración geométrica de ciudades y los cambios en sus características; teniendo en cuenta, la expansión y densificación de las redes de escala libre de transporte y la disposición de los nodos concentradores (“hubs”). Se aporta en la programación de un modelo integrador de transporte y territorio en MATLAB denominado MiM, que considera las características propias de sistemas de transporte que incorporan las dinámicas de las ciudades y sus amenazas, para coadyuvar a determinación de las zonas de accesibilidad a los nodos concentradores que es uno de los parámetros más importante de la vulnerabilidad sistémica en transporte. Se obtienen zonas de accesibilidad, donde se incluye el efecto de la “anisotropía” basada en la impedancia del flujo o movimiento en los dominios y subdominios que caracterizan una ciudad; contribuyendo a la planificación de ciudades resilientes.

Palabras clave: Modelación del transporte, macroaccesibilidad, mesoaccesibilidad, vulnerabilidad en redes, transporte urbano, modelo basado en actividades, transporte y uso de suelo.

## **SYSTEMIC MODEL IN TRANSPORTATION NETWORKS TO REDUCE THE RISK OF DISASTER AND IMPROVE THE RESILIENCE OF THE CITY OF AYACUCHO**

### **ABSTRACT**

The aim is to develop a predictive numerical model for the simulation of critical infrastructure transport networks that contributes to obtaining zones of macroaccessibility and mesoaccessibility, under the paradigm of urban dimensions, which operate juxtaposed to a system of complex interconnected networks affected by systemic vulnerabilities in diffuse cities, to approximate a unified theory of cities. This model is a function of the geometric configuration of cities and the changes in their characteristics; taking into account the expansion and densification of free-scale transport networks and the arrangement of hub nodes. It is provided in the programming of an integrative model of transport and territory in MATLAB called MiM, which considers the characteristics of transport systems that incorporate the dynamics of cities and their threats, to help determine the accessibility zones to the nodes concentrators which is one of the most important parameters of systemic vulnerability in transport. Accessibility zones are obtained, which include the effect of "anisotropy" based on the impedance of flow or movement in the domains and subdomains that characterize a city; contributing to the planning of resilient cities.

Keywords: Transport modeling, macro accessibility, meso accessibility, vulnerability in networks, urban transportation, activity based model, Land-Use transport.

### **INTRODUCCIÓN**

Tradicionalmente, los estudios de riesgo de desastres solo han considerado factores sociales y físicos al examinar la vulnerabilidad. Sin embargo, examinar las vulnerabilidades sistémicas es importante para una definición más detallada de vulnerabilidades en regiones. Las vulnerabilidades sistémicas se pueden definir por la accesibilidad pública a los servicios de emergencia, como hospitales. Las redes viarias urbanas y redes de carreteras afectan tanto la distancia, las

barreras y el tiempo de viaje hacia y desde las instalaciones. Por lo tanto, la calidad del acceso depende en gran medida de los sistemas viarios y de red de carreteras específicos de las regiones.

Se considera el manejo de las siguientes variables: configuración vectorial de la ciudad (dominio), geometría de los distintos usos de suelo (subdominios), impedancia de circulación por situación de riesgo (anisotropía), a las estaciones de las redes complejas (hubs), para poder obtener zonas de accesibilidad según la configuración y evaluación de los nodos de alta concentración en las redes de ciudades a través de la solución del modelo continuo creado basada en métodos de discretización del dominio y factores como la relación de zonas de viaje y conectividad que son cruciales en la sostenibilidad de las ciudades ya que en situación de desastres la movilidad y la interacción entre espacio y territorio según la influencia de la escala, son determinantes en la reducción de riesgos. Se pretende que los resultados coadyuven a considerar a la resiliencia no como una respuesta inmediata a la adversidad de impactos o como una mera técnica de intervención urbanística, sino como uno de los vectores fundamentales para avanzar hacia una ciudad que implique menos riesgo. En esta investigación se aporta en la elaboración y programación de un modelo integrador del transporte y territorio, que considera las características propias de la red e incorpore las dinámicas de viajes basadas en actividades, para mejorar las expectativas de un enfoque discreto.

El objeto es desarrollar modelos basados en un enfoque continuo de acuerdo a la configuración general de una ciudad media, considerando el uso del suelo, red e impedancias. Se estudia el impacto del territorio, discretización, configuración, puntos atractores, zonas de viaje, volumen de viaje, mediante la realización de experimentos computacionales, que demuestran que todas las técnicas estudiadas se ven afectadas en mayor o menor medida por las características del tráfico ante diferentes modificaciones urbanas, lo que genera una gran dependencia del desarrollo de las ciudades a la capacidad de operación de las vías. Se cuantifica la medida en la que la disposición de los puntos atractores en el dominio de una ciudad crea zonas dinámicas de viaje que depende de factores como el contorno de subdominios, discretización, localización de actividades; y se subraya la importancia de la obtención de las zonas de viaje de acuerdo a la distancia afectada por superficies de fricción.

Los dominios de las ciudades básicamente son no convexos y son regiones de elevada accesibilidad conectadas mediante redes complejas como las de transporte que favorecen el proceso continuo de expansión urbana y de actividades, mostrando la correspondencia entre las características demográficas (la población, su densidad) del espacio analizado y los diferentes grados de accesibilidad en las distintas áreas cubiertas por dichas redes, representados en las paradas o estaciones caracterizadas por los nodos. (Castro, 2015). Referente a los sistemas de transporte, una alteración en las redes de transporte urbano, por más pequeña que sea, puede llevar a que los territorios del área de influencia, sufran determinados daños que reduzcan, o imposibiliten, un adecuado movimiento e intercambio de bienes y personas. (Oliveira et al., 2006). Una de las soluciones contempladas es la redundancia del sistema, esto es, establecer una conexión alternativa de algún tramo o conjunto de los mismos afectados por una alteración, si representan una mayor fiabilidad o un beneficio importante para el resto de la red, al cubrir una proporción de la demanda.

## **Revisión de literatura**

El término "infraestructura crítica" se define como "procesos, sistemas, instalaciones, tecnologías, redes, activos y servicios esenciales para la salud, la seguridad o el bienestar económico y el funcionamiento efectivo del gobierno, cuya interrupción, resultaría en pérdida de vidas o daños económicos severos" (Walker et al., 2014; Hornet et al., 2011).

Desde hace 30 años aproximadamente, se ha mostrado interés por realizar investigaciones que permita conocer y medir las redes de transporte automotor desde la perspectiva de su vulnerabilidad y confiabilidad. Dicho interés crece dado el incremento constante en la cuantía del valor movido de las mercancías en tránsito y por las consecuencias críticas de pérdida de tiempo (e incluso vidas) en el traslado de las personas. (Di Gangi et al., 2005). La mayoría de los autores que recientemente han tratado este tema (Jenelius et al., 2006; Berdica, 2002a; Lleras et al., 2001; Tampere et al., 2007) coinciden en que el término vulnerabilidad debería enfocarse a los efectos de las amenazas sobre la infraestructura de transporte; sin embargo, el concepto de vulnerabilidad de redes carreteras todavía no cuenta con una definición acabada y mucho menos, con una expresión matemática aceptada (Husdal, 2006).

Según el estado del conocimiento de la integración de transporte y territorio, los enfoques se agrupan de acuerdo a la similitud de las consecuencias que cuantifican:

- a) Primero, cambios en la conectividad.
- b) Segundo, medición de los cambios en accesibilidad
- c) Tercero, consecuencias de la interrupción en función del tiempo y/o costo de viaje.

En el contexto de las redes de transporte la vulnerabilidad se relaciona con su capacidad para seguir funcionando después de sufrir una alteración, es decir, con la susceptibilidad de una red a que determinados incidentes puedan causar reducciones en los niveles de servicio y las condiciones de accesibilidad (Berdica, 2002). La medida de la accesibilidad se realiza considerando los costes totales de viaje o los de tiempo de desplazamiento, contemplando la vulnerabilidad como un insuficiente nivel de servicio de la red, o “accesibilidad reducida”. Tener en cuenta los tramos alternativos que den redundancia a la red y minimice las consecuencias de la alteración de la red. (Rodríguez, 2012)

## MATERIAL Y MÉTODO

Dentro del propósito general de analizar la vulnerabilidad de una red de transporte se desarrolló una metodología propia para medir o estimar la vulnerabilidad de las redes de transporte basado en los conceptos de macroaccesibilidad y mesoaccesibilidad. Luego se empleó dicha metodología en el estudio de un territorio concreto y se analizó los efectos y posibles consecuencias producidas por la vulnerabilidad sobre la red de transporte y el área en la que se ubica, finalmente se extrajo las conclusiones sobre la vulnerabilidad de la red de transporte analizada.

### Relación del transporte con territorio

Existen 4 modelos (Munizaga, 1993): **densificación** (desarrollo concentrado de urbanización en un determinado territorio, ligado al crecimiento controlado en altura, con una forma urbana bastante compacta y definida y con una alto índice poblacional por hectárea), **extensión** (asociado a crecimientos de muy baja densidad y con una forma urbana muy dispersa y extensiva en el territorio), **agregación** (la ciudad crece por la aparición de fragmentos relativamente homogéneos) y **superposición** (la urbe se densifica por medio de grandes infraestructuras combinadas y superpuestas, con edificios).

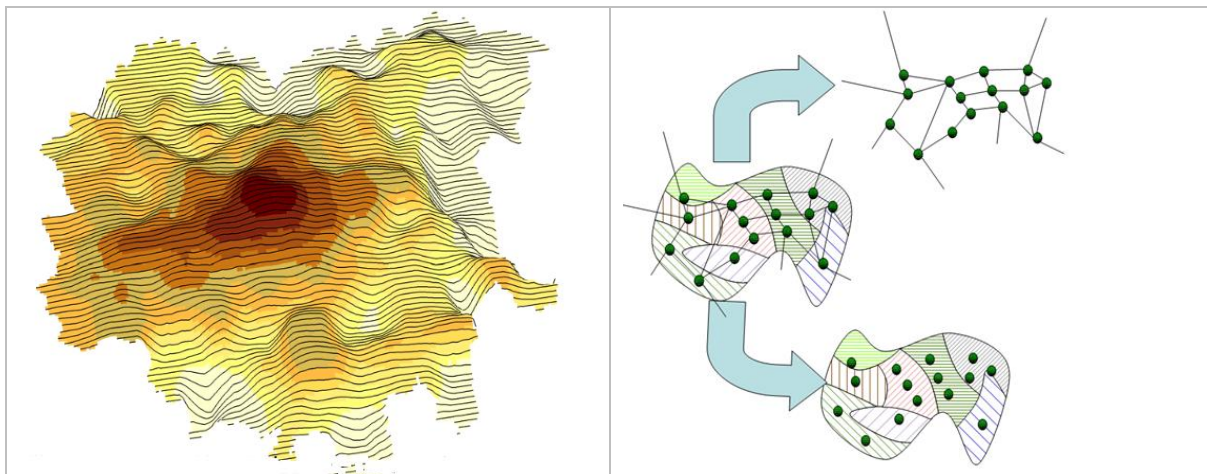


Figura 1. Modelo integrado de uso del suelo y redes de transporte (Fuente: Romero, Benítez)

### Modelación de transporte en ciudades

Información:

- Área de estudio (zonificación)
- Geometría de la red vial.
- Actividades urbanas.
- Demanda de viajes.

El sistema de zonas permite trabajar en grupos más manejables desde el punto de vista de la modelación:

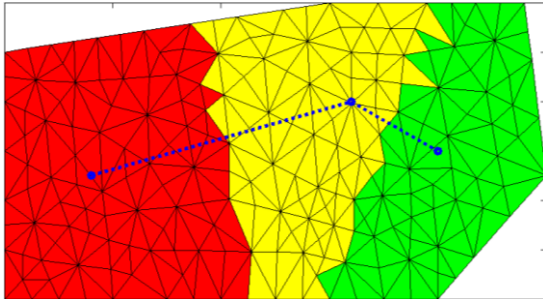
- **Nodo.**- representa a una intersección del sistema vial.
- **Centroide.**- se asume que las actividades de la zona se concentran en este punto.
- **Vías.**- es la representación simplificada del sistema vial.
- **Límites.**- es el borde que encierra al área de estudio.

### Programa MiM - MOBILIS.

Se presenta una aplicación informática, denominada MiM®, que utilizará como plataforma el módulo MOBILIS (programación estructurada de creación de zonas de viajes en un continuo) de preproceso, solución y posproceso en MATLAB. Es una aplicación integrada de modelamiento y solución computacional de problemas de integración dinámica entre territorio, transporte y movilidad. Está orientado para el análisis de: modelos macroscópicos y mesoscópicos de redes y modelos de asignación discretos y continuos.

### Programa MiM, Módulo MOBILIS.m: Generación de zonas de accesibilidad

Se considera una región de forma arbitraria con múltiples zonas centrales atractoras (ZCA), en el que la red viaria se aproxima como un continuo. Se supone que estas ZCA son suficientemente compactas en comparación con toda la región. Las diferentes clases de usuarios, que se distribuyen continuamente a lo largo de la región, se desplazará desde la ubicación de la demanda a las ZCA a lo largo de la ruta menos costosa en el espacio 2D. Debido a las diferencias de viajar en la superficie de calles y el sistema de vial urbano, éstas se definen por separado en la región de estudio.



**Figura 2.-** Discretización del Programa MiM en dominio y sub dominios (Fuente: Elaboración propia)

### Cálculo de la vulnerabilidad mediante la accesibilidad potencial:

Los impactos debidos a la interrupción del tráfico en ciertos tramos de la red se evalúan a partir de las pérdidas registradas en términos de accesibilidad. En este trabajo se utiliza el modelo de potencial económico, que pertenece a la familia de los modelos gravitatorios y es el indicador más utilizado en los estudios de accesibilidad (Hansen, 1959; Linneker y Spence, 1992; Dundon-Smith y Gibb, 1994; Bruinsma y Rietveld, 1998; Gutiérrez, 2001; López et al., 2008; Gutiérrez et al., 2010). Su expresión matemática clásica es la siguiente:

$$A_i = \sum \frac{M_j}{t_{ij}^a} \quad [1]$$

Siendo:  $A_i$  = Accesibilidad Potencial,  $M_j$  = Masa (Población de los destinos  $j$ ),  $t_{ij}$  = Tiempo de viaje entre los puntos  $i$  y  $j$  (medida en minutos),  $i$  = Nodos de origen,  $j$  = Nodos de destino,  $a$  = exponente de la distancia (simboliza la impedancia del territorio).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

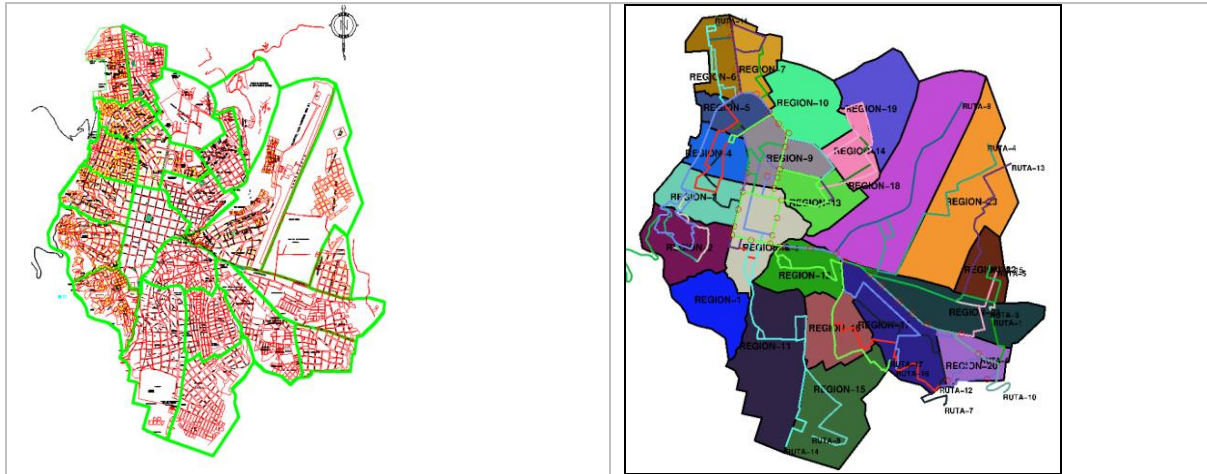


Figura 3. Zonificación de la ciudad (dominio) en regiones (subdominio con "MiM") (Elaboración propia)

El denominado Modelo "MOBILIS" (MiM) de tipo continuo que considera los efectos de anisotropía, está basado en el paradigma de actividades. Esta formulación puede aplicarse al transporte, considerando una discretización del dominio (ciudad de baja densidad) y los subdominios (zonas) en elementos finitos; donde, las zonas de viaje se calculan a partir de atractores dinámicos de viajes, con las fricciones o impedancia (el concepto de impedancia, por analogía con la electricidad, se refiere a la dificultad de moverse en una red de transporte urbana y puede medirse en distancia, tiempo o costo) intrínsecas en cada zonas y la distancia por la separación espacial entre el centroide de cada elemento discretizado y el atractor, medida en distancia, tiempo o costo.

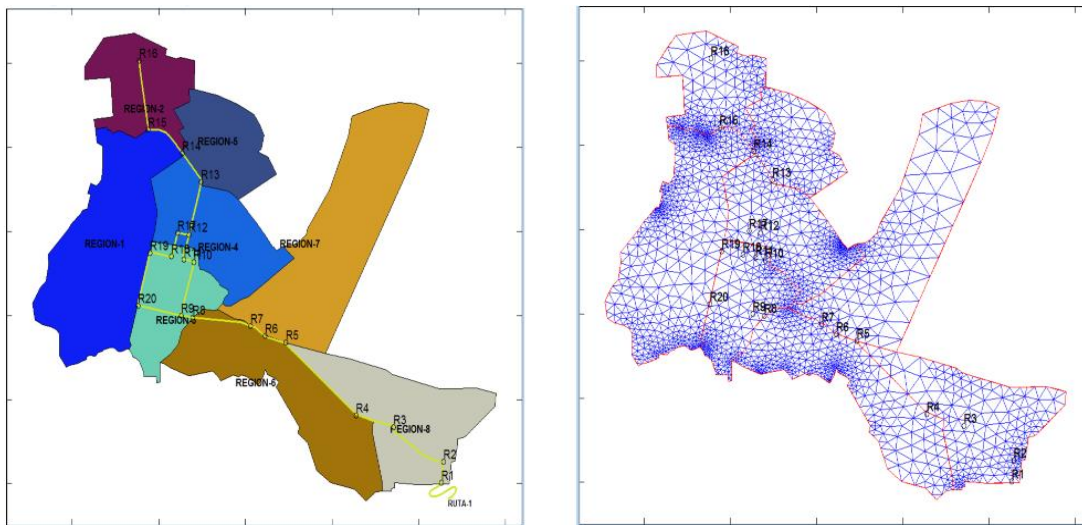


Figura 4. Discretización de las regiones asociados a red de transporte crítica (Elaboración propia)

Como resultado, se puede decir entonces que la cantidad de viajes de personas en una "zona de viaje" es proporcional al área delimitada en la discretización del continuo, la cual se obtuvo de los puntos atractores que evolucionan en el tiempo y son función de la separación espacial a las invariante del territorio de redes denominada "nodo". El factor fricción depende de las superficies de fricción que pueden superponerse al territorio de redes, que se basan en datos del transporte y uso de suelo como las pendientes, que crea distancias virtuales mayores a las de la separación espacial entre O-D, que en un modelo isotrópico se puede aproximar a distancias Euclídeas. La separación espacial entre puntos (centroides de cada elemento discretizado y punto atractor de actividades) se puede medir en varias unidades de impedancia.

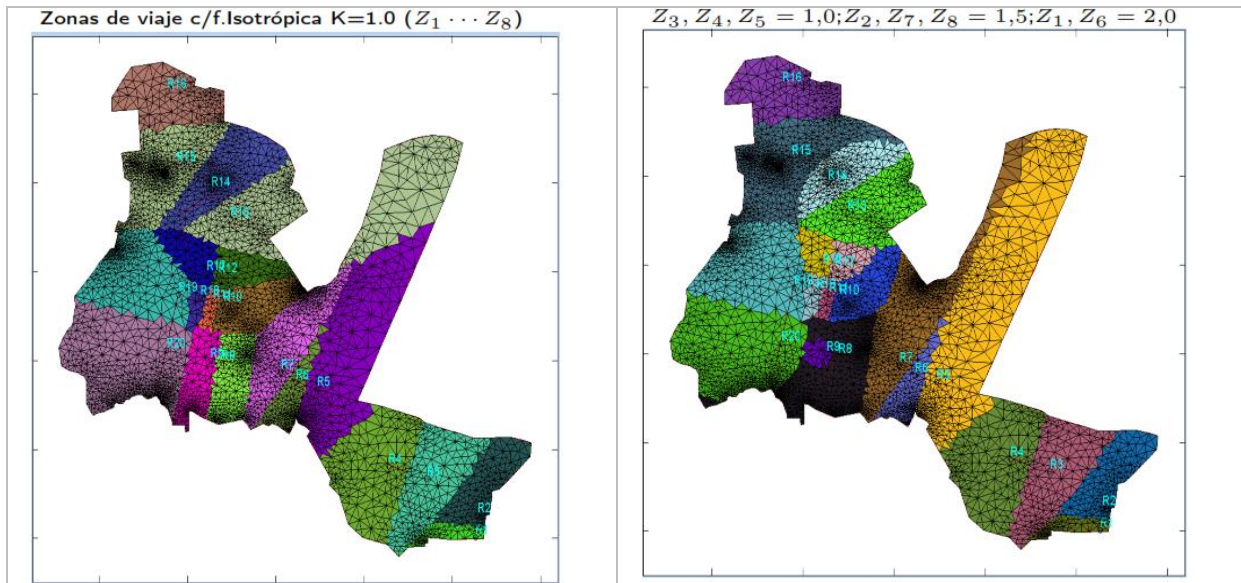


Figura 5. Zonas de pertenencia con y sin impedancia según la macroaccesibilidad (Elab. propia)

Se tiene definida la Zona 18, clasificada según sus características de uso de suelo y tipo de viviendas, las cuales se sub dividen en 08 Sub Zonas, que presentan características de demanda homogéneas y se asume que toda la actividad de las mismas se concentra en "centroides". Matemáticamente, la ciudad se modela como un grafo dirigido donde los centroides y las intersecciones son los "nodos", y los tramos entre intersecciones son los arcos o "links". Los arcos tienen asociadas funciones que representan el costo (tiempo de viaje) que se ajusta experimentalmente.

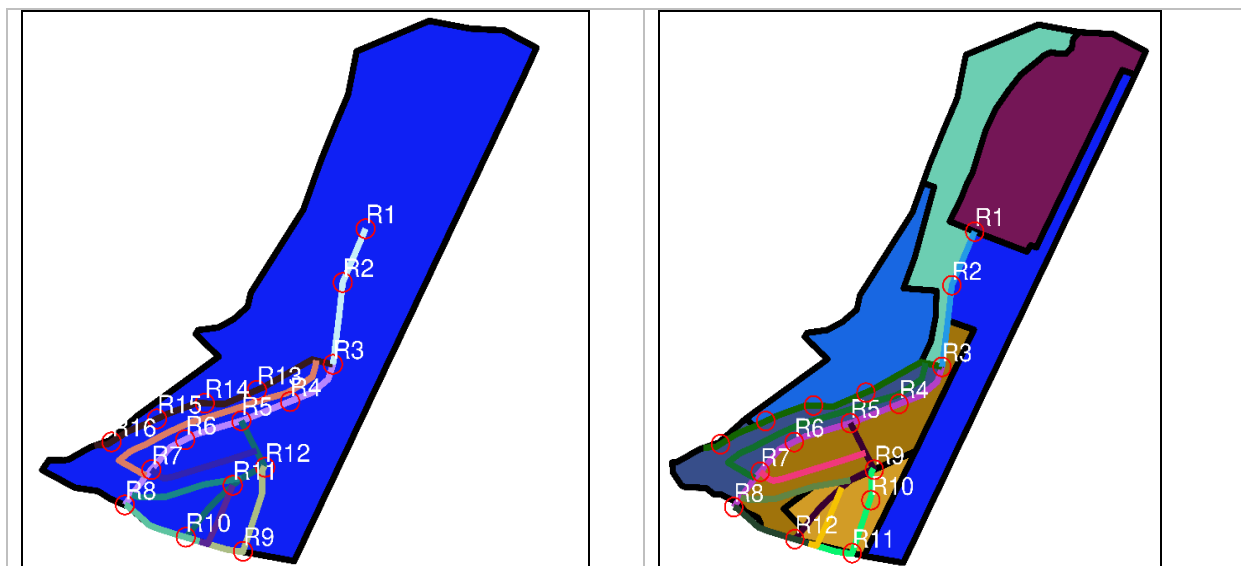


Figura 6. Zona de estudio con redes viales y paradero con usos de suelos e impedancia (Elab. propia)

Se ha determinado 16 paraderos o puntos de salida; los mismos que se consideran como puntos de reunión más cercanos, donde las personas se desplazaran por razones de seguridad, para poder realizar una evacuación segura frente a la aparición de un evento o contingencia. Para este procedimiento se emplea el modelo computacional, creado específicamente para este cálculo, empleando como herramienta el programa MiM. Los Escenarios planteados son:

- ✓ **Escenario N° 01:** Escenario base; es el funcionamiento de la red urbana en condiciones normales.
- ✓ **Escenario N° 02:** Debido a efectos sísmicos, se propone el corte de 04 paraderos.
- ✓ **Escenario N° 03:** Debido a incendios, se propone el corte de 03 paraderos.
- ✓ **Escenario N° 04:** Debido la presencia de lluvias torrenciales, se propone el corte de 02 paraderos.

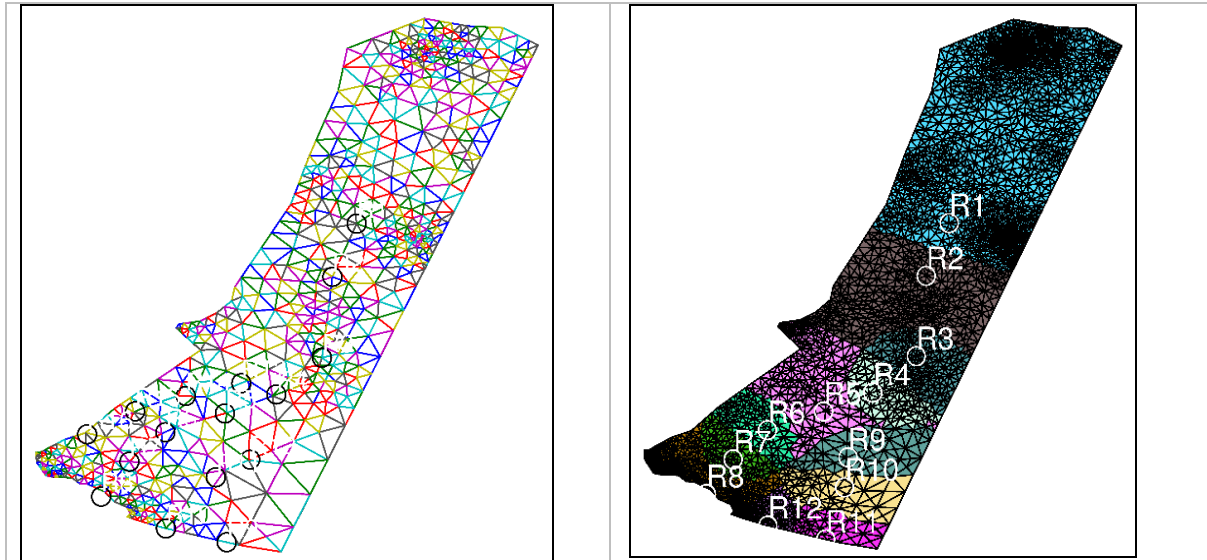


Figura 7. Malla TIN con triangulación Delaunay con atractores y zonas de accesibilidad (Elab. propia)

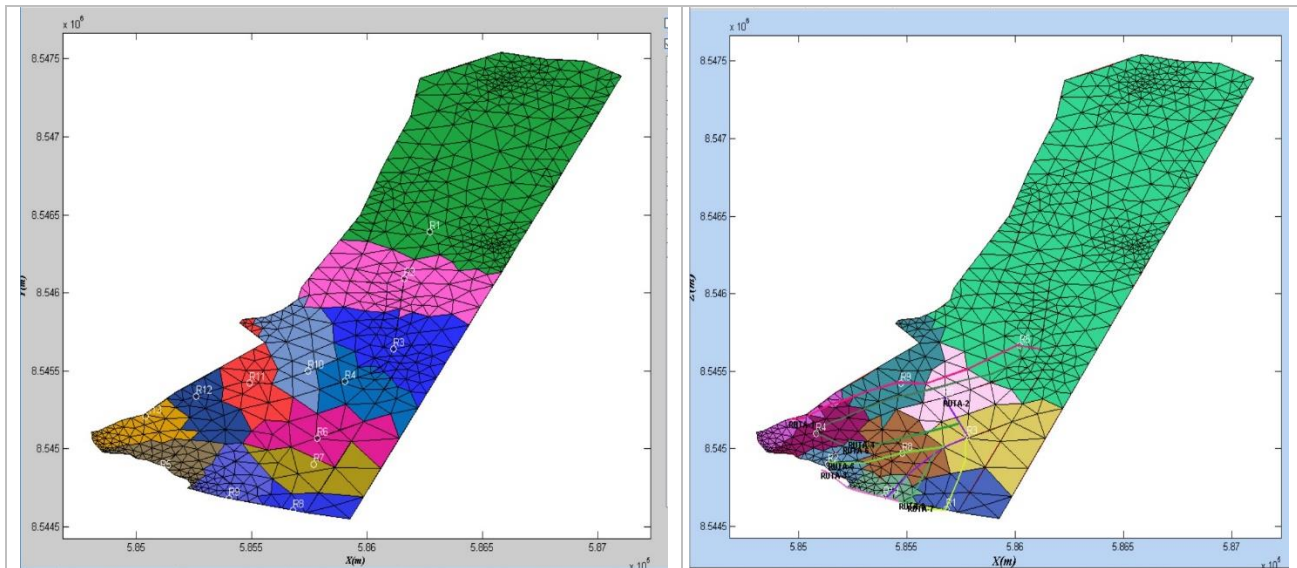


Figura 8. Zonas de accesibilidad para impedancia isotrópica y anisotrópica (Elab. propia)

**Tabla 1.** Valores promedio ponderado de la vulnerabilidad en los escenarios considerados.

Nº	ESCENARIO	VALOR DEL PROMEDIO DE LA VULNERABILIDAD	VALOR DEL PROMEDIO DE LA VULNERABILIDAD PONDERADO POR POBLACION	% SOBRE LA VULNERABILIDAD PONDERADA DE REFERENCIA	% DE INCREMENTO RESPECTO A LA VULNERABILIDAD PONDERADA DE REFERENCIA
01	VULNERABILIDAD BASE (Condicion Actual)	0.40	6198.52	100	0
02	VULNERABILIDAD CORTE 1 (Red Vial, sin la Via Evitamiento, debido a efectos sismicos)	0.41	6399.51	103.24	3.24
03	VULNERABILIDAD CORTE 2 (Red Vial, sin parte de Av. Ejercito, debido a incendio en grifos)	0.53	8103.90	130.74	30.74
04	VULNERABILIDAD CORTE 3 (Red vial, sin Av. Ramon Castilla, debido a lluvias torrenciales)	0.42	6477.61	104.50	4.50

**Tabla 2.** Determinación de la accesibilidad en nodos concentradores – Escenario 01 Isotrópico.

ESCENARIO 1 - ISOTROPICO		
IMPEDANCIA	ZONA	ÁREA DE ACCESIBILIDAD
K1 = 1.00, K2 = 1.00, K3 = 1.00, K4 = 1.00, K5 = 1.00, K6 = 1.00, K7 = 1.00	R1	9.937800E+05
	R2	2.916800E+05
	R3	2.084800E+05
	R4	1.190800E+05
	R5	5.909300E+04
	R6	7.112100E+04
	R7	7.824900E+04
	R8	3.841400E+04
	R9	1.260300E+05
	R10	1.245600E+05
	R11	6.156000E+04
	R12	6.354700E+04
	R13	1.385800E+05
	R14	7.259500E+04
	R15	4.080100E+04
	R16	5.958300E+04

**Tabla 3.** Determinación de la accesibilidad en nodos concentradores – Escenario 01 Anisotrópico.

ESCENARIO 1 - ANISOTROPICO		
IMPEDANCIA	ZONA	ÁREA DE ACCESIBILIDAD
K1 = 1.00, K2 = 2.00, K3 = 1.00, K4 = 1.50, K5 = 1.25, K6 = 1.25, K7 = 1.50	R1	9.937800E+05
	R2	3.672100E+05
	R3	1.251200E+05
	R4	7.518700E+04
	R5	8.024000E+04
	R6	4.772600E+04
	R7	5.027200E+04
	R8	6.913100E+04
	R9	1.401200E+05
	R10	1.334000E+05
	R11	6.645300E+04
	R12	4.042200E+04
	R13	1.670000E+05
	R14	7.554000E+04
	R15	4.989900E+04
	R16	6.566300E+04

**Tabla 4.** Determinación de la accesibilidad en nodos concentradores – Escenario 02 Isotrópico.

ESCENARIO 2 - ISOTROPICO		
IMPEDANCIA	ZONA	ÁREA DE ACCESIBILIDAD
K1 = 1.00, K2 = 1.00, K3 = 1.00, K4 = 1.00, K5 = 1.00, K6 = 1.00, K7 = 1.00	R1	9.937800E+05
	R2	2.948400E+05
	R3	2.295200E+05
	R4	1.924900E+05
	R5	1.498700E+05
	R6	1.314100E+05
	R7	1.203700E+05
	R8	5.919300E+04
	R9	1.260300E+05
	R10	1.245600E+05
	R11	6.156000E+04
	R12	6.354700E+04

**Tabla 5.** Determinación de la accesibilidad en nodos concentradores – Escenario 02 Anisotrópico.

ESCENARIO 2 - ANISOTROPICO		
IMPEDANCIA	ZONA	ÁREA DE ACCESIBILIDAD
K1 = 1.00, K2 = 2.00, K3 = 1.00, K4 = 1.50, K5 = 1.25, K6 = 1.25, K7 = 1.50	R1	9.937800E+05
	R2	4.047400E+05
	R3	1.355600E+05
	R4	1.069300E+05
	R5	2.376500E+05
	R6	9.605100E+04
	R7	7.568300E+04
	R8	1.150900E+05
	R9	1.414100E+05
	R10	1.334000E+05
	R11	6.645300E+04
	R12	4.042200E+04

## CONCLUSIÓN

- (1) La investigación desarrolla un modelo numérico para la tener zonas de viaje y a partir de ese resultado generar cargas en los nodos atractores para determinar la accesibilidad en redes de infraestructura crítica, tal que se pueda solucionar la asignación de tráfico en ciudades afectadas por vulnerabilidades sistémicas. Se utiliza una malla de elementos finitos para discretizar el dominio de la ciudad bajo en enfoque continuo, que permite tener simulaciones basada en la dialéctica del centro y la periferia, y se plantea un enfoque alternativo sobre la evolución de la malla, el nodo y la red.



- (2) Se presentan como metodología las medidas de accesibilidad que proporcionan un medio para comprender la estructura espacial interna de formas urbanas radicalmente diferentes y para evaluar el impacto en las vulnerabilidades sistémicas relacionadas con el suelo y transporte. Las medidas de mesoaccesibilidad y macroaccesibilidad se utilizan para este propósito. Las medidas de mesoaccesibilidad se presentan como un medio para comprender el impacto del área local de las vulnerabilidades sistémicas a nivel urbano. Las medidas de macroaccesibilidad están relacionadas a las consecuencias distributivas del plan regional de uso de suelo y transporte.
- (3) La determinación de la accesibilidad se ha convertido en uno de los temas clave para interpretar la relación entre la forma urbana y el patrón de viaje en ciudades. Aunque el uso de la planificación y el diseño urbanos y la accesibilidad asociada influyen en los viajes tiene sentido intuitivo, los investigadores han encontrado difícil proporcionar evidencia clara de la influencia de la forma urbana. Al mismo tiempo, generalmente se reconoce que los patrones de uso de la tierra y los patrones de transporte están estrechamente relacionados entre sí a través del cambio de accesibilidad. Se identificaron configuraciones meso-macro espacialmente desagregadas de flujo estructural derivadas del análisis de accesibilidad y sus relaciones con el tamaño de bloque urbano, diseño de red de carreteras y líneas de metro, estaciones de metro y ubicaciones de paradas de autobús, distribución y uso de estaciones.
- (4) Se realizó la evaluación de las infraestructuras urbanas esenciales (infraestructura crítica), especialmente el sistema de redes viarias en una ciudad; considerando que, el sistema de red vial es uno de los más importantes problemas en actividades de emergencia y procesos de recuperación de desastres lindantes con la resiliencia de la ciudad, para lo cual, se evaluará los efectos sobre el tráfico y el transporte causados por estos daños. Este desarrollo será aplicable para considerar la mejora de la vulnerabilidad sistémica en las áreas urbanas, con lo cual se posibilitará tener ciudades resilientes.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ing. José Matías León, Dr. Luis Mosquera Leiva, MSc. Ing. Leonardo Flores Gonzales, MSc. Arq. Miguel A. Torres Soto, MSc. Ing. Rómulo Chinchay Romero, de la Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería de Perú

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aymerich, O. y Robusté, F. (1990): “Fiabilidad de redes de transporte bajo condiciones excepcionales”. *Transportes y Telecomunicaciones*, 42, pp. 25-37
- Berdica, K. (2002): “An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done”. *Transport Policy*, 9, 117-127.
- Berdica, K. y Mattsson, L.G. (2007): “Vulnerability: A Model-Based Case Study of the Road Network in Stockholm”, en Murray, A. and Grubestic, T. (Eds.): *Critical Infrastructure. Reliability and Vulnerability*. Berlin, Springer, 81-106.
- Bono, F. y Gutiérrez, E. (2011): “A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks”. *Journal of Transport Geography*, 19, 1443-1455.
- Bruinsma, F.R. y Rietveld, P. (1998): “The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches”. *Environment and Planning A* 30, 499-521.
- Castro, C. (2015). “Modelación continua anisótropa de asignación de viajes basado en actividades para invariantes territoriales con superficies de fricción”. *MA. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Chang, S.E. (2003): “Transportation planning for disasters: an accessibility approach”. *Environment and Planning A*, 35, 1051-1072.
- Chen, A.; Yang, C.; Lee, M. y Kongsomsaksakul, S. (2007): “Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks”. *Networks & Spatial Economics*, 7, 241-256.
- Cova, T.J. (1999): “GIS in emergency management”. *Geographical Information Systems*, 2, 845858.
- Criado, R.; Flores, J.; Hernández-Bermejo, B.; Pello, J. and Romance, M. (2004): “Effective measurement of network vulnerability under random and intentional attacks”. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 4, pp. 307-316
- Díaz Pineda, J. (2000): “Introducción al problema de la vulnerabilidad de las infraestructuras de carreteras, en Carreteras”. *Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, 106, 7-29.
- Dundon-Smith, D.M. y Gibb, R.A. (1994): “The Channel Tunnel and regional economic development”. *Journal of Transport Geography* 2 (3), 178-189.

- Dragu, V., Stefanica, C. and Burciu, S. (2011): "Accessibility Study on Regard to Bucharest Underground Network". *University Politechnica of Bucharest Science Bulletin*, Series D, Vol. 73, Issue 1, pp. 221 – 236
- Gutiérrez, J. (2001): "Location, economic potential and daily accessibility: an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-french border". *Journal of Transport Geography*, 9, 229-242.
- Gutiérrez, J.; Condeço, A. y Martín, J.C. (2010): "Using accessibility indicators and GIS to assess and monetarize spatial spillovers of transport infrastructure". *Journal of Transport Geography*, 18, 141-152.
- Hansen, W.G. (1959). "How Accessibility Shapes Land-Use". *Journal of the American Institute of Planners*, 5, 76-106
- Jenelius, E.; Petersen, T. y Mattsson, L.-G. (2006): "Importance and exposure in road network vulnerability analysis". *Transportation Research Part A* 40, 537–560.
- Johnson, R. (1987): "Reliability and Survivability Issues in Network Design: A Survey", *AT & T Bell Laboratories*, New Jersey.
- Kwan M-P.; Murray, A.T.; O'Kelly, M. E. and Tiefelsdorf, M. (2003): "Recent advances in accessibility research: Representation, methodology and applications". *Journal of Geographical Systems*, 5, pp.129–138
- Latora, V. and Marchiori, M. (2005): "Vulnerability and protection of infrastructure networks". *Physical Review E*, 71, pp. 015103-1 – 015103-4
- Linneker, B. y Spence, N.A. (1992): "Accesibility measures compared in an analysis of the impact of the M25 London Orbital Motorway on Britain". *Environment and Planning A*, 24, 1137-1154.
- López, E.; Gutiérrez, J. y Gómez, G. (2008): Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investments: an accessibility approach. *European Planning Studies*, 16 (2), 277-301.
- Nicholson, A. J. and Du, Z. P. (1994): "Improving Network Reliability: a framework". *Proceedings of 17 th Australian Road Research Board Conference*, 17 (6), pp.1-17.
- Olaya V. (2007) *Sistemas de Información Geográfica (Capítulo 23. Geomorfología y Análisis del Terreno) Edición 1, Revisión 26; España*. [http://svn.osgeo.org/osgeo/book/es/libro\\_sig/](http://svn.osgeo.org/osgeo/book/es/libro_sig/).
- Rey, C. E. y Cardozo, O. D. (2009): "La Vulnerabilidad en la movilidad urbana. Aportes teóricos y metodológicos", en Foschiatti, A. M. (coord./comp./autor): *Aportes conceptuales y empíricos de la Vulnerabilidad global, EUDENE, Resistencia (Chaco)*, pp. 397-425
- Rodríguez Núñez, E. (2011): Estimación de la vulnerabilidad de la red de carreteras de un territorio insular a partir de la variación de la accesibilidad; análisis mediante SIG de la isla de Mallorca. En: Hernández Luis, J.A. (ed): *Servicios, globalización y territorio, V Congreso Geografía de los Servicios*, 623-640.
- Sohn, J. (2006): "Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach". *Transportation Research Part A*, 40, 491-506.